Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!
Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

В. М. ГАВРИЛКО, В. С. АЛЕКСЕЕВ

ФИЛЬТРЫ БУРОВЫХ СКВАЖИН

В. М. ГАВРИЛКО, В. С. АЛЕКСЕЕВ

ФИЛЬТРЫ БУРОВЫХ СКВАЖИН

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

МОСКВА „НЕДРА“ 1976

УДК 628.112.4

Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры буровых скважин. Изд. 2, перераб. и доп. М., «Недра», 1976. 345 с.

В книге описаны конструкции фильтров, применяемых для водоснабжения, дренажных сооружений, мелиорации, строительного водопонижения и гидрогеологических изысканий как в Советском Союзе, так и в зарубежных странах. Приведены краткие указания по технологии изготовления фильтров, рекомендации по их подбору, расчету и области использования.

Рассмотрены вопросы влияния гидрогеологических, химических, биологических и других факторов на выбор рациональных конструкций фильтров в зависимости от условий эксплуатации. Приведены рекомендации по установке фильтров при различных методах бурения, а также способы по восстановлению производительности скважин в процессе эксплуатации.

Книга предназначена для инженеров и техников, работающих в области проектирования, бурения и эксплуатации скважин на воду. Она может быть использована также студентами горной и инженерно-гидрогеологической специальностей высших учебных заведений.

Табл. 94, ил. 165, список лит. — 120 назв.

Г $\frac{20804-498}{043\ (01)-76}$ 163—76

© Издательство «Недра», 1976

Владимир Матвеевич Гаврилко,
Владимир Сергеевич Алексеев

Фильтры буровых скважин

Редактор издательства *Л. Ф. Маклакова*. Техн. редакторы *Л. Н. Шиманова, Б. А. Илясова*
Переплет художника *Т. Н. Погореловой* Корректор *Р. Т. Баканова*

Сдано в набор 13/IV-76 г. Подписано в печать 28/VII-76 г. Т-14929.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага для глуб. печ. Печ. л. 21,5. Уч.-изд. л. 22,5. Тираж 5000 экз.
Заказ 922/5291—5. Цена 1 р. 42 к.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, Ленинград, Московский пр., 91

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние десятилетия в связи с возросшей потребностью в воде и большой загрязненностью поверхностных водотоков и водоемов значительно увеличилось использование подземных вод. В СССР использование подземных вод составляет 13—19% от общего водопотребления и более 40% от потребления воды для хозяйственно-питьевых целей.

В большинстве зарубежных стран роль подземных вод в водоснабжении населения, промышленного производства и орошения еще более велика. Так, в США использование подземных вод составляет 20% от общего водопотребления. Из 100 крупнейших городов страны 20 полностью обеспечиваются подземными водами для питьевых целей, 13 используют для водоснабжения поверхностные и подземные воды. Доля использования подземных вод в ФРГ достигает 75% от потребления для хозяйственно-питьевых целей и промышленного водоснабжения, в Швейцарии — 45,5%, в Великобритании — 25%, в Финляндии — 32%.

Основным каптажом подземных вод в настоящее время являются скважины. В СССР эксплуатируются сотни тысяч скважин.

Эффективность водозаборов подземных вод определяется конструктивными особенностями фильтров, способами освоения и эксплуатации скважин.

До недавнего времени в практике отечественных буровых работ на воду основу составляли фильтры, опорные каркасы которых изготовляли из цельнотянутых труб с круглой и щелевой перфорацией. Применяемые в конструкциях простые стали не обеспечивают фильтрам необходимой коррозионной устойчивости, существенно возрастает расход металла.

Промышленное изготовление фильтров на Дрогобычском заводе находится в начальной стадии освоения, поэтому качество их недостаточно высокое. При создании новой отрасли промышленности по производству фильтров должен учитываться уровень мирового

производства и последние достижения теории и практического опыта.

В настоящем издании книги обобщается отечественный и зарубежный опыт по конструкциям фильтров, технологии изготовления, подбору и расчету их основных параметров, технологии установки при различных способах бурения, а также анализируются причины, влияющие на дебит и время эксплуатации буровых скважин, описываются разрабатываемые и внедренные способы восстановления производительности скважин, оборудованных фильтрами.

В книге главы I, V, VI и § 23 главы III написаны д-ром техн. наук В. М. Гаврилко, главы II, III, IV — канд. техн. наук В. С. Алексеевым.

Предложения и пожелания, которые могут возникнуть у читателя по данной работе, просим направлять по адресу: Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19, издательство «Недра».

ГЛАВА I

ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ

§ 1. ФИЛЬТРЫ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

Наиболее распространены фильтры, изготовляемые из обсадных и безмуфтовых труб, что объясняется наличием таких труб на месте проведения работ, а также простотой механического оборудования, необходимого для сверления проходных отверстий; их можно изготовлять в любых механических мастерских.

Отверстия круглой формы просверливают на станках. Диаметр отверстий зависит от назначения фильтра. Если поверхность фильтра непосредственно контактирует с породой, диаметр отверстий будет зависеть от гранулометрического состава пород. Если же перфорированная труба используется только в качестве опорного каркаса под водоприемную поверхность, размер проходных отверстий должен соответствовать особенностям конструкции фильтрующих устройств, для которых он предназначен. Так, при устройстве фильтра в крупных песках применяют трубы с проходными отверстиями диаметром 5—7 мм; если каркас покрывают сетчатой тканью, диаметр проходных отверстий может быть увеличен до 10—25 мм.

Круглые проходные отверстия на трубах располагают в шахматном порядке (рис. 1). Обычно расстояния между центрами отверстий по окружности находятся в зависимости от диаметра труб в пределах 20—40 мм, вдоль оси труб — 20—30 мм.

При разбивке отверстий на фильтрах, изготовляемых из стальных труб и предназначаемых в качестве каркасов для сетчатых фильтров, рекомендуется пользоваться данными Я. С. Суреньянца [78], приведенными в табл. 1.

В настоящее время Дрогобычский завод выпускает фильтры на основе цельнотянутых стальных труб с круглой перфорацией. Кроме того, на этих фильтрах могут устанавливаться водоприемные поверхности из проволочной обмотки и тонкого листа нержавеющей стали со штампованными отверстиями при скважности 15—25%. Общий вид этих фильтров представлен на рис. 2, а техническая характеристика и их стоимость приведены в табл. 2.

§ 2. ФИЛЬТРЫ С ВОДОПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ СЕТОК

В водоносных горизонтах, представленных песками, очень часто применяют фильтры с трубчатыми (дырчатыми и щелевыми) или стержневыми каркасами, которые обтягивают сетками.

Таблица 1

Разбивка круглых отверстий на фильтрах, изготовляемых из стальных труб

Диаметр фильтра, мм	Диамстр отверстий, мм	Число отверстий в ряду	Число рядов отверстий на 1 м трубы	Площадь сечения отверстий на 1 м трубы, м²	Расстояние между центрами отверстий, мм		Скважность, %
					по окружности	по длине трубы	
100	10	16	60	0,08	22	17	20
	13	14	55	0,1	25	18	28
	16	10	50	0,1	35	20	28
150	10	23	60	0,11	22	17	22
	13	20	55	0,14	25	18	23
	16	14	50	0,14	35	20	28
	19	12	40	0,14	42	25	28
200	10	28	60	0,13	23	17	19
	13	26	55	0,19	25	18	28
	16	18	50	0,18	36	20	27
	19	16	40	0,19	41	25	28
	22	12	40	0,18	55	25	28
250	10	36	60	0,17	23	17	20
	13	32	55	0,23	26	18	28
	16	26	50	0,26	35	20	31
	19	20	40	0,24	42	25	28
	22	16	40	0,24	53	25	29
	25	14	30	0,2	60	33	29

Таблица 2

Основные параметры и размеры фильтров на основе трубчатых каркасов (по ТУ 51—644—74)

Типоразмер секции фильтров	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Длина секции, мм	Масса секции, кг	Скважность, %	Цена за одну секцию, руб.
Фильтры трубчатые перфорированные						
Т-5ФIВ	168	132	3100 ± 15	69	13,5—22,5	30
Т-6ФIВ	188	152	3100 ± 15	91	13,5—19,3	39
Т-8ФIВ	245	203	3100 ± 15	118	15,0—18,1	49
Т-10ФIВ	299	255	3100 ± 15	168	17,6—18,5	63
Т-12ФI	325	307	3100 ± 15	195	18,5	72
Т-14ФI	377	259	3100 ± 15	227	18,5	82
Т-16ФI	426	408	3100 ± 15	259	18,0	91
Фильтры трубчатые с проволочной обмоткой из нержавеющей стали						
ТП-5Ф2В	168	132	3100 ± 15	82	13,5—22,5	52
				80	13,5—22,5	50

Продолжение табл. 2

Типоразмер секции фильтров	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Длина секции, мм	Масса секции, кг	Скважность, %	Цена за одну секцию, руб.
ТП-6Ф2В	188	152	3100 ± 15	106	13,5—19,3	68
				103	13,5—19,3	63
ТП-8Ф2В	245	203	3100 ± 15	136	15,0—18,1	85
				133	15,0—18,1	81
ТП-10Ф2В	299	255	3100 ± 15	203	17,6—18,5	106
				198	17,6—18,5	99
ТП-12Ф2	341	307	3100 ± 15	229	18,5	137
ТП-14Ф2	393	359	3100 ± 15	266	18,5	157
ТП-16Ф2	442	408	3100 ± 15	304	18,5	176
Фильтры трубчатые с просечным листом из нержавеющей стали						
ТЛ-5Ф4В	168	132	3100 ± 15	82	15,0—25,0	58
ТЛ-6Ф4В	188	152	3100 ± 15	107	15,0—25,0	73
ТЛ-8Ф4В	245	203	3100 ± 15	137	15,0—25,0	90
ТЛ-10Ф4В	299	255	3100 ± 15	190	15,0—25,0	109
ТЛ-12Ф4В	339	307	3100 ± 15	223	15,0—25,0	129
ТЛ-14Ф4	391	359	3100 ± 15	259	15,0—25,0	148
ТЛ-16Ф4	440	408	3100 ± 15	294	15,0—25,0	165

Примечания: 1. На фильтры диаметром 168—203 мм навивается проволочная спираль диаметром 2 мм, а на фильтры диаметром 254 мм и более—3 мм.

2. Проволока наматывается на фильтры с зазором (просветом) в 1,5 и 2,5 мм.

3. Цены на фильтры оптовые, утверждены Государственным комитетом цен Совета Министров СССР 31 марта 1975 г. № 523.

4. При поставке трубчатых фильтров без антикоррозионного покрытия цены снижаются на 10%.

5. При поставке фильтров без резьбовых соединений с фасками под сварку цена снижается на 3%.

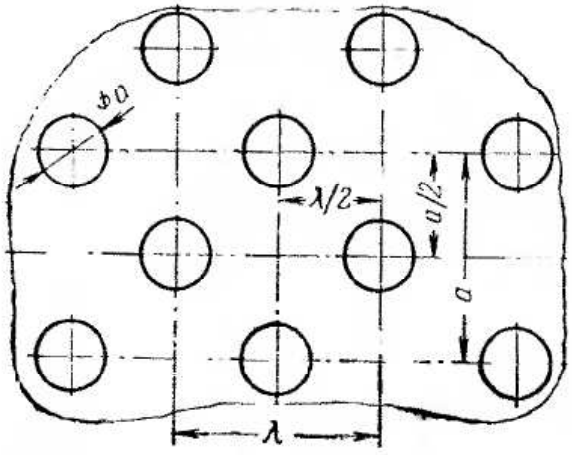


Рис. 1. Схема размещения отверстий на трубе в зависимости от ее диаметра и диаметра отверстий:

d — диаметр отверстия; *a* — расстояние между отверстиями по вертикали; λ/2 — расстояние между отверстиями по окружности

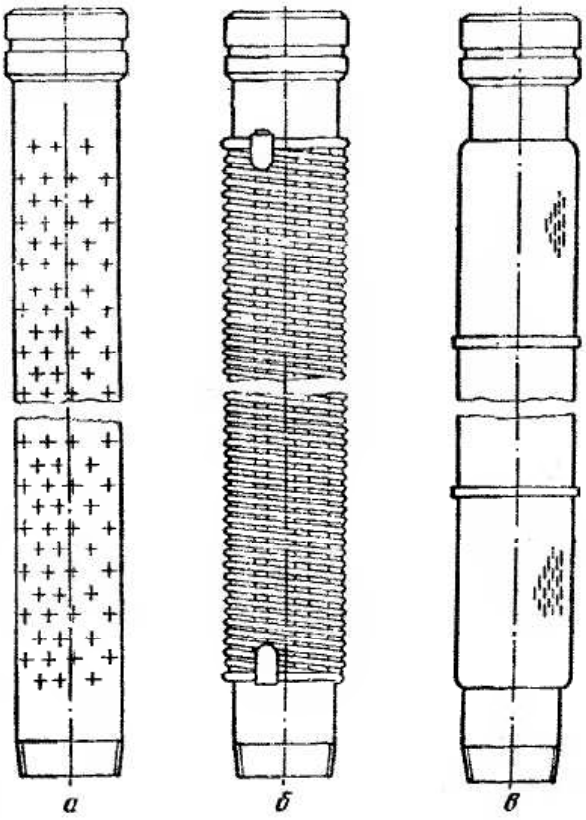


Рис. 2. Конструкции фильтров с трубчатыми каркасами:

а — с круглой перфорацией; *б* — с проволочной обмоткой; *в* — со штампованным листом

В настоящее время изготовляют сетки из стали, меди, латуни, нержавеющей стали, пластических масс, поливинилхлорида, нейлона, полистирола, а также из стеклянного волокна.

В качестве водоприемных поверхностей запрещается применять сетки, рассчитанные на длительный период эксплуатации, из простой стали вследствие их коррозионной неустойчивости.

Фильтры с металлическими сетками из меди, латуни и нержавеющей стали

Конструкция фильтров с водоприемной поверхностью из сеток является одной из старейших и наиболее распространенных. Рабочая часть сетчатого фильтра состоит из следующих элементов: опорного каркаса *1*, представляющего собой металлическую дырчатую или щелевую трубу; проволочной спирали *3* или подкладочной сетки с крупными ячейками *2*, накладываемой на опорный каркас для обеспечения более свободного доступа профильтровавшейся воде к проходным отверстиям каркаса; фильтрационной сетки *4*, которой покрывается каркас, и накладных планок *5* (рис. 3).

Фильтры с металлическими сетками имеют следующие преимущества:

возможность установки их в скважинах практически на любую глубину;

минимальный зазор между обсадной колонной и каркасом фильтра (до 50 мм);

возможность изготовления фильтров централизованно или на месте сооружения скважин;

возможность использования воды из рыхлых пород с широким диапазоном их гранулометрического состава;

сокращение сроков ведения буровых работ при относительном их удешевлении;

простота извлечения этих фильтров из скважин для ремонта. Изготовлять и устанавливать эти фильтры могут буровые мастера средней квалификации, что освобождает буровые организации от специального технического надзора.

Следует, однако, отметить, что сетчатые фильтры имеют и недостатки:

большие входные сопротивления, затрудняющие доступ воды в скважину;

непригодность для отбора воды из тонкозернистых песков (плывунов), так как при наличии мелких сеток наблюдается заклинивание проходных отверстий, резко повышающее входные сопротивления;

быстрое разрушение и кольматация их при использовании разноименных металлов (медь или латунь на стальной трубе) под влиянием электрохимической коррозии:

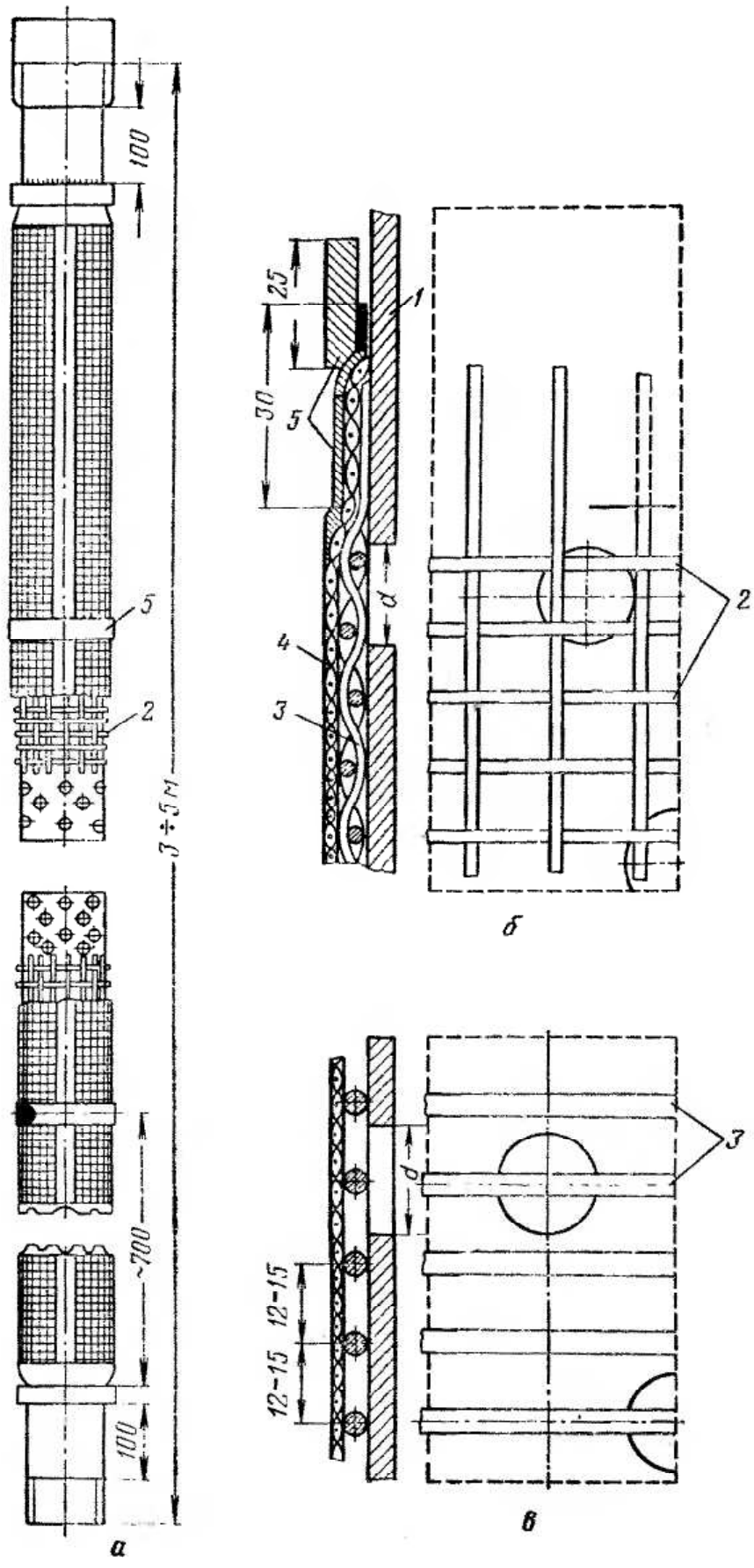


Рис. 3. Сетчатый фильтр:
а — общий вид фильтра; *б — в* — **детали фильтра**

необходимость применения для изготовления дефицитных материалов (медь, латунь, олово);

разрушение сеток в некоторых гидрохимических условиях под воздействием агрессивных вод;

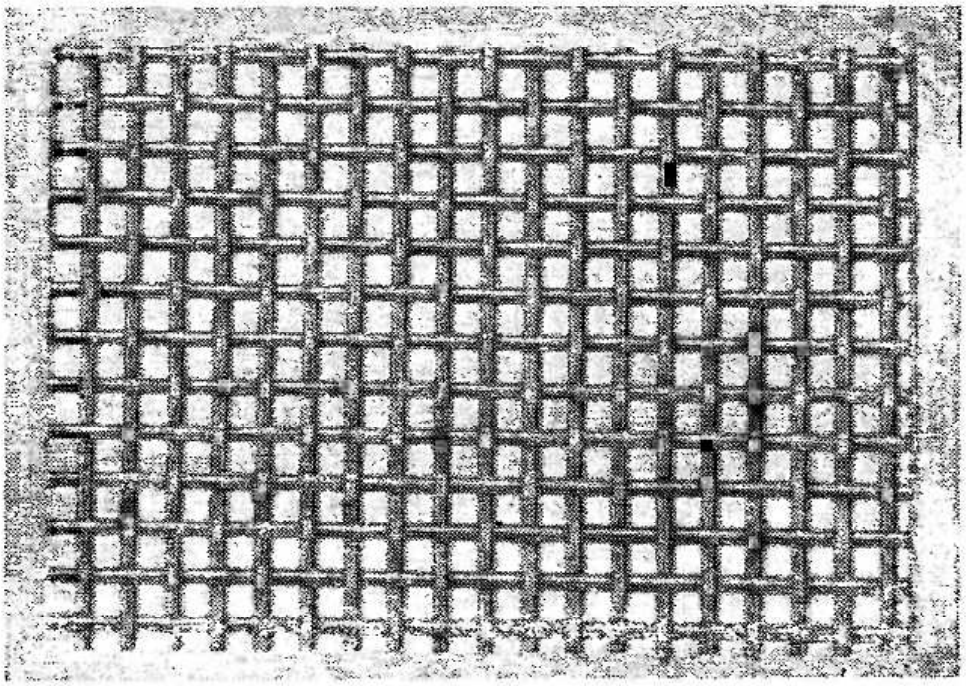


Рис. 4. Сетка квадратного плетения

резкое уменьшение производительности (часто в 2—3 раза за короткий период работы, иногда в течение первого года) при эксплуатации железистых и карбонатных вод, что вызывает необходимость ремонта фильтра или перебуривания скважин.

Часто сетчатые фильтры искусственно снижают эксплуатационные возможности водоносных горизонтов, что обусловливает малую производительность скважин.

Таким образом, можно сделать вывод, что сетчатые фильтры должны иметь ограниченную область применения, их следует использовать для временного водоснабжения и водопонижения или в таких гидрогеологических и гидрохимических условиях, где работа фильтров проверена практикой долголетней эксплуатации при малом водоотборе.

Наиболее распространены сетки, изготовляемые из цветных металлов (латуни, меди, реже бронзы). По типу плетения эти сетки подразделяются на квадратные, гладкие (галунные) и киперные.

Сетка квадратного (простого) плетения (рис. 4) состоит из проволок равного сечения (круглого или квадратного), переплетающихся под прямым углом. Эти сетки употребляются в фильтрах при добыче воды из крупнообломочных отложений (гравий, галька) или в качестве подкладочной (опорной) сетки при опайке фильтров тонкими сетками (табл. 3).

Таблица 3

Основные данные проволочных сеток квадратного плетения нормальной точности (ГОСТ 6613—73)

Номер сетки	Диаметр проволоки, мм	Число проволок на 26 мм сетки	Число ячеек на 1 см² сетки	Номинальный размер стороны ячейки в свету, мм	Сечение сетки, %	Масса 1 м² латунной сетки, кг
2,6	0,5	32,3	10,4	2,6	70,3	1,14
2,5	0,5	33,3	11,2	2,5	70	1,18
2	0,5	40	16	2	64	1,41
1,6	0,45	49	23,8	1,6	60,8	1,39
1,25	0,4	59	34,6	1,25	58,5	1,33
1	0,35	74	54,9	1	55	1,23
09	0,35	80	64	0,9	41,3	1,38
08	0,3	91	82,6	0,8	53	1,2
07	0,3	99	98	0,7	48	1,27
063	0,25	114	130	0,63	48	1
06	0,25	118	139	—	49,8	1,04
056	0,23	126,5	160	0,56	51	0,97
05	0,22	139	193	0,5	48,2	0,94
045	0,18	159	252	0,45	50,9	0,72
042	0,15	125.5	308	0,42	54	0,55
04	0,15	182	331	0,4	53	0,58
0355	0,15	200	400	0,355	49	0,63
0315	0,14	222	494	0,315	46	0,61
028	0,14	238	567	0,28	44,5	0,65
025	0,13	264	694	0,25	43,3	0,62
0224	0,13	278	763	0,224	40,8	0,66
02	0,13	303	918	0,2	36,7	0,72
018	0,13	323	1040	0,18	33,8	0,76
016	0,12	385	1480	0,16	32,7	0,72
015	0,1	400	1600	—	36	0,56
014	0,09	435	1890	0,14	38	0,56
0125	0,09	465	2130	0,125	33,8	0,54
0112	0,08	515	2630	0,112	34,7	0,46
0105	0,075	566	3140	—	37	0,43
01	0,07	588	3460	0,1	34,6	0,4

Гладкая (галунная) сетка (рис. 5) состоит из продольных проволок утолщенного сечения (основы) и поперечных тонких проволок (утка). В отличие от сеток квадратного плетения уток в сетках гладкого плетения состоит из проволок, плотно прижатых друг к другу, в результате чего отверстия принимают извилистую форму.

В практике водоснабжения обычно применяются гладкие сетки одинарного плетения. При выборе сеток важно знать номер, по которому ориентировочно судят о размерах проходных отверстий. Номер сеток определяют по числу проволок основы и утка. Например, галунная сетка, обозначенная 14/100, означает, что

основа этой ткани состоит из 14 проволок, а уток — из 100 проволок, приходящихся на 26 мм. Характеристики гладких сеток приведены в табл. 4 и 5.

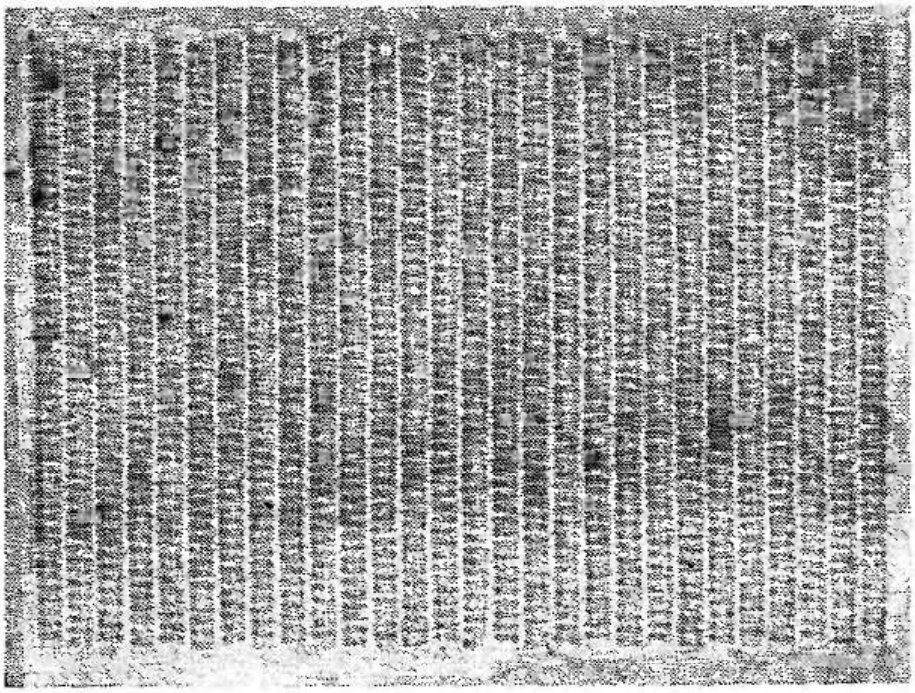


Рис. 5. Сетка гладкого (галунного) плетения

Таблица 4

Основные данные фильтровых сеток гладкого плетения (ВТУЭ 145—41)

Номер сетки	Номинальное число нитей на 26 мм		Диаметр проволок, мм		Размер ячейки, мм	Материал	Масса 1 м² сетки, кг
	основа	уток	основа	уток			
6/70	6	70	0,7	0,4	0,34	Л-68	3,79
7/70	7	70	0,6	0,4	0,34	Л-68	3,68
8/55	8	55	0,6	0,5	—	Л-68	4,46
8/70	8	70	0,6	0,4	—	Л-80	3,835
8/80	8	80	0,5	0,35	—	Л-80	3,3
10/70	10	70	0,5	0,4	0,32	Л-80	3,74
10/80	10	80	0,5	0,33	—	Л-80	3,05
10/90	10	90	0,45	0,3	0,27	Л-80	2,75
10/100	10	100	0,45	0,3	—	Л-80	2,68
12/90	12	90	0,45	0,3	0,27	Л-80	2,86
14/90	14	90	0,45	0,3	—	Л-80	3,1
14/100	14	100	0,45	0,28	0,23	Л-80	3,04
16/100	16	100	0,4	0,25	0,23	Л-80	2,825
18/130	18	130	0,32	0,22	0,17	Л-80	2,3
20/160	20	160	0,28	0,18	0,14	Л-80	2

Примечание. Сетка выпускается при ширине полотна от 500 до 1500 мм.

Таблица 5

Основные данные проволочных фильтровых сеток гладкого плетения (ГОСТ 3187—65)

Номер сетки	Номинальное число проволок на 26 мм		Номинальный диаметр проволоки, мм		Расчетная масса 1 м² сетки, кг
	основа	уток	основа	уток	
24	24	260	0,7	0,4	3,38
28	28	260	0,6	0,4	3,28
32	32	260	0,6	0,4	3,36
36	36	260	0,5	0,4	3,20
40	40	325	0,5	0,35	3,10
44	44	360	0,45	0,3	2,61
48	48	360	0,45	0,3	2,63
52	52	390	0,45	0,28	2,66
56	56	390	0,4	0,28	2,49
60	60	390	0,4	0,28	2,54
64	64	485	0,35	0,22	2,01
68	68	485	0,35	0,22	2,06
72	72	550	0,3	0,2	1,82
76	76	550	0,3	0,2	1,83
80	80	600	0,28	0,18	1,62
90	90	645	0,28	0,16	1,52
100	100	670	0,25	0,16	1,52
120	120	670	0,22	0,16	1,52
160	160	820	0,2	0,14	1,44
200	200	870	0,18	0,12	1,21

Примечание. По данному ГОСТу могут выпускаться сетки из меди, латуни, бронзы, нержавеющей стали и других материалов.

Применение разноименных металлов (меди и стали) в фильтрах неизбежно вызывает электрохимическую коррозию, что неблагоприятно отражается на их работе. Во избежание корозионных процессов, по предложению автора, сетки из нержавеющих сталей внедрялись и испытывались в фильтрах скважин на действующих промышленных водозаборах.

В бурении наиболее распространены гладкие сетки, применяемые для мелкозернистых и среднезернистых песков, и сетки квадратного плетения для песков разнозернистых и крупнозернистых. Сетки киперного плетения употребляются редко.

Отечественной промышленностью выпускается проволочная тканая сетка под названием «Семянка» (рис. 6), которую с успехом можно использовать в фильтрах водозаборных скважин (табл. 6) для установки в гравелистых породах или с контуром гравийной обсыпки в мелкозернистых породах.

Размер ячейки сетки «Семянка» определяют по формуле:

$$a = 100Kd/n,$$

где a — среднеарифметический размер ячейки; K — коэффициент, при определении размера по утку $K = 1$, при определении размера

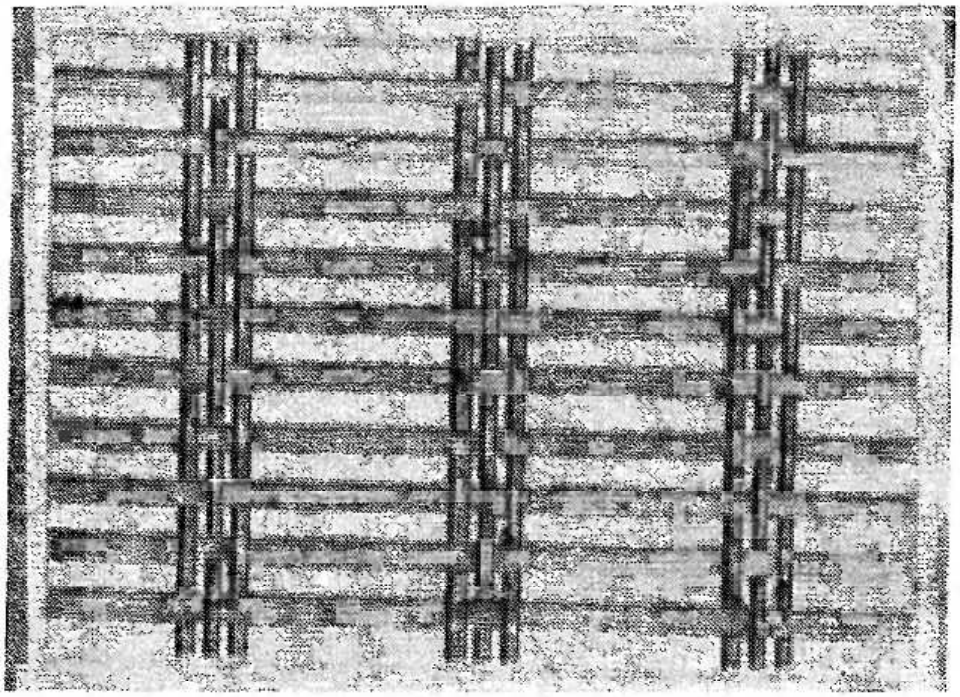


Рис. 6. Сетка проволочная «Семянка»

по основе $K = 3$; d — диаметр проволоки в мм; n — фактическое число ячеек на 26 мм.

Сетку «Семянка» изготовляют для сельскохозяйственных целей из проволоки низкоуглеродистой стали. Последняя может быть заменена нержавеющей сталью, тогда сетку можно применять

Таблица 6

Проволочная тканая сетка «Семянка» (тип — тяжелый) ГОСТ 3339—74

Номер сетки	Номинальные размеры ячейки между проволоками, мм		Номинальное число прядей проволок основы на 26 мм	Номинальное число проволок утка на 26 мм	Номинальный диаметр, мм		Скважность, %
	основа	уток			основа	уток	
22/2	22	2,3	4	23	0,8	2,0	46
18/2	18	2,2	5	25	0,8	1,8	43
16/2	16	1,8	5,5	30	0,8	1,6	39
14/2	14	1,6	6	33	0,7	1,4	39,4
12/2	12	1,6	7	33	0,7	1,4	38,8
12/1	12	1,4	7	38	0,6	1,2	40
10/1	10	1,4	8,5	38	0,6	1,2	40

в фильтрах буровых скважин, рассчитанных на длительную эксплуатацию. По ГОСТ предусматривается возможность изготовления сетки «Семянка» из других металлов.

Фильтры изготовляют на основе стержневых или трубчатых каркасов, на которые навивают проволоку, а затем натягивают сетку «Семянка». Поскольку проволока утка толстая и обладает большой жесткостью, при натягивании сетки на каркас фильтра необходимо проволоку утка располагать по образующей фильтра. На каркасе сетку сшивают.

Фильтры с сеткой «Семянка» были применены при оборудовании скважин на одном крупном водозаборе и зарекомендовали себя с положительной стороны. Сетку устанавливали в фильтрах с однослойным или двухслойным контуром гравийной обсыпки при диаметрах скважин 600—700 мм.

Проволочную подмотку на сетчатых фильтрах применяют для создания большого дренирующего эффекта общей рабочей поверхности. При натягивании сетки на трубчатый перфорированный каркас без проволочной подмотки обеспечивается фильтрация воды только на участках наложения сетки на проходные отверстия, в то время как остальная часть рабочей поверхности фильтра в отборе воды не участвует.

До недавнего времени для подмотки использовали простую стальную или оцинкованную проволоку диаметром 3—5 мм. Однако, как показал опыт, такая проволока быстро корродирует.

В связи с появлением новых синтетических материалов, кроме проволоки из нержавеющей стали, применяют хлорвиниловую проволоку, стальную проволоку с хлорвиниловым покрытием, резиновый шнур и др.

Крепление металлических сеток на опорных каркасах. При обтяжке металлических (стальных) каркасов фильтров (с круглой или щелевой перфорацией) сетки из меди, латуни и нержавеющей стали припаивают с использованием олова или сшивают.

При установке сетки необходимо следить за тем, чтобы проволока основы располагалась по окружности фильтра, а проволока утка — по образующей. При таком расположении сетки на каркасе гарантируется большая безопасность возможного раздвижения проволок утка сетки при спуске и обнажении фильтра. В практике, однако, часто применяют фильтры, опаянные сеткой с обратным расположением проволок основы и утка, причем опайка бывает двух видов. В первом случае при обтяжке каркаса сеткой один край ее припаивают к каркасу фильтра по образующей, а другой край припаивают на первый внахлестку с припуском сетки на 8—10 мм.

Шов при такой опайке получается шероховатым с различной толщиной слоя припоя по длине. В других случаях при соединении сеток вдоль швов накладывают пластинки из меди и латуни и припаивают их. Такой вид крепления сетки показан на рис. 3. В некоторых случаях при обтяжке фильтров сетки сшивают.

В последние годы для борьбы с электрохимической коррозией автором было предложено защищать стальные каркасы *1* антикоррозийными покрытиями. Для разобщения электрического поля, возникающего вследствие применения в фильтрах разноименных металлов (медь — железо), автором также было рекомендовано под латунные сетки *2* устанавливать перфорированные гофрированные сетки из винипласта *3* (рис. 7).

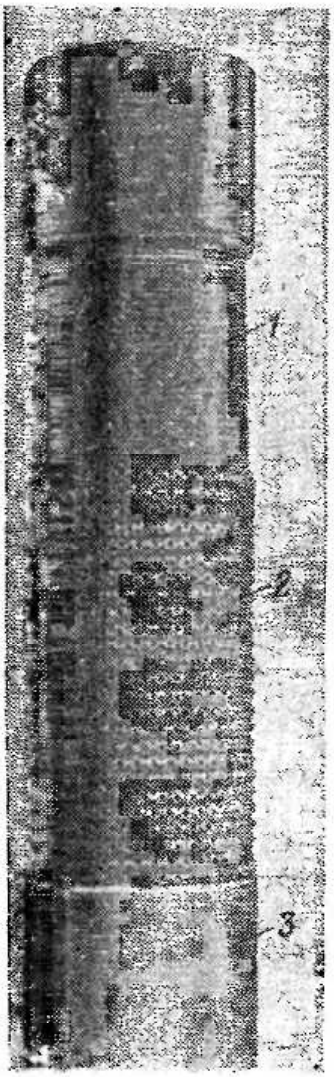


Рис. 7. Фильтр с перфорированной гофрированной сеткой из винипласта, установленной под латунную сетку

Натянутая на каркас гофрированная сетка из винипласта выполняет роль дренажа, поэтому в скважинах средних глубин отпадает необходимость в подмотке на каркас проволочной спирали.

Для закрепления латунной сетки на пластмассовой их можно спаять или сшить.

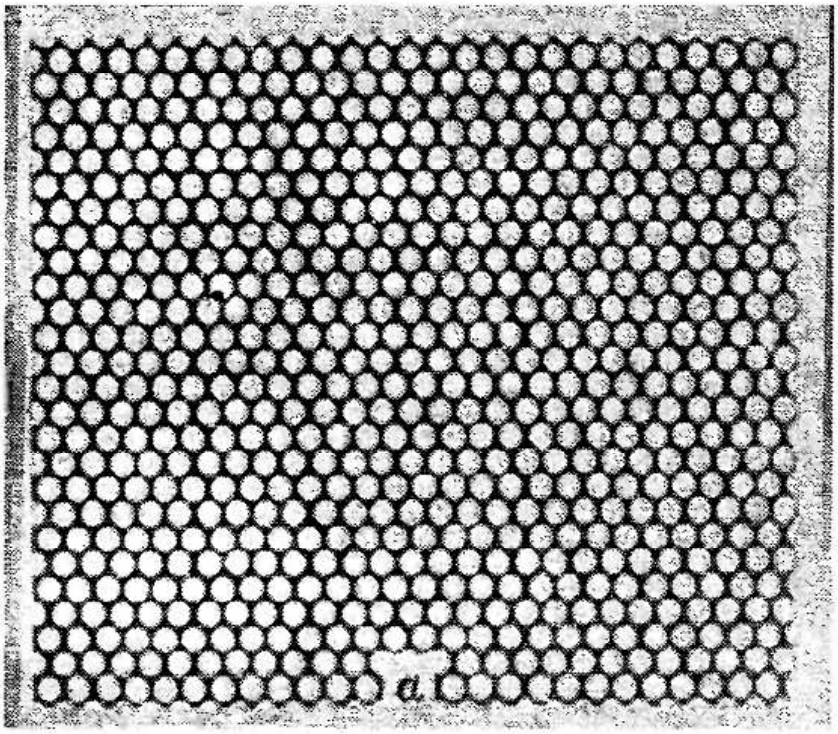
Для защиты от электрохимической и химической коррозий в зарубежной практике в фильтрах фирмы «Хагуста» (ФРГ) применяют простые стальные сетки галунного плетения, имеющие плотное резиновое покрытие (типа эбонита), которое наносится на проволоку основы и утка электрофоретическим способом, причем покрывается не каждая проволока в отдельности, а все сотканное полотно.

Фильтры с сетками из пластических масс

Металлические сетки из меди и латуни, а также сетки из менее дефицитных и достаточно устойчивых антикоррозийных материалов можно заменять сетками из пластических масс, вырабатываемых на основе поливинилхлорида. В отечественной промышленности этот термопластический материал получил наименование винипласта.

В настоящее время применяются сетки из винипласта двух видов: штампованные с круглыми и плетеные с квадратными отверстиями. Штампованные сетки выпускают простые и гофрированные (рис. 8).

Эти сетки изготовляются химической промышленностью для аккумуляторов и употребляются в качестве прокладок сепараторов. В номенклатуре химических товаров она именуется как пленка перфорированная из винипласта (ГОСТ 15976—70):



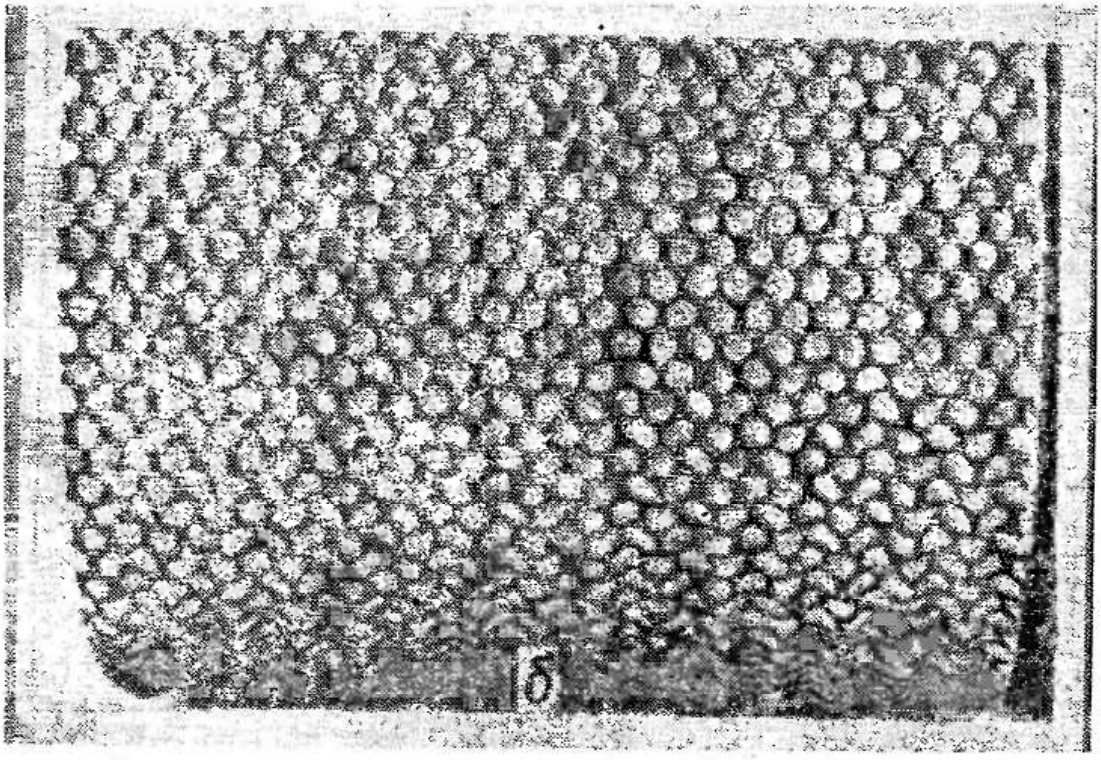


Рис. 8. Штампованные сетки из пластических масс:
а — простая с диаметром отверстий 2,8 мм, *б* — гофрированная

Ширина полотна, мм	400—600
Толщина, мм	0,5—0,75
Диаметр отверстий, мм	2,8
Скважность, %	54—55
Масса 1 м² сетки, г	380—400
Стоимость 1 кг, руб	1,15

1 кг сетки покрывает площадь около 2,5 м², а стоимость 1 м² составляет около 0,46 руб. вместо 5—8 руб. за 1 м² медной сетки.

Для фильтров целесообразнее применять гофрированную сетку, так как ее поверхность будет способствовать улучшению сводообразования породы, прилегающей к фильтру, и пропуску воды

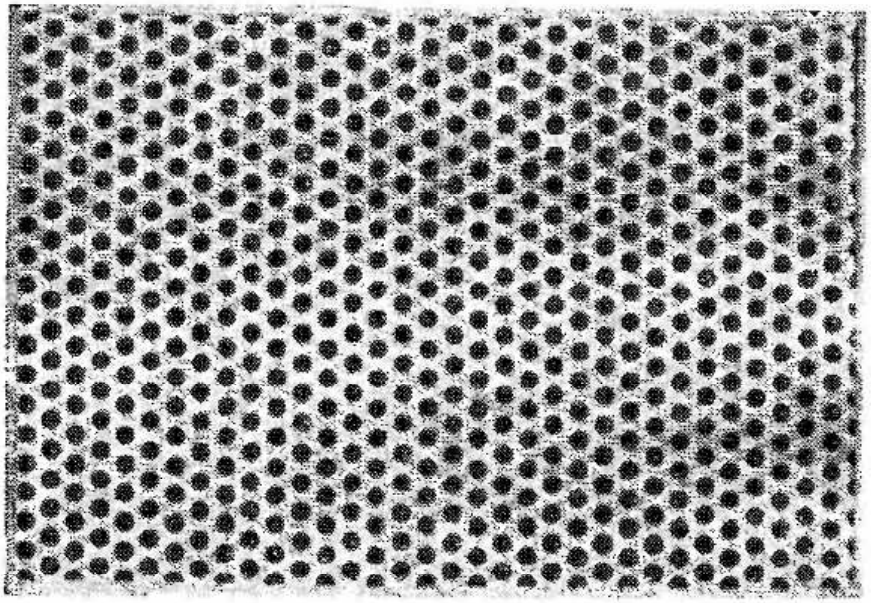


Рис. 9. Сетка из винипласта с отверстиями 1,2 мм

к проходным щелям опорного каркаса. В гофрированных сетках высота гофра достигает 1,8 и 2,5 мм при шаге соответственно 5 и 6 мм.

К недостаткам выпускаемых сеток следует отнести слишком большой размер проходных отверстий (2,8 мм), что затрудняет их применение в мелкозернистых и среднезернистых песках.

Указанные сетки на первом этапе внедрения использовали в качестве фильтрующего покрытия при отборе воды из гравелистых песков, а также при устройстве фильтров в мелкозернистых песках с гравийной обсыпкой. Фильтры такой конструкции применяли при оборудовании водозаборных и водопонизительных скважин. По предложению автора, с 1952 г. гофрированные сетки в качестве подкладочных применялись в фильтрах из стеклоткани в скважинах пьезометрической наблюдательной сети Гидропроектом, Всесоюзным гидрогеологическим трестом, трестом Гидроспецстрой [29].

Выпускались сетки и других размеров с отверстиями диаметром 1 мм. Было и кустарное производство сеток с меньшим размером отверстий. Например, в тресте Гидроспецстрой изготовляли сетки с отверстиями диаметром 1,2 мм при скважности около 15% (рис. 9). Фильтры с сетками из пластмасс применялись Гидроспецстроем в водопонизительных скважинах в районах строительства Киевской и Плявиньской ГЭС и др.

Для отбора воды из мелкозернистых песков фильтры обсыпали крупнозернистым речным песком.

В ФРГ выпускают сетки тканые из отдельных проволок, что позволяет получать размер отверстий широкого диапазона. Такие

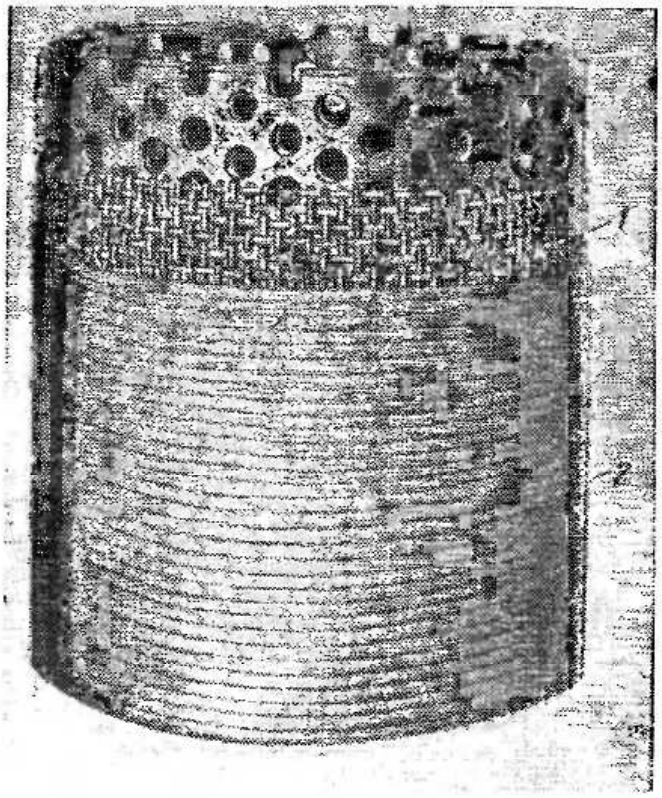


Рис. 10. Фильтр с подкладочной *1* и фильтровальной *2* сетками из пластических масс

сетки применяются в виде самостоятельных водоприемных покрытий или в качестве вспомогательных в фильтрах кожухового типа, а также для разделения обсыпок при устройстве двухслойных и трехслойных фильтров.

Сетки квадратного плетения из пластмасс изготовляют аналогично металлическим сеткам на ткацких станках. Более частые сетки употребляют в качестве фильтрующей покровной ткани, а более крупные (редкие) — в качестве подкладочной (рис. 10).

В настоящее время фирма «Саран» (ФРГ) выпускает сетки квадратного плетения из сарана, полиэтилена и полистерола. Их технические характеристики приведены в табл. 7.

Таблица 7

Ткани для фильтров из синтетических материалов, выпускаемых фирмой «Саран»

Номер сетки	Масса 1 м², г	Толщина нити, мм	Размер отверстия (сита), мм
85/0,16	330	0,16	0,15
50/0,23	350	0,23	0,29
35/0,23	240	0,23	0,51
28/0,30	320	0,30	0,63
28/0,38	460	0,38	0,55
24/0,38	420	0,38	0,70
20/0,30	240	0,30	1,00
16/0,38	290	0,38	1,25
10/0,60	470	0,60	2,00
8/0,90	700	0,90	2,35
5/1,50	1100	1,50	4,00

Примечание. Нормальная ширина 100 см, другая ширина может быть выполнена по требованию заказчика; допускается отклонение от номинальной ширины — 1 см.

В последние годы в СССР и за рубежом начали выпускать сепараторную сетку из поливинилхлорида, получаемую методом просечки-вытяжки. При производстве сетки методом просечки-вытяжки нет отходов, а вытяжка ее позволяет из 1 м² поливинил-

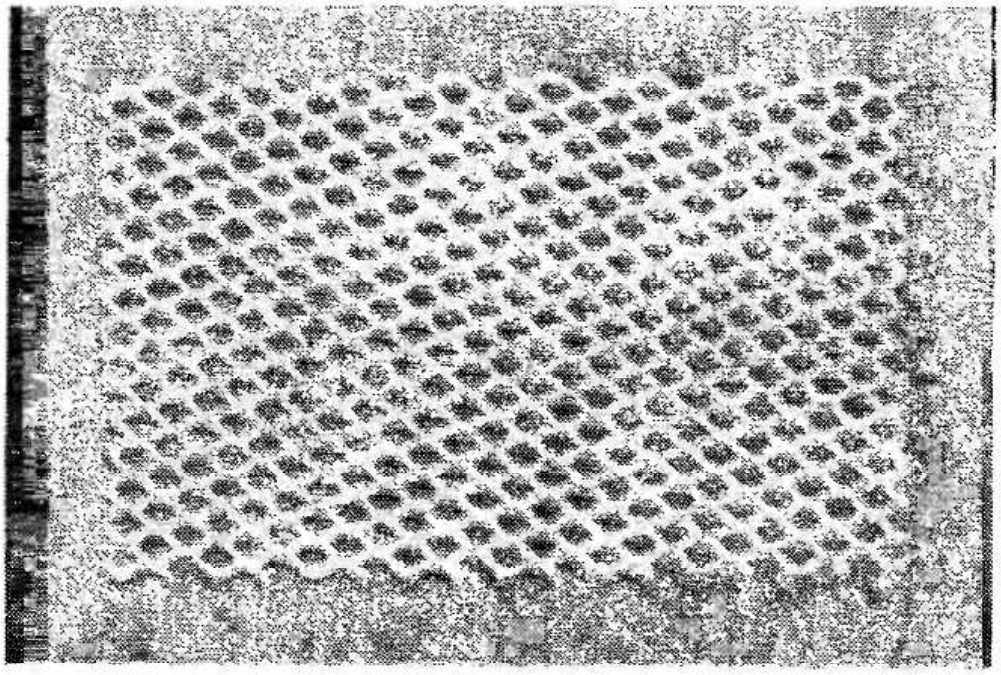


Рис. 11. Сетка из поливинилхлорида, полученная по методу просечки-вытяжки

хлоридной пленки получить сетку площадью 2—2,2 м², что значительно снижает ее стоимость. Технология изготовления таких

сеток позволяет получать отверстия различных размеров при скважности в диапазоне от 10 до 85%.

На рис. 11 изображена просечная сетка со следующими показателями: толщина 1,43 мм, ромбические отверстия с диагоналями 7 и 1,45 мм, скважность 50%. Такие сетки могут применяться в конструкциях фильтров в качестве подкладочной сетки или при устройстве кожуховых гравийных фильтров.

Каркасом фильтров с сетками из пластических масс могут служить металлические, асбестоцементные, пластмассовые, деревянные и другие трубы. Металлические и асбестоцементные дырчатые трубы для предохранения от коррозии целесообразно перед натягиванием на них сеток покрывать асфальтовым или перхлорвиниловым и другими лаками.

Сетки из пластических масс на каркасах с широкими проходными отверстиями не обладают достаточной механической прочностью и способны втягиваться и продавливаться в отверстия под давлением. Поэтому в трубах необходимо либо сверлить или фрезеровать отверстия диаметром не более 7—8 мм, либо сетку наматывать в два или три слоя для повышения механической прочности ее при продавливании.

Двухслойную намотку сетки можно рекомендовать также и для уменьшения просвета проходных отверстий; при наложении сетки в несколько слоев происходит смещение отверстий.

При оборудовании фильтра сеткой в два слоя ее наматывают под углом 35—40° к оси трубы непрерывной лентой (как при бинтовании). По мере намотки во избежание раскручивания сетку привязывают к трубе шпагатом или мягкой вязальной проволокой.

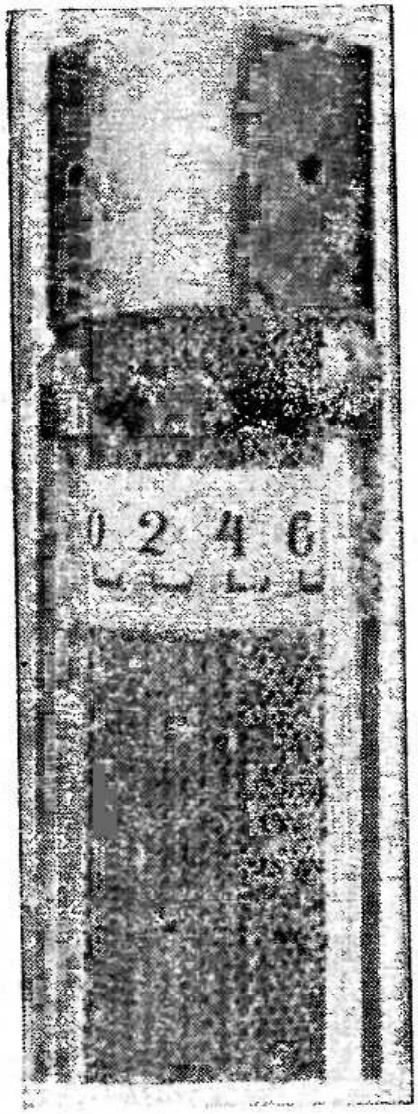


Рис. 12. Фильтры с сетками из пластмасс в два слоя с направляющими планками

Сетка из винипласта крепится на трубах следующим образом: вдоль каркаса трубы по образующей или по линии намотки сетки под углом очищают от ржавчины узкую полоску шириной 10—15 мм, после чего протирают чистой тряпкой или ватой, смоченной бензином. На очищенную поверхность кисточкой наносят слой универсального клея. Нанесенный на трубу клей на воздухе полимеризуется через 20—30 мин. Один край сетки из пластических масс приклеивают к шву, а другим огибают трубу и обре-

зают с запасом 1—1,5 см для наклейки внахлестку. Второй край сетки наклеивают на первый через несколько часов. На время высыхания клея сетку обматывают витками проволоки или шпагата, которые через сутки после высыхания клея снимают.

После обтяжки фильтра сеткой из пластических масс по образующей фильтра укрепляют проволокой три — четыре деревянные рейки для предохранения ткани от повреждения при спуске фильтра и его обнажении (рис. 12).

При устройстве скважин в мелкозернистых песках глубиной до 20—30 м можно использовать сетчатые фильтры из пластических масс, применяя одновременно обсыпку из мелкого гравия. Для этого необходимо пробурить скважину конечным диаметром 150 мм и установить фильтр диаметром 62—75 мм; пространство между фильтром и трубой во время подъема обсадных труб следует засыпать мелким гравием.

Сетки из пластических масс в скважинах для водоснабжения начали применять в 1948 г. Позднее эти сетки применялись трестом Союзшахтоосушение при устройстве фильтров для водопонижения при проходке шахтных стволов. В дальнейшем сетки из пластических масс использовались Всесоюзным гидрогеологическим трестом б. Министерства геологии и охраны недр СССР для оборудования скважин режимной сети и во ВНИИ ВОДГЕО для оборудования пьезометров на некоторых объектах гидротехнического строительства.

Сетки из винипласта применялись экспедициями Мосгидэпа при изысканиях на р. Ангаре для фильтров в скважинах режимной сети, Волжской экспедицией — при оборудовании наблюдательных скважин в крупнозернистых песках без обсыпки, а также среднезернистых с применением гравийной обсыпки. Известно также использование сеток из винипласта при устройстве водозаборных скважин для сельскохозяйственного водоснабжения в Центральной черноземной области.

На водозаборе предприятий химической промышленности в г. Воронеже стальные фильтры с латунными сетками при эксплуатации агрессивных вод выходили из строя через 5—6 месяцев. Каркасы фильтров, выполняемые из полиэтиленовых труб с сетками из винипласта и с контуром гравийной обсыпки в данных условиях успешно работали в течение ряда лет.

Очередными задачами в дальнейшем использовании сеток из пластических масс для фильтров являются:

организация выпуска сеток из пластических масс с отверстиями различных диаметром;

расширение области применения сеток из пластических масс в скважинах режимных наблюдений, в неглубоких скважинах, предназначенных для водоснабжения и использующих подземные воды, которые характеризуются большой минерализацией и агрессивностью.

§ 3. ФИЛЬТРЫ ИЗ ШТАМПОВАННЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время штампованные листовые материалы в конструкциях фильтров могут применяться в качестве водоприемных поверхностей в сочетании с опорными каркасами (трубчатыми, стержневыми) либо в качестве самостоятельных конструкций, в которых водоприемная поверхность и каркас совмещены и составляют одно целое.

Отечественной промышленностью освоены и широко используются изделия из штампованных листовых материалов. Применение тонких листовых штампованных материалов в конструкциях

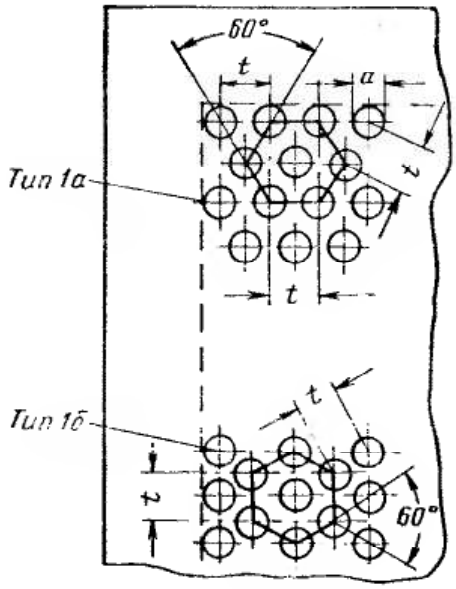


Рис. 13. Штампованный лист с круглыми проходными отверстиями

a — диаметр отверстия; t — расстояние между центрами отверстий

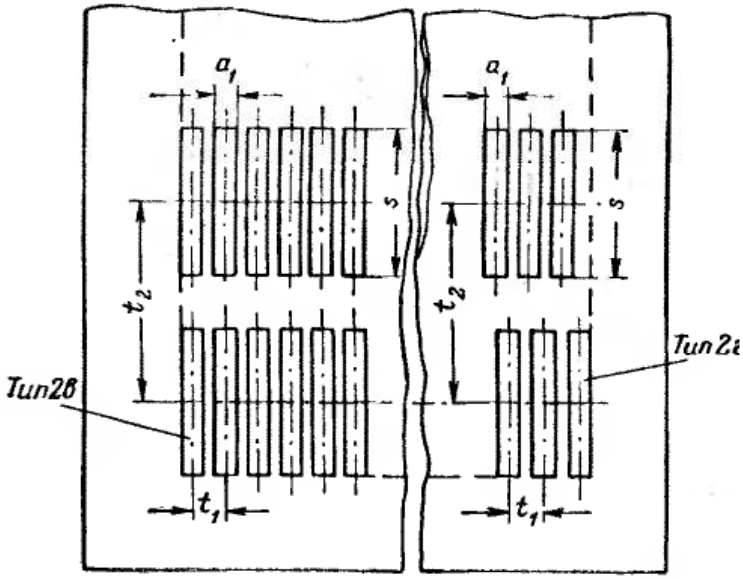


Рис. 14. Штампованный лист с прямоугольными проходными отверстиями, расположенными поясами

a_1 — ширина отверстия; S — длина отверстия; t_1 и t_2 — расстояние между центрами отверстий соответственно по горизонтали и вертикали

фильтров позволит в большинстве случаев отказаться от цельнотянутых стальных труб и перейти к изготовлению каркасов из арматурной стали, в результате чего снизится металлоемкость и масса конструкции.

Харьковский завод им. М. В. Фрунзе выпускает штампованный листовой материал с проходными отверстиями любой заранее заданной формы из простой стали, латуни, нержавеющей стали, оцинкованного железа и др. Листы с просечными круглыми отверстиями, показанные на рис. 13, изготовляются согласно ГОСТ 214—70. Диаметр отверстий изменяется от 0,7 до 45 мм при скважности от 17 до 68%.

При использовании перфорированного листа в качестве водоприемной поверхности фильтров наиболее предпочтительными будут отверстия диаметром от 0,7 до 5 мм (табл. 8).

Таблица 8

Решетные полотна типа 1 (исполнения *а* и *б*) ГОСТ 214—70

Номер полотна	Номинальный рабочий размер отверстия *а* (предпочтительный)		Предельные отклонения рабочего размера		Средний шаг *t*		Относительное сечение (среднее расчетное)	Толщина полотна
	первого порядка	второго порядка	для 90% отверстий одного полотна	для остальных 10% отверстий того же полотна	номинальный	предельное отклонение		
07	0,7		±0,035	±0,055	1,6	±0,15	0,17	0,5—0,7
08	0,8						0,23	
09	0,9				1,9		0,20	
10	1,0						0,25	
11	1,1		±0,04	±0,06	2,2	±0,20	0,23	0,5—0,8
12	1,2						0,27	
13	1,3				2,5		0,24	
14	1,4						0,28	
15	1,5				2,8		0,26	
16	1,6						0,30	
17	1,7				3,1		0,27	0,8—1,0
18	1,8						0,31	
19	1,9				3,4		0,28	
20	2,0						0,31	
21	2,1				3,6		0,31	
22	2,2						0,34	
24		2,4	±0,06	±0,09	4,0	±0,24	0,33	1,0—1,2
25	2,5						0,35	
26		2,6			4,5		0,30	
28	2,8						0,35	
30		3,0	±0,08	±0,12	5,2		0,40	
32	3,2						0,34	
34		3,4					0,39	
36	3,6						0,43	
38		3,8			6,0		0,36	
40	4,0						0,40	
42		4,2					0,44	
45	4,5				7,0		0,37	
48	4,8						0,43	
50	5,0						0,46	

Примечание. Размеры даны в мм.

Прямоугольные отверстия просечного листа, расположенные полосами или в шахматном порядке, имеют ширину от 0,5 до 18 мм, длину от 8 до 50 мм при скважности от 17 до 67% (рис. 14). При использовании листа для водоприемной поверхности фильтра возможна ширина проходных отверстий от 0,5 до 5 мм.

Просечной лист с другой формой отверстий выпускается согласно ОСТ 23-2-405—72 (табл. 9).

При изготовлении штампованного листа из нержавеющей стали толщиной 1 мм с щелями размером 2 × 15 мм была получена скважность 20%, а при размере щели 5 × 25 мм она достигала 35%. Между отверстиями по продольной оси может быть

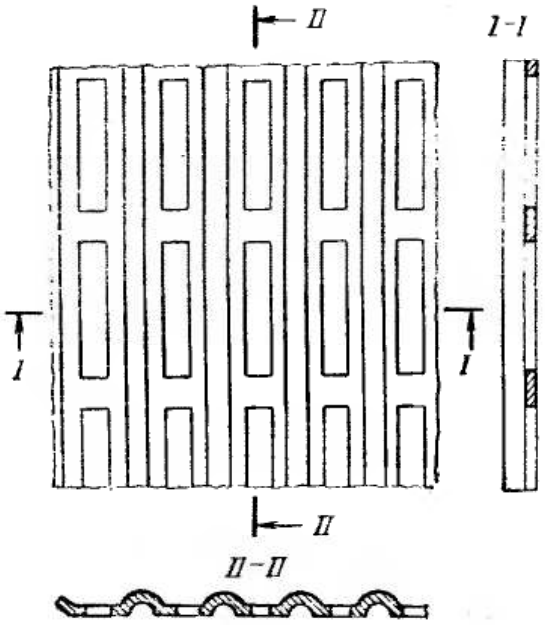


Рис. 15. Штампованный лист с прямоугольными отверстиями и продольными ребрами жесткости

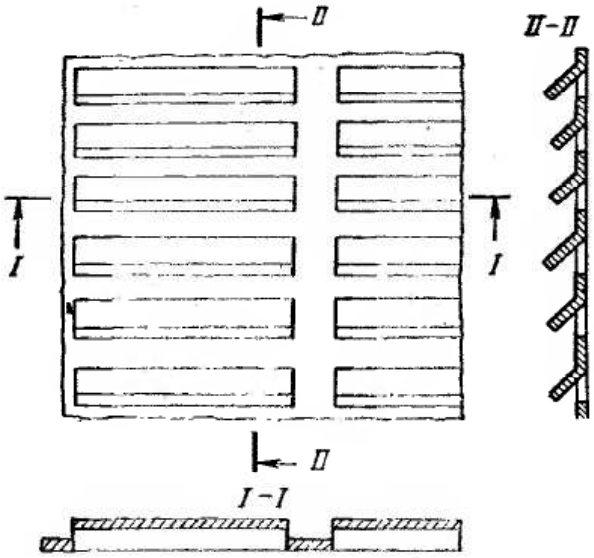


Рис. 16. Штампованный лист с прямоугольными отверстиями и нависающими над ними козырьками

создан гофр (рис. 15), который придает листу большую жесткость в продольном направлении.

Прямоугольные отверстия могут быть также с нависающими козырьками (рис. 16), которые создают благоприятные условия для образования гравийной обсыпки на контуре фильтра.

Процесс изготовления фильтров с применением листовых штампованных материалов прост: листы сворачивают в цилиндры по диаметру опорных каркасов и прикрепляют к ним с помощью заклепок или сваркой.

Наиболее перспективным материалом следует считать листовую нержавеющую сталь толщиной 0,8—1 мм, которая отличается коррозионной устойчивостью и не требует особых защитных покрытий.

Фильтры со штампованной водоприемной поверхностью на основе стержневых каркасов рекомендуется устанавливать в скважинах глубиной до 200 м. Глубина установки фильтров на основе каркаса из стальной буровой трубы практически не ограничена.

Таблица 9

Решетные полотна типа 2 (исполнения *в* и *г*)

Номер полотна	Номинальный размер отверстий a_1 (предпочтительный)		Предельные отклонения размера		Длина отверстия s		Средний шаг t_1		Средний шаг t_2		Относительное живое сечение (среднее расчетное)	Толщина полотна
	первого порядка	второго порядка	для 90% отверстий одного полотна	для остальных 10% отверстий того же полотна	номинальная	предельное отклонение	номинальный	предельное отклонение	номинальный	предельное отклонение		
05	0,5		±0,030	±0,045	8	±0,18	2,0	±0,15	12	±0,35	0,17	0,5—
06	0,6										0,20	0,7
07	0,7		±0,035	±0,055	10		2,2	±0,20	14		0,23	0,5—
08	0,8										0,26	0,8
09	0,9						2,5				0,26	
10	1,0										0,29	
11	1,1		±0,04	±0,06	12	±0,22	2,8		17		0,28	0,8—
12	1,2										0,30	1,0
13	1,3						3,1				0,30	
14	1,4										0,32	
15	1,5						3,4				0,31	
16	1,6										0,33	
17		1,7			16		3,6	±0,24	21		0,36	1,0—
18	1,8										0,38	1,2
19		1,9									0,37	
20	2,0						3,9				0,39	
21		2,1									0,38	
22	2,2						4,2				0,40	
24		2,4	±0,06	±0,09	20	±0,26	4,5		25	±0,42	0,43	
25	2,5										0,44	
26		2,6									0,40	
28	2,8						5,2				0,43	
30		3,0									0,46	
32	3,2		±0,08	±0,12	25		6,0		30		0,44	1,0—
34		3,4									0,47	1,4
36	3,6										0,50	
38		3,8					7,0				0,45	
40	4,0										0,48	
42		4,2									0,50	
45	4,5							±0,29			0,47	
48		4,8			32		8,0		38		0,51	
50	5,0										0,53	

Примечание. Размеры даны в мм.

Достоинствами штампованных фильтров являются простота изготовления и точное положение щелей на водоприемной поверхности, что имеет большое значение в связи с опасностью их смещения при спуске в скважину. Кроме того, освоен серийный выпуск этих фильтров. К недостаткам штампованных фильтров относятся: небольшой процент скважности (значительно меньший, чем у каркасно-проволочных фильтров), наличие острых кромок в проходных отверстиях (вызывающее повышенное сопротивление фильтров вследствие сжатия струи при входе воды в фильтр) и относительно небольшая толщина фильтрующей поверхности — 0,8—1 мм, т. е. отсутствие запаса прочности на случай коррозионного разрушения.

При штамповке нержавеющего листа толщиной 0,8—1 мм минимальная ширина щели составляет 1,5 мм. Следовательно, такие фильтры можно устанавливать без обсыпки в крупнозернистых и гравелистых песках. В мелкозернистых и тонкозернистых песках необходима обсыпка, которую для глубоких скважин можно выполнять с применением кожухов, а в неглубоких гравий засыпается непосредственно в скважины.

Так как жесткость фильтров из штампованного металлического листа недостаточна, их применяют в комбинации с опорными каркасами из стальных стержней или перфорированных труб. В этих конструкциях штампованный лист свальцовывают и укрепляют на каркасе заклепками или сваркой.

Штампованный лист из нержавеющей стали на трубчатых щелевых каркасах применяют в тресте Союзшахтоосушение. Изготовляют эти фильтры на ремонтно-механической базе в Туле. В отличие от просечного листа, изготовляемого на заводе в Харькове, лист штампуется по принципу просечки-вытяжки. В этом процессе лист просекается по длине заданного отверстия и края отгибаются на требуемую ширину щели. Такая технология позволяет просекать щели в широком диапазоне диаметров.

В настоящее время на Тульской базе изготовляется просечной лист пяти основных размеров с шириной щели соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 мм.

Просечной лист на стержневых каркасах показан на рис. 17.

В последние годы ВСЕГИНГЕО Министерства геологии СССР рекомендует применять фильтр с водоприемной поверхностью из просечного листа с проходными конусными отверстиями (ФКО) [83]. Такая конструкция фильтра была предложена в Новочеркасском инженерно-мелиоративном институте в 1949 г. В качестве заменителя тканых сеток были применены штампованные сетки из тонкой листовой простой и нержавеющей стали с конусными отверстиями, края которых имеют заусеницы, обращенные к породе-песку. Отверстия выполнены в виде конусов трапецеидального сечения, обращенных большим основанием внутрь опорного каркаса (трубы).

Такая форма отверстий с заусеницами, по мнению автора, должна способствовать образованию над ними устойчивых сводов из крупных песчинок, преграждающих путь более мелким. Лабораторные испытания фильтров этой конструкции в рыхлых песках установили длительное пескование, и конструкция была забыта. Спустя 18 лет аналогичная конструкция была предложена

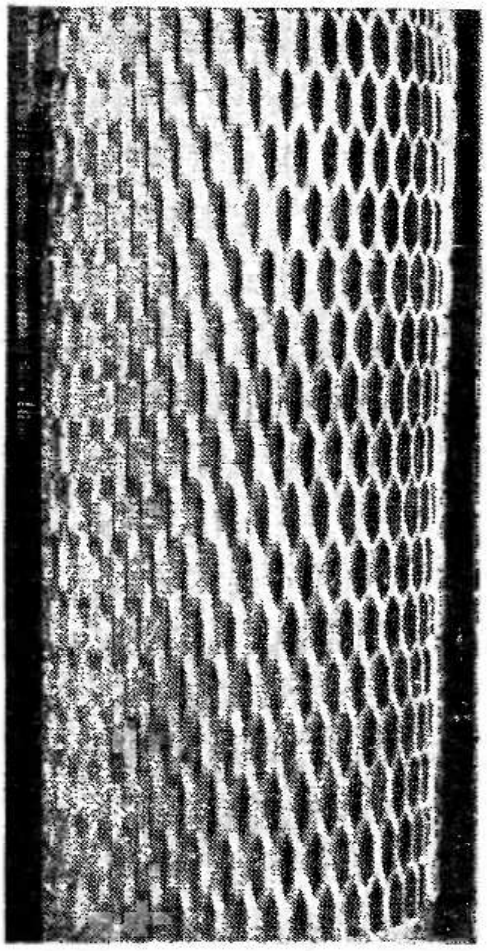


Рис. 17. Фильтр с просечным листом на стержневых каркасах

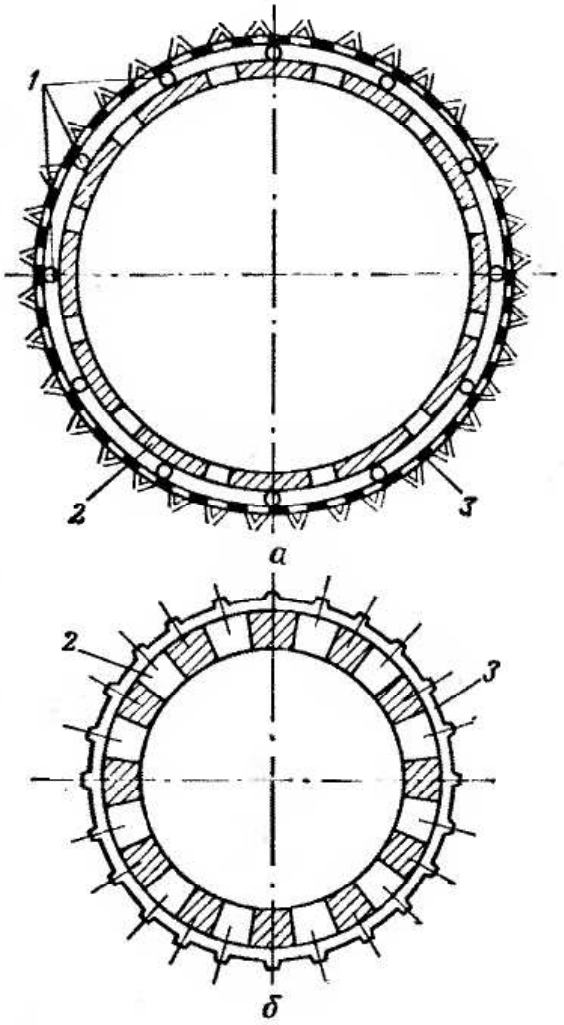


Рис. 18. Конструкции фильтров с просечными конусными отверстиями:
а — В. Г. Ильина; *б* — И. Д. Куликова; *1* — подкладная проволока; *2* — опорный трубный каркас; *3* — водоприемная поверхность из просечного листа

в Тульской комплексной геологической экспедиции и признана изобретением. По поручению Министерства геологии СССР фильтры ФКО исследованы институтом ВСЕГИНГЕО.

Конструкции фильтров с конусными просечными отверстиями, предложенные в 1949 и 1967 гг., представлены на рис. 18.

Согласно рекомендации этого института, для отбора воды из песков различного гранулометрического состава фильтры с коническими отверстиями делятся на три группы с параметрами, которые выбираются согласно данным табл. 10.

Таблица 10

Подбор фильтров ФКО в зависимости от гранулометрического состава пород

Состав пород	Диаметр отверстия конуса, мм	Высота конуса, мм
Пески пылеватые мелкозернистые ($d_{50} < 0{,}1$ мм)	1	2,5—3
Пески мелкозернистые ($d_{50} = 0{,}1 \div 0{,}25$ мм)	1,2—1,5	3,0—3,5
Пески среднезернистые ($d_{50} = 0{,}25 \div 0{,}5$ мм)	1,5—2,0	3,0—3,5

В соответствии с рекомендациями в лабораторных и опытно-промышленных испытаниях применяли штампованные оболочки (сетки). Характеристика их приведена в табл. 11.

Таблица 11

Зависимость скважности просечных оболочек фильтров ФКО от диаметра отверстий и расстояния между ними

Номер модели	Диаметр отверстий, мм	Шаг между отверстиями, мм	Скважность фильтрующей оболочки, %
1	0,8	10 × 10	0,4
2	1,5	6 × 6	5,0
3	1,5	7 × 7	3,8
4	1,5	8 × 8	2,76
5	1,5	10 × 10	1,8
6	1,5	15 × 15	0,9
7	1,5	20 × 20	0,5
8	2,0	6 × 6	8,8
9	2,0	8 × 8	5,1
10	2,0	10 × 10	3,1
11	2,5	10 × 10	5,3
12	2,5	15 × 15	2,4

Фильтры ФКО рекомендуется устанавливать для отбора воды из мелкозернистых и тонкозернистых песков без применения гравийной обсыпки.

Просмотр материалов, собранных ВСЕГИНГЕО по работе фильтров в разведочных и эксплуатационных скважинах, а также данные лабораторных исследований позволили установить, что при откачках из песков, представленных рыхлыми отложениями, наблюдается длительное пескование скважин.

В сцементированных песках после выноса некоторого объема работа фильтров стабилизируется, а в других случаях после включения насосов под действием гидроудара пескование вновь возобновляется.

По данным ВСЕГИНГЕО (1971 г.) и другим материалам, при установке фильтров ФКО на ряде объектов скважины пескуют и выводят из строя погружные насосы. Так, при оборудовании водопонизительных скважин фильтрами ФКО на объектах строительства Московского метрополитена происходило такое обильное пескование, что строители были вынуждены отказаться от ФКО. В связи с этим, согласно сообщениям Метрогипротранса, фильтры ФКО стали применять только при гравийной обсыпке, что противоречит основным принципам устройства этого фильтра.

Пескование скважин является главным недостатком фильтров ФКО. Например, испытание фильтров, проведенное ВСЕГИНГЕО в 1968—1971 гг. на стационаре в Щемилово, позволило установить, что ФКО не имеют преимуществ перед сетчатыми фильтрами. В мелкозернистых песках производительность фильтров ФКО и сетчатых одинакова при равных коэффициентах сопротивления. В среднезернистых песках удельные дебиты и водозахватная способность ФКО более низкие, чем сетчатых фильтров.

Пескование скважин, по данным ВСЕГИНГЕО, отмечается по большому числу объектов. Например, при установке фильтров в Новосибирском ТГУ, на Эдвинском и Болотинском участках отмечается не только пескование, но и меньшая производительность скважин по сравнению со скважинами, оборудованными сетчатыми фильтрами.

В процессе испытания различных конструкций фильтров в глубоких скважинах (362 м) Красноярской ГПП ЗСГУ было установлено, что при отборе воды из мелкозернистых песков при равных длинах фильтров дебит скважины, оборудованной ФКО, составлял 1 л/с, а скважины с фильтром из перфорированной трубы с отверстиями 10 мм — 3,9 л/с.

Испытания ФКО на предприятиях Узбекистана установили, что дебит скважин с гравийными фильтрами кожухового типа более чем в 2 раза превосходит дебит скважин, оборудованных ФКО. По этим данным во ВСЕГИНГЕО сделан вывод, что в среднезернистых песках производительность ФКО меньше гравийно-кожуховых фильтров.

На участке Даугавпилс, где вскрываются мелкозернистые пески с прослоями алеврита, в скважинах с фильтрами ФКО отмечался непрекращающийся вынос песка, а дебит этих скважин был в 2—5 раз ниже, чем скважин с фильтрами других конструкций.

Испытание фильтров ФКО, проведенное на Тогускейнском и Чуйском участках в Казахстане, где водоносные горизонты представлены песками с прослоями песчаников и при выносе песка могли образовываться бесфильтровые скважины, ФКО работали удовлетворительно.

Более эффективна работа ФКО в скважинах, вскрывающих уплотненные, слабосцементированные пески, песчаники, алевриты, после выноса некоторого объема песка. Это позволяет предполо-

жить, что скважины, оборудованные ФКО, работают как бесфильтровые и в этих условиях величина скважности и размер проходных отверстий фильтров существенного значения не имеют. Но из приведенного вывода следует, что в данных условиях могут успешно работать фильтры других конструкций, а это отвергает универсальность ФКО.

В сцементированных песках после образования каверны вокруг фильтрового каркаса размер отверстий и процент скважности существенного значения не имеют и в данных условиях с равным

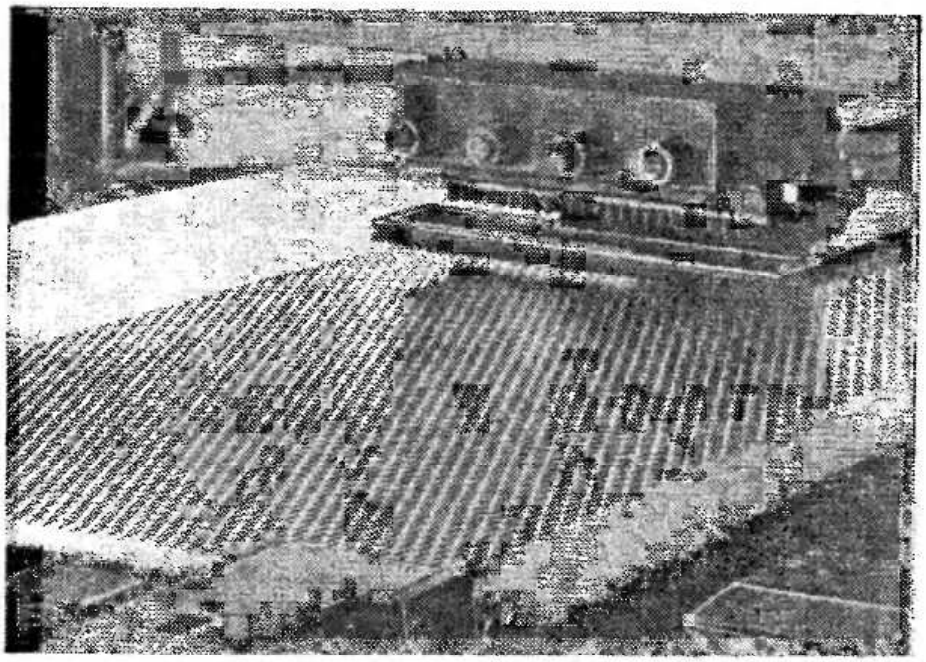


Рис. 19. Установка для изготовления просечного листа с отверстиями открытого типа и типа «мост»

успехом могут работать водоприемные поверхности с другой формой просечки и диаметром перфорации. Наконец, конструкция фильтра из просечного листа при малой скважности и несовершенной форме проходных отверстий находится в явном противоречии с современными представлениями в области гидравлики, гидродинамики и гидрохимии. В результате опыта эксплуатации установлено, что все конструкции фильтров зарастают и кольматируются во времени и чем меньше скважность и размер отверстий, тем быстрее наступает зарастание фильтров.

В настоящее время исследованиями установлено, что фильтры зарастают при скважности до 30—35% при диаметрах отверстий до 25 мм. Поэтому невольно возникает вопрос, а сколько времени будут работать фильтры при скважности 0,4—8,8% и диаметре отверстий 0,8—2,5 мм, если еще учесть сокращение процента скважности под влиянием отложения частиц пород в проходных отверстиях.

Форма входных отверстий, обращенных меньшим основанием конуса в сторону движения потока, является гидравлически самой

несовершенной при наихудших условиях обтекания, когда коэффициент формы K приближается к единице.

На данном этапе ФКО не прошли необходимой проверки для сравнения с фильтрами других конструкций и не могут быть рекомендованы для применения в скважинах, рассчитанных на длительный срок эксплуатации. Использование ФКО в разведочных скважинах для определения параметров пласта по формулам, куда входит радиус фильтра, без бурения контрольно-наблюдательной сети также не может быть рекомендовано вследствие большого выноса песка, в результате чего завышается действительный радиус фильтра.

Эффективная работа скважин с ФКО в Подмосковном бассейне, хотя и является положительным фактом, однако причины устойчивой работы в данных условиях остаются до сих пор не выясненными. Структурное бурение в водоносных песках не проводилось, а бурение скважин шарошечными долотами с прямой промывкой забоя глинистым раствором нарушает структуру и степень связности песков, а это создает иллюзию надежной работы ФКО в песках вообще.

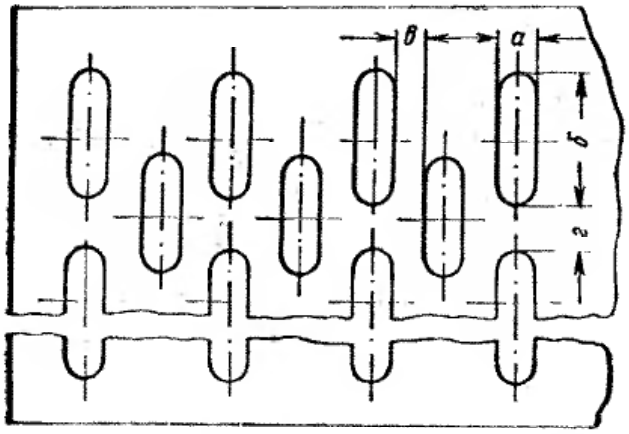


Рис. 20. Конструктивные размеры и схема разбивки проходных отверстий открытого типа

Изготовление фильтров из просечного листа толщиной 4—5 мм было начато несколько лет назад в трестах Востокбурвод и Промбурвод Минмонтажспецстроя СССР и предполагало замену перфорированных труб штампованными каркасами. Однако отсутствие необходимого технологического оборудования вынуждало производить просечку листа с вытяжкой, что приводило к некачественному изготовлению проходных отверстий. Кромки отверстий получались с острыми заусеницами, в углах щелей имелись трещины, что вызывало в фильтрах остаточные напряжения. Были случаи обрыва таких фильтров при спуске в скважины. Кроме того, такая форма просечки не позволяла устанавливать фильтры без применения дополнительных водоприемных поверхностей. В связи с указанными выше недостатками производство штампованных фильтров из толстых листовых материалов было прекращено.

Для скважин, бурящихся на воду, в большинстве стран мира фильтры на основе обсадных цельнотянутых труб не выпускаются. В целях экономии металла и упрощения технологии выпуска фильтры изготовляют из листовой стали. Технологический процесс изготовления стальных щелевых фильтров схематически сводится к следующим операциям: штамповка проходных отверстий

на листе, вальцовка и сварка листа в каркасы, приварка соединительных патрубков, подготовка поверхности фильтров для нанесения защитных покрытий, нанесение покрытий. Штамповка отверстий производится при помощи прессов с усилием 250—400 тс. На рис. 19 показан общий вид такой установки.

По такой технологической схеме изготовляют фильтры в ряде стран: народное предприятие «Гидрогеология» в Нордхаузине (ГДР), предприятие «Геомашина» в Белграде (Югославия), фирма «Нольд» в Штокштадте на Рейне, фирма «Эрнст» в Ганновере (ФРГ) и др.

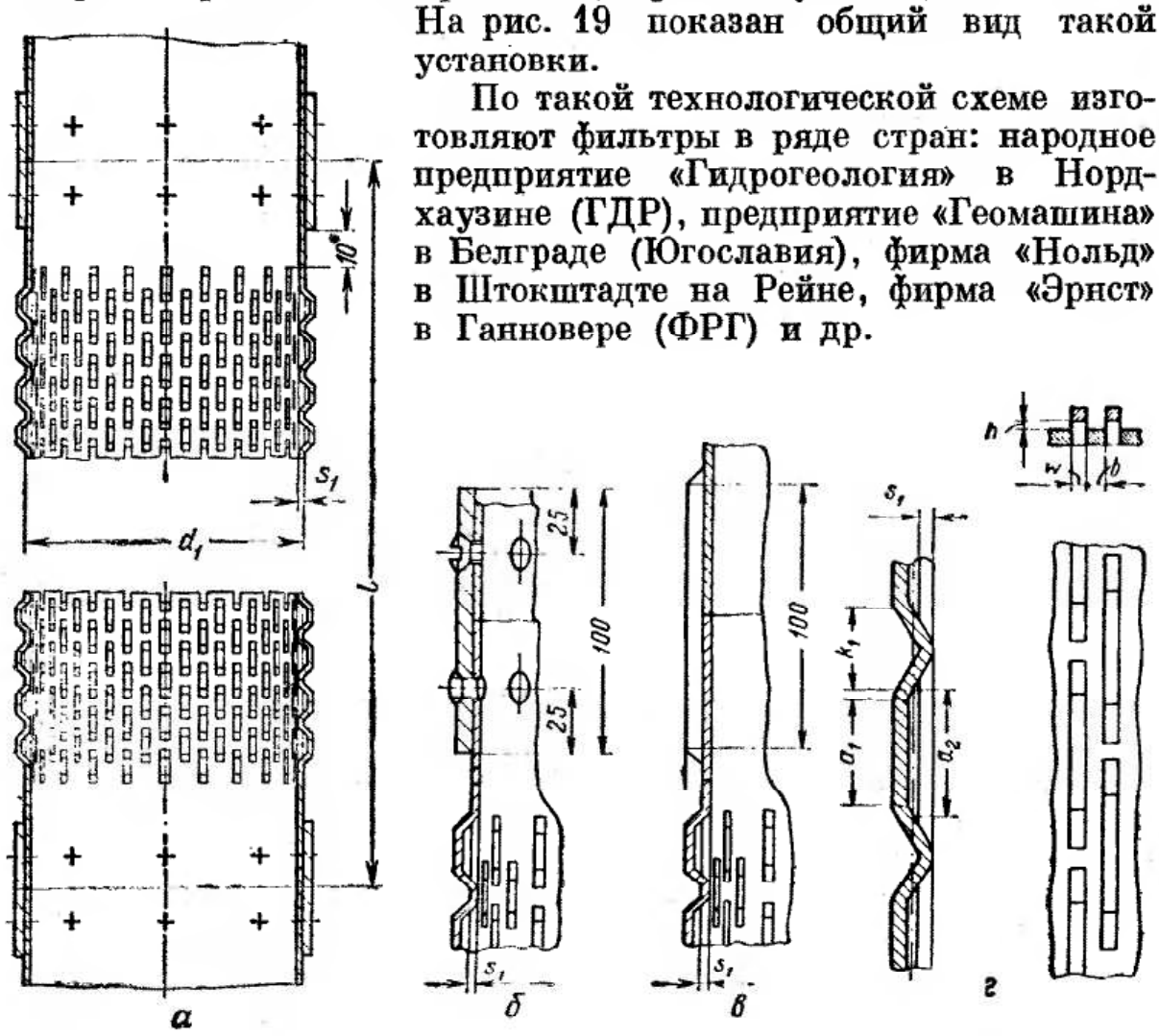


Рис. 21. Конструктивные размеры и схема разбивки проходных отверстий типа «мост»:

а — общий вид фильтра, *б* — муфтовое соединение на заклепках; *в* — муфтовое соединение на сварке; *г* — детали штамповки

Штампованные фильтры выпускаются с различной формой проходных отверстий: щель открытого типа, типа «мост», с нависающими козырьками для отклонения гравия.

В табл. 12 и 13 приведены характеристики просечного листа для изготовления фильтров со щелями открытого типа (рис. 20) и типа «мост» (рис. 21).

На рис. 22 представлены фильтры со щелями типа «мост» и резьбовыми соединениями, а в табл. 14 дана техническая характеристика фильтров.

В заключение обзора по фильтрам «Нольда» [117] необходимо остановиться на соединениях фильтров.

Таблица 12

Просечный лист для фильтров с проходными отверстиями открытого типа

Длина щели *б*	Ширина щели *а*	Ширина перемычки по вертикали *г*	Ширина перемычки по горизонтали *в*	Толщина листа	Скважность, %
20	1,0	6	2	1,5	25,3
	1,0	6	2,5	1,5	21,8
	1,5	4	2	2,0	35,2
	2,0	5	3	2,5	31,3
	2,5	5	3	3,0	35,4
	3,0	4	3	2,0	40,3
	3,0	6	3	4,0	37,3
	3,5	6	3,5	3,0	37,0
	4,0	6	4	5,0	36,8
	4,5	4	3,5	2,0	44,5
	5,0	5	5	5,0	37,9
	5,0	6	4	6,0	40,4
	6,0	7	6	8,0	34,6
	7,0	6	5	5,0	41,6
	7,0	7	5	5,0	40,0
	8,0	6	5	3,0	43,3
	10,0	6	5	5,0	45,7
25	1,5	5	2,5	2,0	30,8
	2,5	7	5	4,0	25,5
	3,0	5	3	4,0	40,8
	3,5	5	5	5,0	33,2
	4,0	5	5	5,0	36,0
	4,5	5	5	5,0	37,9
	5,0	5	4	5,0	44,4
	5,5	5	3,5	2,0	48,5
	6,0	5	4	2,0	47,3
25	6,0	7	6	8,0	37,0
	7,0	7	6	3,0	42,8
	8,0	5	5	6,0	47,7
30	5,0	10	5	5,0	36,2
	6,0	7	6	6,0	38,8
	8,0	10	7	8,0	37,8
	9,0	6	6	2,0	46,7
	10,0	6	5	6,0	51,5
35	4,0	5	4	4,0	42,7
	6,0	5	4	5,0	50,6
	6,0	5	5	5,0	46,0
	7,0	8	7	6,0	39,0
	9,0	9	7	6,0	42,2
	10,0	10	10	8,0	36,5
40	8,0	8	10	10,0	35,5
	20,8	8	6	10,0	57,1
50	10,0	10	9	8,0	42,0
	12,0	10	9	6,0	45,2
60	12,0	10	10	6,0	44,0

Примечание. Размеры даны в мм.

Таблица 13

Просечной лист для фильтров с отверстиями типа «мост»

Ширина моста по верху a_1	Толщина стенки s_1	Высота просвета моста h	Средняя длина щели a_2	Ширина щели a	Перемычка щели по вертикали k_1	Перемычка между щелями по горизонтали b	Скважность, %
17	2,5	1,0	18,5	5	17,5	5,5	9,78
		1,5	19,25		16,75		15,26
		2,0	20		19		19,55
		2,5	20,75		18,25		25,42
	3,0	1,0	18,5		20,5		9,04
		1,5	19,25		19,75		14,11
		2,0	20		22		18,14
		2,5	20,75		21,25		23,58
		3,0	21,5		23,5		27,33
	3,5	1,0	18,5		20,5		9,04
		1,5	19,25		19,75		14,11
		2,0	20		22		18,14
		2,5	20,75		21,25		23,58
17	4,0	3,0	21,5		23,5		27,33
		1,0	18,5	5	23,5	5,5	8,39
		1,5	19,25		22,75		13,08
		2,0	20		25		16,94
		2,5	20,75		24,25		22,03
20	4,0	3,0	21,5		26,5		25,59
		1,0	21,5	7	23,5	7,5	6,58
		1,5	22,25		25,75		9,59
		2,0	23		25		13,21
		2,5	23,75		27,25		16,05
		3,0	24,5		26,5		19,86
		3,5	25,25		28,75		22,50
		4,0	26		28		26,56
	5,0	1,0	21,5		26,5		6,17
		1,5	22,25		28,75		9,02
		2,0	23		28		12,43
		2,5	23,75		30,25		15,17
		3,0	24,5		29,5		18,77
		3,5	25,25		31,75		21,33
		4,0	26		31		25,18

Примечания: 1. Размеры даны в мм.
2. В таблице указаны фильтры, изготовляемые из листа толщиной 2,5—5,0 мм. Можно применять в фильтрах лист толщиной 6—8 мм.

В отечественной промышленности до сих пор фильтры соединяют с помощью стандартной трубной резьбы. Практика показала, что при транспортировке эти резьбы часто забиваются, соединение вертикальных колонн занимает много времени. Между тем круглая резьба с шагом $2^1/_2$ нитки на 26 мм, характеристика которой дана на рис. 23 и в табл. 15, лишена указанных выше недостатков. Такие муфтовые соединения можно изготовлять из заготовок,

Таблица 14

Характеристика фильтров со щелями типа «мост» с резьбовым и фланцевым соединениями и рильсановым защитным покрытием

Параметры	Номинальный диаметр фильтров, мм				
	150	200	250	300	350
Диаметр в свету, мм:					
без покрытия	150	194	250	300	350
с покрытием	148	192	248	298	348
Толщина стенки, мм:					
без покрытия	3	3	3	3	4
с покрытием	5	5	5	5	6
Длина звена фильтра, м	4	4	4	4	3
Масса, кг:					
фильтра без соединений	12,50	15,50	19,90	24,0	37,0
одного резьбового соединения	9,0	12,0	15,0	22,0	26,0
одного фланцевого соединения	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 14

Параметры	Номинальный диаметр фильтров, мм				
	400	500	600	800	1000
Диаметр в свету, мм:					
без покрытия	392	500	600	788	1000
с покрытием	390	498	598	786	998
Толщина стенки, мм:					
без покрытия	4	4	5	6	6
с покрытием	6	6	7	8	8
Длина звена фильтра, м	3	3	3	3	3
Масса, кг:					
фильтра без соединений	41,3	52,8	79,2	125,0	166,4
одного резьбового соединения	29,0	—	—	—	—
одного фланцевого соединения	—	12,7	15,4	24,5	28,3

получаемых вальцеванием полосы с последующей сваркой стыка и обработкой на токарных станках вихревым способом,

Фильтры из штампованных листовых материалов выпускаются в ГДР народным предприятием «Гидрогеология».

Основные размеры заготовок для фильтров приведены на рис. 24 и в табл. 16.

Поступившие заготовки на предприятие «Гидрогеология» вальцуют, сваривают по диаметрам, после чего изготовляют соединительные элементы (муфт и ниппелей). При длине фильтров 2—4 м применяется одна муфта и один ниппель.

Таблица 15

Основные размеры быстросъемных резьбовых соединений

Основные размеры, мм	Номинальный диаметр фильтров, мм								
	80	100	150	200	250	300	350	400	450
Внешний диаметр D_a	104	126	176	226	278	328	378	428	482
Диаметр в свету D_i	76	96	146	196	244	294	344	394	440
Длина соединения L_v	170				220				
Длина муфты $L_м$	115				140				
Длина резьбы L_G	65								
Толщина стенки s	15				17				21
Толщина стенки s_R	5				6				
Диаметр трубы в свету D_{Ri}	80	100	150	200	250	300	350	400	450
Гравийная обсыпка $D_к$	126	146	196	248	298	348	398	448	498



Рис. 22. Фильтр со щелями типа «мост» и резьбовым соединением

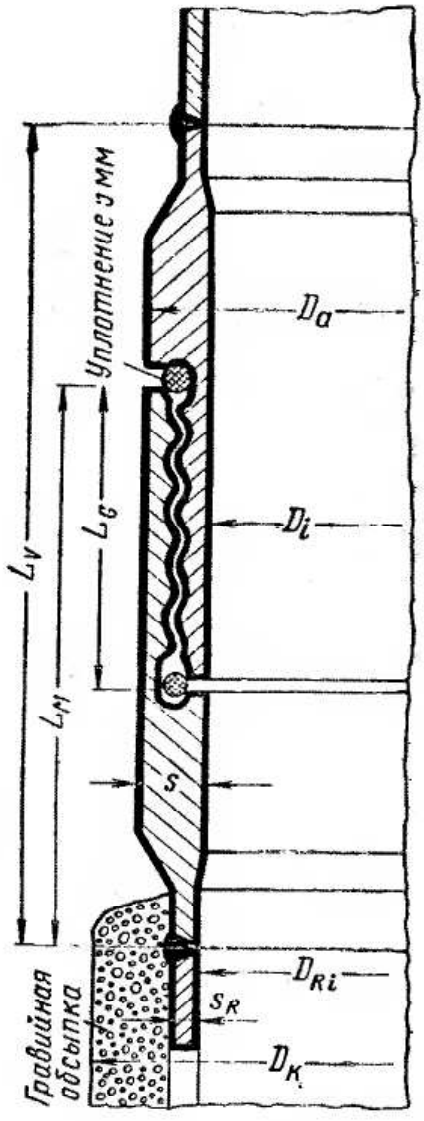


Рис. 23. Схема и конструктивные размеры быстросъемного соединения с крупной круглой резьбой

Основные размеры заготовок для

Основные размеры, мм	Номинальный									
	168				219					
Ширина листа $K \pm 2$	517				677					
Длина листа $N \pm 10$	990		1490		990		1490		1990	
Толщина листа s	3				3					
Высота щели моста $h \pm 0{,}2$	2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	
Ширина щели SW	5,4				5,4					
Длина щели SL	27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	
Расстояние между щелями по осям t	23,4				23,4					
Число отверстий в ряду:										
без муфты	40		62		40		62		84	
одна муфта	34		56		34		56		78	
две муфты	28		50		28		50		72	
Шаг хода пресса:										
без муфты	20		31		20		31		42	
одна муфта	17		28		17		28		39	
две муфты	14		25		14		25		36	
Кромка по образующей листа a_1/a_2	16/16				14/14					
Кромка по торцам b_1/b_2:										
без муфты	42/42	41/41	44/45	43/44	42/42	41/41	44/45	43/44	47/47	46/46
одна муфта	179/40	177/40	184/40	182/40	179/40	177/40	184/40	182/40	189/40	187/40
две муфты	177/177	176/176	178/179	177/178	177/177	176/176	178/179	177/178	182/182	181/181

Таблица 16

фильтров с отверстиями типа «мост»

диаметр фильтров, мм																	
	273					325				368				470			
	846					1007				1142				1462			
	1490		1990			1490		1990		1490		1990		1490		1990	
	3 и 4					4				4				4			
3,1	2,1	3,1	2,1	3,1		2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	3,1	2,1	3,1
	5,4					5,6				5,6				5,6			
28,6	27,2	28,6	27,2	28,6		27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	28,6	27,2	28,6
	23,4					23,4				23,4				23,4			
	62 56 50		84 78 72			62 56 50		84 78 72		62 56 50		84 78 72		62 56 50		84 78 72	
	31 28 25		42 39 36			31 28 25		42 39 36		31 28 25		42 38 36		31 28 25		42 39 36	
	16/17					15/16				12/13				14/14			
	$\frac{44}{45}$	$\frac{43}{44}$	$\frac{47}{47}$	$\frac{46}{46}$		$\frac{44}{45}$	$\frac{43}{44}$	$\frac{47}{47}$	$\frac{46}{46}$	$\frac{44}{45}$	$\frac{43}{44}$	$\frac{47}{47}$	$\frac{46}{46}$	$\frac{44}{45}$	$\frac{43}{44}$	$\frac{47}{47}$	$\frac{46}{46}$
	$\frac{184}{40}$	$\frac{182}{40}$	$\frac{189}{40}$	$\frac{187}{40}$		$\frac{184}{40}$	$\frac{182}{40}$	$\frac{189}{40}$	$\frac{187}{40}$	$\frac{184}{40}$	$\frac{182}{40}$	$\frac{189}{40}$	$\frac{187}{40}$	$\frac{184}{40}$	$\frac{182}{40}$	$\frac{189}{40}$	$\frac{187}{40}$
	$\frac{178}{179}$	$\frac{177}{178}$	$\frac{182}{182}$	$\frac{181}{181}$		$\frac{178}{179}$	$\frac{177}{178}$	$\frac{182}{182}$	$\frac{181}{181}$	$\frac{178}{179}$	$\frac{177}{178}$	$\frac{182}{182}$	$\frac{181}{181}$	$\frac{178}{179}$	$\frac{177}{178}$	$\frac{182}{182}$	$\frac{181}{181}$

В отличие от других производств в «Гидрогеологии» муфты и ниппели изготовляют методом холодной штамповки с использованием специальных обжимных головок, в которых с помощью масляного гидропривода развивается давление до 250 кгс/см². Для фильтров диаметрами 219, 273, 368 и 470 мм на концах проштампованных труб оставляют глухие участки трубы длиной 176—182 мм, где штампуют муфты и ниппели. При этом получается круглая резьба с шагом P=32 мм в количестве четырех витков на одно соединение. Как показывает опыт, соединение получается надежным, обеспечивающим

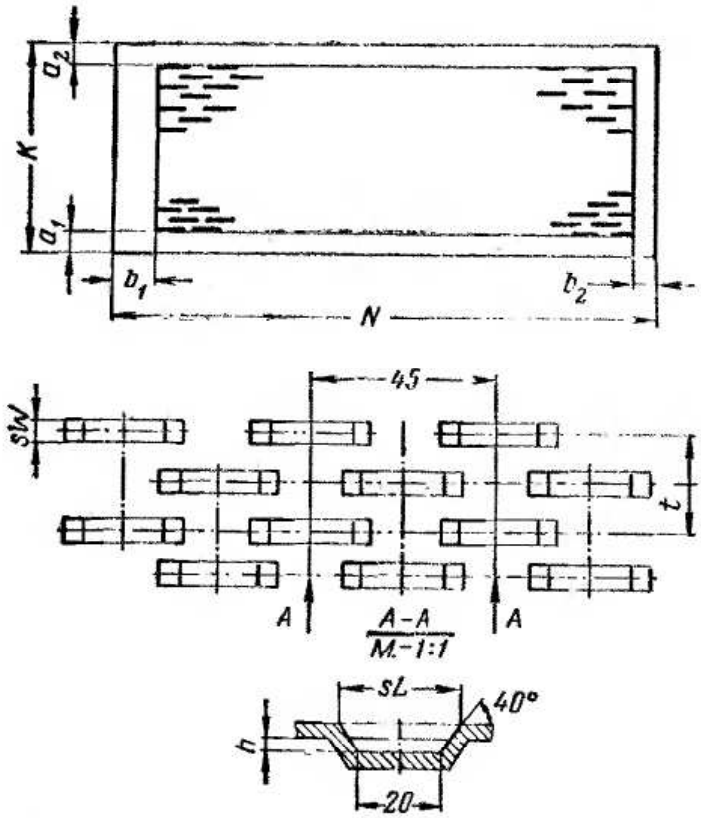


Рис. 24. Схема заготовок для фильтров из просечного листа



Рис. 25. Резьбовые соединения, образованные штамповкой

соосность, а величина зазора между муфтой и ниппелем допускает выполнение антикоррозийной защиты. На изготовление одного элемента соединения затрачивается 1,5—2 мин. Такой вид соединения не требует дополнительной механической обработки.

На рис. 25 показан фильтр диаметром 273 мм с ниппелем и муфтой, образованными штамповкой.

Для фильтров диаметром 168 мм соединительные элементы готовят отдельно с последующей приваркой к проштампованной части фильтров.

В качестве антикоррозионных покрытий применяют бесфенольные битумные лаки, наносимые с помощью пульверизатора. Эти лаки недостаточно надежны и будут заменены полиэтиленовыми покрытиями.

§ 4. ФИЛЬТРЫ КАРКАСНО-ПРОВОЛОЧНЫЕ

Производство фильтров в США сосредоточено в двух основных фирмах «Эдвард Е. Джонсон и К°» и «Кук вел Стрейнер и К°». Несмотря на то, что в США выпускается наибольшее количество пластических масс как по количеству, так и по ассортименту, большинство фильтров изготовляется из металлических материалов без антикоррозионных покрытий, поскольку эти материалы являются антикоррозионными. При выборе материалов для изготовления фильтров в США были проведены широкие

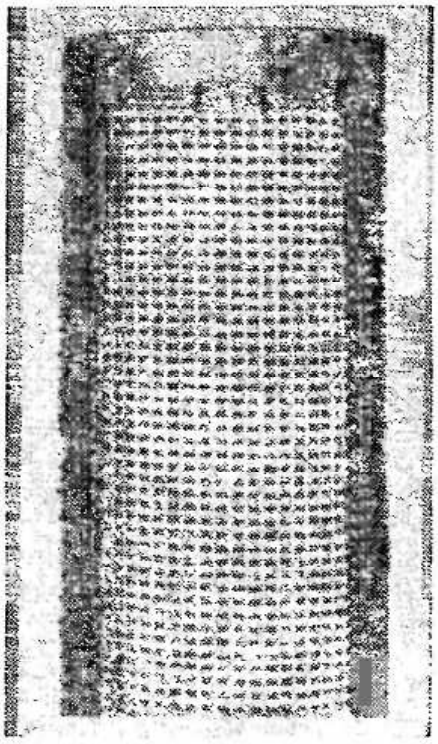


Рис. 26. Проволочный сварной фильтр «Джонсон»

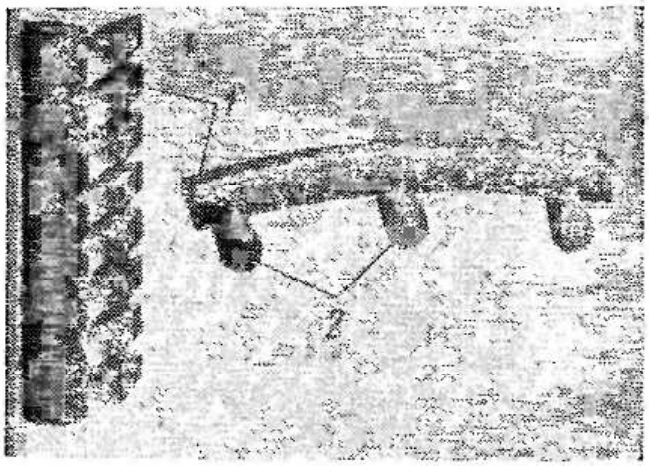


Рис. 27. Конструктивные детали фильтра:
1 — проволока водоприемной поверхности; *2* — проволока основы

исследования по коррозионной устойчивости различных материалов, результаты которых сведены в табл. 17.

В настоящее время основная продукция фирмы «Джонсон» изготовляется из проволоки нержавеющей стали, которая хорошо себя зарекомендовала при сооружении скважин городского и промышленного водоснабжения. Эти фильтры оказались весьма устойчивыми при восстановлении дебита скважин с помощью кислотных обработок. Фильтры из других материалов фирма выпускает по специальным заказам.

Фильтры этой фирмы представляют собой сварные конструкции, состоящие из несущих стержней с обмоткой профилированной проволокой. Общий вид фильтра показан на рис. 26, а конструктивные детали — на рис. 27 [104].

Таблица 17

Характеристика антикоррозионных металлов, применяемых в США для изготовления фильтров

Металл	Состав металла		Сопротивление коррозии [2]	Кислотная устойчивость	Сопротивление разрыву, кгс/см²	
	название	содержание [1], %			временное	критическое
Монель-металл	Никель Медь	70 30	Очень хорошее 3,8 × 1500	Очень хорошая	3300	5900
Супер-никель	Никель Медь	30 70	Очень хорошее 4,6 × 1000	То же	4700	4800
«Эвердур»	Медь Кремний Марганец	96 3 1	Очень хорошее 5,0 × 500	»	4900	5950
Нержавеющая сталь	Низкоуглеродистая сталь Хром Никель	74 18 8	Очень хорошее 5,0 × 400	Плохая	3100	5950
Кремнистая красная латунь	Медь Кремний Цинк	83 1 16	Хорошее 6,0 × 50	Хорошая	4500	5400
Красная латунь «Анаконда»	Медь Цинк	85 15	Хорошее 6,0 × 50	»	4200	4900
Железо «Армко»	Чистое железо	99,84	Удовлетворительное 7,0 × 2	Плохая	3500	3800
Железо «Тонкан»	Железо Медь Молибден	99,55 0,40 0,05	Удовлетворительное 7,0 × 2	»	3500	3800
Сталь	Низкоуглеродистая сталь	100	Плохое	»	3100	3500

[1] Практика производства допускает незначительные отклонения от процентного соотношения металлов.

[2] Составлено на основании таблицы фактора активности, в которой чем ниже первая цифра и выше вторая, тем больше общее сопротивление коррозии от действия грунтовой воды.

В качестве стержней применяется круглая или фасонная проволока каплевидной формы, а в качестве обмоточной — проволока трапецеидальной формы с вершинами, обращенными внутрь фильтра. Образуемые при этом отверстия расширяются внутрь, что благоприятно сказывается при работе фильтров, особенно

в тех случаях, когда фильтры устанавливают в водоносных породах без гравийной обсыпки.

В фильтрах конструкции фирмы «Джонсон» диаметр опорной проволоки незначительно больше диаметра обмоточной спирали. Например, для легких фильтров, предназначенных для установки впотай, при $D_{нар}$ = 95 мм число опорных проволок равно 18 при диаметре 3 мм и толщине обмоточной проволоки 1,5 мм. Для фильтров того же диаметра, устанавливаемых на трубах, число опорных проволок равно 28 при диаметре 4 мм и толщине

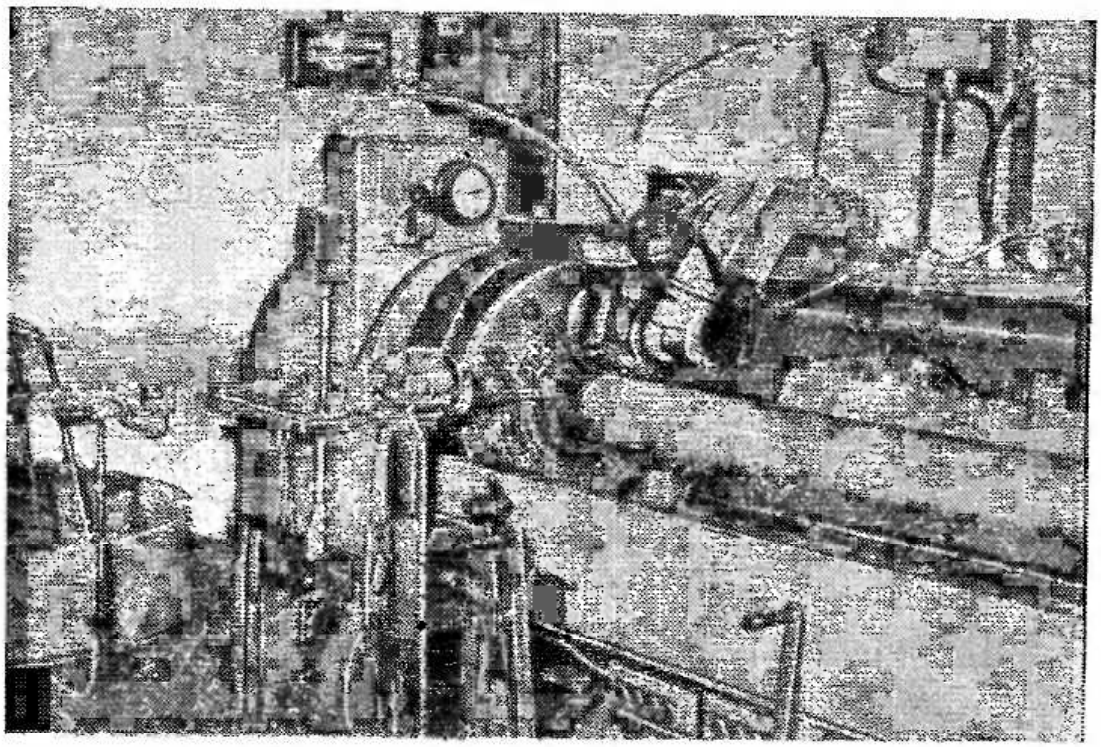


Рис. 28. Установка для производства сварных каркасно-проволочных фильтров

обмоточной проволоки 4 мм. Как правило, в конструкциях расстояния между центрами опорных проволок находятся в пределах 10—15 мм.

На рис. 28 показана установка, которая применяется фирмой при изготовлении фильтров. Станок приспособлен для выпуска фильтров широкого диапазона диаметров. Опорные стержни подаются через шаблон и протягиваются через отверстия со скоростью, равной скорости намотки проволочной спирали с заданным шагом.

Во время намотки спираль при помощи ролика вдавливается в опорные стержни, и в этих местах происходит контактная точечная электросварка. При такой технологии фильтры обладают большой прочностью, жесткостью и антикоррозионной устойчивостью. Конструкции фильтров выполняются в трех модификациях: для установки в обсадных колоннах телескопически

впотай без гравийной обсыпки, для установки на трубах с контуром гравийной обсыпки, для установки в глубоких скважинах. Техническая характеристика телескопических фильтров дана в табл. 18.

Таблица 18

Фильтры фирмы «Джонсон» для телескопической установки в скважинах

Номинальный диаметр труб для установки фильтров, дюймы	Диаметр фильтра, мм		Номер отверстия/ширина, мм							Масса 1 м, кг (приближенно)
	внешний	внутренний	10/0,25	20/0,50	40/1,0	60/1,5	80/2,0	100/2,5	150/3,7	
			Площадь проходных отверстий на 1 м длины фильтра, см²							
3	70	50	316	548	886	1096	1245	1160	1 370	7,5
3½	82	63	380	653	1033	1286	1476	1350	1 603	12,0
4	95	76	422	738	1181	1497	1687	1560	1 856	13,5
4,5	108	89	485	843	1350	1687	1919	1771	2 109	15,0
5	120	102	548	949	1497	1877	2130	1982	2 362	16,5
5⅝	133	144	590	1054	1666	2087	2383	2193	2 615	17,0
6	143	124	632	1117	1370	1792	2110	2362	2 783	18,0
8	190	168	590	1075	1834	2383	2783	3121	3 374	24,0
10	241	219	759	1370	2319	3015	3543	3986	4 281	33,0
12	283	263	886	1623	2741	3036	3648	4154	5 061	42,0
14ОД	317	288	801	1497	2573	3374	4070	4597	5 631	52,0
16ОД	360	322	907	1687	2931	3838	4640	5272	6 411	64,0
16SP	370	339	927	1750	3015	3943	4766	5399	6 580	67,0
18ОД	412	380	1033	1940	3374	4407	5314	6031	7 340	75,0
18SP	419	387	1055	1961	3395	4449	5356	6073	7 423	77,0
20ОД	463	431	801	1455	2678	3711	4555	5230	6 664	85,0
24ОД	575	525	970	1813	3332	4597	5694	6495	8 288	100,0
26ОД	605	558	1033	1898	3500	4829	5968	6833	8 731	110,0
30ОД	705	660	1202	2214	4090	5652	6980	7972	10 186	122,0
36ОД	810	760	1370	2530	4681	6453	7972	9111	11 641	140,0

Под телескопической посадкой фильтров следует понимать такое оборудование скважин, при котором разница в диаметрах между обсадной колонной и фильтром минимальна.

Ширина проходных отверстий в этих фильтрах зависит от гранулометрического состава пород водоносного горизонта и рассчитывается на пропуск 50—70% мелких фракций с учетом, что оставшаяся часть обеспечивает создание надежно работающего естественного фильтра.

При установке телескопических фильтров в однородных песках или при условии незначительной мощности водоносного горизонта, а также в тех случаях, когда над водоносным горизонтом залегают мелкозернистые пески плывунного характера, выносимые фракции песков при прокачке необходимо сократить

до 30%. Когда требуется устанавливать фильтры с контуром гравийной обсыпки либо сооружать скважины с двумя или несколькими колоннами обсадных труб, спускать фильтры следует на надфильтровой рабочей колонне. Очевидно, что в этих условиях фильтр испытывает большие статические нагрузки, в связи с чем повышаются требования к прочности фильтров. Для таких условий фирма выпускает фильтры, характеристика которых приведена в табл. 19.

Таблица 19

Фильтры фирмы «Джонсон» для установки в скважинах на трубах

Номинальный диаметр труб для установки фильтров, дюймы	Диаметр фильтра, мм		Номер отверстия/ширина, мм							Масса 1 м, кг (приближенно)
	наружный	внутренний	10 / 0,25	20 / 0,50	40 / 1,0	60 / 1,5	80 / 2,0	100 / 2,5	150 / 3,7	
			Площадь проходных отверстий на 1 м длины фильтра, см²							
1½PS	60	38	274	464	759	949	1076	991	1181	5
2P	66	50	295	527	865	1055	1202	1097	1308	7,5
2½PS	79	63	358	633	1012	1244	1413	1308	1561	10,5
3PS	92	76	422	717	1139	1434	1624	1518	1793	13,5
4PS	117	101	527	928	1434	1814	2067	1940	2299	16,5
5PS	142	126	633	1118	1371	1793	2109	2362	2784	18
6PS	168	152	527	970	1624	2109	2468	2784	2995	21
8PS	218	202	675	1244	2109	2742	3206	3606	3881	29
10PS	296	253	865	1561	2636	2910	3501	3965	4851	37
12PS	324	304	801	1518	2636	3438	4155	4703	5736	54
14PS	362	330	907	1687	2932	3838	4640	5273	6311	64
16PS	412	381	1033	1940	3374	4408	5315	6032	7339	75

Таблица 20

Фильтры фирмы «Джонсон» для глубоких скважин из перфорированных труб

Номинальный диаметр, дюймы	Диаметр трубчатого каркаса, мм		Диаметр конструктивных элементов фильтра, мм		Масса 1 м, кг (приближенно)
	внешний	внутренний	наружная поверхность	направляющие кольца	
3	88	78	108	114	26
3½	101	90	121	127	31
4	114	102	133	140	36
5	141	127	159	165	45
6	168	154	191	197	55
8	219	203	239	254	78
10	273	257	292	305	103
12	324	305	343	356	140
14	356	336	371	381	152
16	407	387	419	432	175

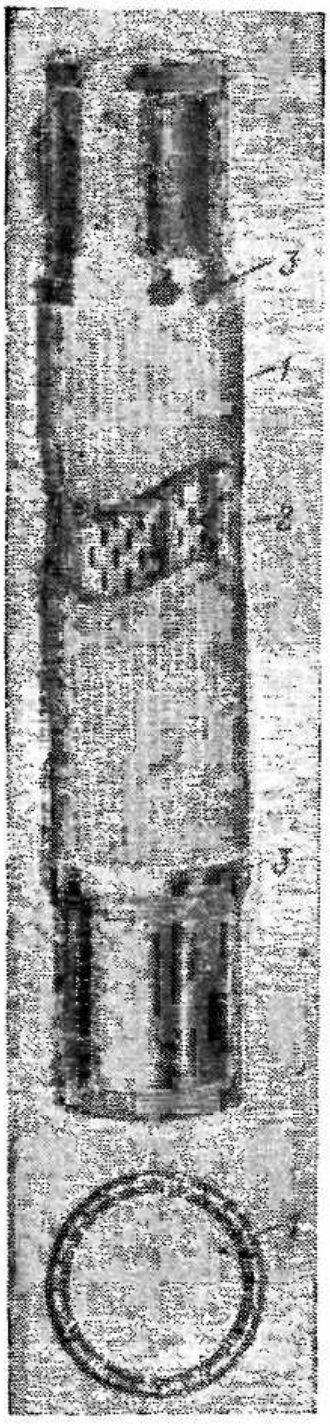


Рис. 29. Конструкция фильтра «Джонсон» для глубоких скважин



Рис. 30. Проволочный фильтр «Кука» (общий вид):

1 — свинцовый сальник;
2 — проволочная обмотка;
3 — заглушка отстойника со скобой для подъема

Для оборудования скважин большой глубины фирма «Джонсон» выпускает проволочные фильтры с опорными каркасами из штампованных щелевых труб (рис. 29 и табл. 20). Проволочная спираль *1* наматывается на опорные стержни, которые улучшают дренирующую способность фильтра. После намотки спирали концы закрывают направляющими кольцами *3*. Фильтры выпускают секциями длиной от 1,2 до 4,5 м. Фильтры диаметром до 300 мм соединяются при помощи муфт, а при бо̀льшем диаметре — сваркой.

Трубчатые каркасы *2* изготовляют из антикоррозионных материалов.

Каркасно-проволочные фильтры, выпускаемые фирмой «Кук», весьма сходны по конструкции с фильтрами фирмы «Джонсон», но отличаются формой проволоки и технологией изготовления. Материалы для изготовления фильтров указаны в табл. 17.

Общий вид фильтров Кука представлен на рис. 30.

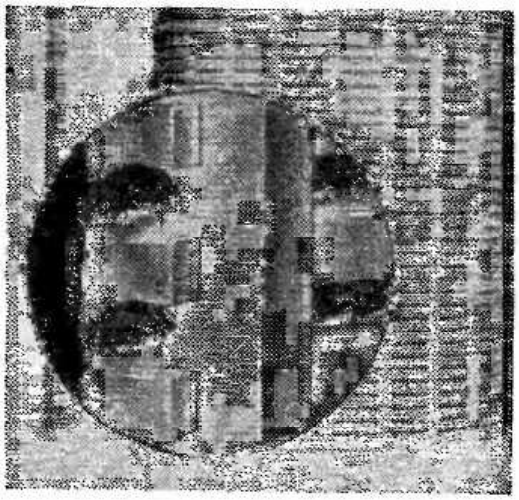


Рис. 31. Конструктивные детали фильтра «Кука»

В фильтрах этой фирмы проволочная спираль наматывается на опорные стержни имеющие пазы, в которые входит основание спирали сложного профиля. Треугольные пазы на прутьях — это следы давления штампа после закрепления спирали (рис. 31).

Таблица 21

Фильтры фирмы «Кук» легкого типа для телескопической установки в скважинах

Внутренний диаметр фильтра		Наружный диаметр фильтра		Внутренний диаметр фильтра		Масса 1 м, кг (приближенно)
дюймы	мм	дюймы	мм	дюймы	мм	
3	76	$2^{3}/_{4}$	69	2	51	6
4	101	$3^{3}/_{16}$	97	3	76	10
$5^{5}/_{8}$	143	$5^{9}/_{32}$	134	$4^{5}/_{6}$	110	15
6	152	$5^{21}/_{32}$	144	$4^{3}/_{4}$	121	18
8	203	$7^{17}/_{32}$	191	$6^{5}/_{8}$	168	24
10	254	$9^{17}/_{32}$	242	$8^{5}/_{8}$	219	33
12	305	$11^{17}/_{32}$	293	$10^{5}/_{8}$	270	42
15ОД	381	14	356	$12^{3}/_{4}$	324	49
16ОД	406	$14^{7}/_{8}$	378	$13^{1}/_{2}$	343	52
18ОД	457	$16^{3}/_{4}$	425	$15^{3}/_{8}$	390	63
20ОД	508	$18^{3}/_{4}$	476	$17^{3}/_{8}$	441	74
24ОД	610	$22^{3}/_{4}$	578	$21^{1}/_{4}$	543	89

Размеры проходных отверстий на фильтрах находятся в пределах 0,15—4,6 мм.

В конструкциях «Кука» для основы и обмотки фильтров применяется проволока следующих диаметров (в мм):

для каркаса	3,8	6,35	9,53
для обмотки	2,28	3,72	4,76

В зависимости от глубины скважин и способов установки фирма выпускает фильтры двух типов: легкие для телескопической посадки в скважины (табл. 21) и тяжелые для установки на надфильтровых трубах в скважинах глубиной от 500 до 1000 м (табл. 22).

Таблица 22

Фильтры фирмы «Кук» тяжелого типа для установки в скважинах на трубах

Номинальный размер фильтров по внутреннему диаметру труб	Наружный диаметр фильтра		Внутренний диаметр фильтра		Масса 1 м, кг (приближенно)
	дюймы	мм	дюймы	мм	
6—1Д	$7^{3}/_{8}$	187	6	152	22
8—1Д	$9^{5}/_{8}$	244	8	203	37
10—1Д	$11^{3}/_{4}$	298	10	254	60
12—1Д	14	355	12	305	67
18—1Д	$19^{17}/_{32}$	496	18	457	68
20—1Д	$21^{1}/_{2}$	571	20	508	79
26—1Д	$27^{1}/_{2}$	698	26	660	99
30—1Д	$31^{21}/_{32}$	804	30	762	117
36—1Д	$37^{1}/_{4}$	945	36	914	134
38—1Д	$39^{5}/_{8}$	1006	38	965	143
40—1Д	$41^{1}/_{4}$	1048	40	1016	149

§ 5. ФИЛЬТРЫ КАРКАСНО-СТЕРЖНЕВЫЕ

Конструкции каркасно-стержневых фильтров были предложены автором и впервые внедрены в практику при бурении скважин на водозаборах г. Дзержинска в 1949 г. [27]. В отличие от фильтров с каркасами из бурильных труб с круглыми или щелевыми отверстиями в данной конструкции трубу заменяет каркас из стальных стержней (рис. 32). Замена дырчатой трубы стержневым каркасом позволяет значительно увеличить скважность фильтра, избавиться от трудоемкой работы по сверлению отверстий, снизить расход цельнотянутых труб.

Основным преимуществом каркасно-стержневого фильтра является отсутствие тупиковых пространств между фильтрующей и опорной поверхностями, благодаря чему не накапливаются осадки, а фильтрующая поверхность становится доступной для

периодической очистки. Сравнивая характеристики каркасно-стержневого и проволочно-гравийного фильтров (табл. 23), видим, что скважность стержневого каркаса превышает скважность проволочно-гравийного фильтра на 49%, а площадь одного проходного отверстия на стержневом каркасе в 100 раз больше площади одного отверстия на дырчатой трубе. Это весьма существенно, так как ..ольматаж фильтров, а следовательно, продолжительность их работы зависит



Рис. 32. Конструкция каркасно-стержневого фильтра:

1 — соединительный патрубок; *2* — направляющий фонарь; *3* — кольцо-насадка; *4* — металлические стержни; *5* — проволока; *6* — опорный пояс

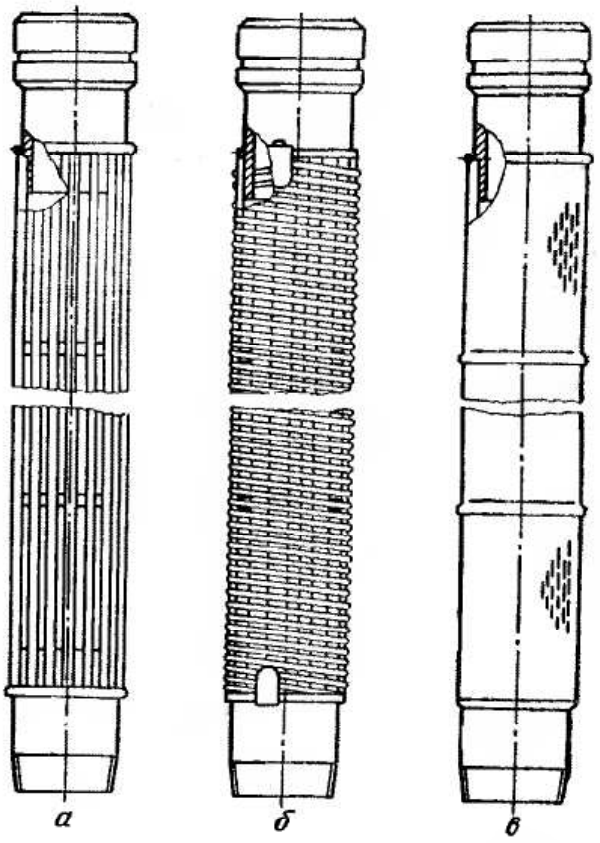


Рис. 33. Каркасно-стержневые фильтры с различными водоприемными поверхностями:

а — из стальных стержней; *б* — с проволочной обмоткой из нержавеющей стали; *в* — с просечным листом из нержавеющей стали

в основном от процента скважности и размера проходных отверстий.

Если учесть, что при двойных поверхностях фильтрации (у гравийно-проволочных фильтров на трубчатых каркасах) осадки будут накапливаться более интенсивно, а удаление их механическими и химическими способами затруднено, то

Таблица 23

Сравнительная характеристика фильтров каркасно-стержневого и проволочного на трубчатом каркасе при длине 3 м

Конструктивные элементы	Фильтр проволочный на каркасе из бурильной трубы	Фильтр каркасно-стержневой из прутковой стали
Диаметр труб для изготовления фильтров, мм	168/152	168/152
Наружный диаметр фильтра с учетом толщины опорных ребер и проволочной обмотки диаметром 2 мм	182	196
Скважность опорного каркаса, %	20	69
Число отверстий на каркасе длиной 3 м	2300	108
Площадь, мм²:		
отверстия при диаметре сверла 10 мм	78	
щели, образованной между двумя стержнями и опорными кольцами		8540
Масса секции фильтра, кг:		
каркаса трубы с перфорацией при скважности 20%	78,93	
стержневого каркаса при толщине стержней 12 мм с 8 опорными кольцами и 12 стержнями		59,9

Примечание. Для каркасных фильтров в расчете принята длина соединительных патрубков 250 мм, ширина опорных колец 25 мм.

несовершенство гравийно-проволочного фильтра еще более очевидно.

Водоприемные поверхности каркасно-стержневых фильтров изготовляют из различных материалов, выбор которых зависит от срока эксплуатации скважин и химических свойств воды (рис. 33).

В скальных неустойчивых породах можно устанавливать фильтры из одних металлических стержней. При эксплуатации неагрессивных вод в скважинах временного действия (со сроком работы от нескольких недель до нескольких месяцев), сооружаемых главным образом для строительного водопонижения, на каркас можно наматывать простую стальную проволоку-катанку диаметром от 3 до 5 мм. В скважинах временного действия при агрессивных водах стальная проволока должна иметь защитное покрытие в виде цинковых или меднистых пленок. Можно применять стальную проволоку, имеющую хлорвиниловое или полиэтиленовое покрытие. В агрессивных водах необходимо применять проволоку из нержавеющей стали.

В водозаборных и водопонизительных скважинах, рассчитанных на длительный срок эксплуатации (в течение нескольких десятков лет), для устройства фильтрующих поверхностей следует

использовать проволоку из коррозионно-устойчивых металлов, в частности из нержавеющих сталей. Учитывая длительность работы сооружений и их большую стоимость, это требование должно обязательно соблюдаться при установке фильтров в скважинах, эксплуатирующих подземные воды независимо от их химического состава, так как известно, что все воды в той или иной степени коррозионны и их действие может проявиться в процессе длительной эксплуатации.

Шаг спиральной намотки зависит от пород, в которых устанавливают фильтр, или от диаметра зерен гравийной обсыпки. Расстояние между витками спирали должно соответствовать среднему диаметру зерен принятой гравийной обсыпки. Практически трудно достичь точной намотки проволочной спирали с равномерным расстоянием между витками. Однако, как показала практика, эта точность и не требуется: при гравийных обсыпках изменение размера просвета между проволоками спирали на 0,5 мм в ту или другую сторону не имеет существенного значения (табл. 24).

Таблица 24

Величина скважности фильтра при намотке проволочной спирали в зависимости от толщины проволоки и ширины просвета

Ширина просвета, мм	Скважность (в %) при диаметре проволоки, мм			
	1,5	2	3	4
0,50	25	20	14	11
0,75	33	27	20	15
1,00	40	33	25	20
1,50	50	43	33	27
2,00	57	50	40	33
2,50	62	55	45	36
3,00	66	60	50	43
3,50	70	63	54	46
4,00	73	66	57	50
4,50	75	69	60	53,5
5,00	77	71	62	55,5
5,50	78,5	73	64	57
6,00	80	75	66	60

Примечание. Ввиду незначительного сокращения процента скважности за счет поверхности касания спирали с опорными ребрами последняя в таблице не учтена.

Из табл. 24 следует, что при толщине проволоки 1,5—3 мм увеличение ширины просвета между витками свыше 4—4,5 мм не приводит к существенному увеличению процента скважности; полученная при указанном просвете скважность 60—70% является предельной.

При установке в скважину фильтров со спиральной проволочной обмоткой необходимо иметь в виду, что при засыпке гравия (с поверхности земли) в межфильтровом пространстве отдельные

проволоки обмотки расклиниваются. Поэтому перед спуском фильтра требуется тщательно проверять положение проволочной спирали. Кроме проволочных спиралей, водоприемные поверхности на каркасных фильтрах могут быть выполнены из штампованного листа нержавеющей стали, а также из сеток нержавеющей стали и латуни.

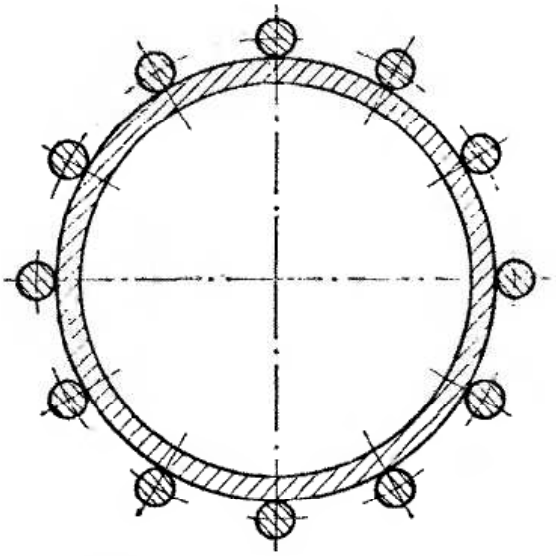


Рис. 34. Соединение стержней с опорными кольцами и патрубками внахлестку

Изготовление фильтров. Соединительные патрубки изготовляют из буровых труб установленных стандартов. Для каждого звена фильтра используют два патрубка длиной по 250—350 мм со стандартной резьбой на концах. Для соединения звеньев фильтра в колонну необходимой длины применяются полумуфты. Там, где может быть обеспечена газо- или электросварка, отдельные патрубки сваривают. В этом случае патрубки представляют собой

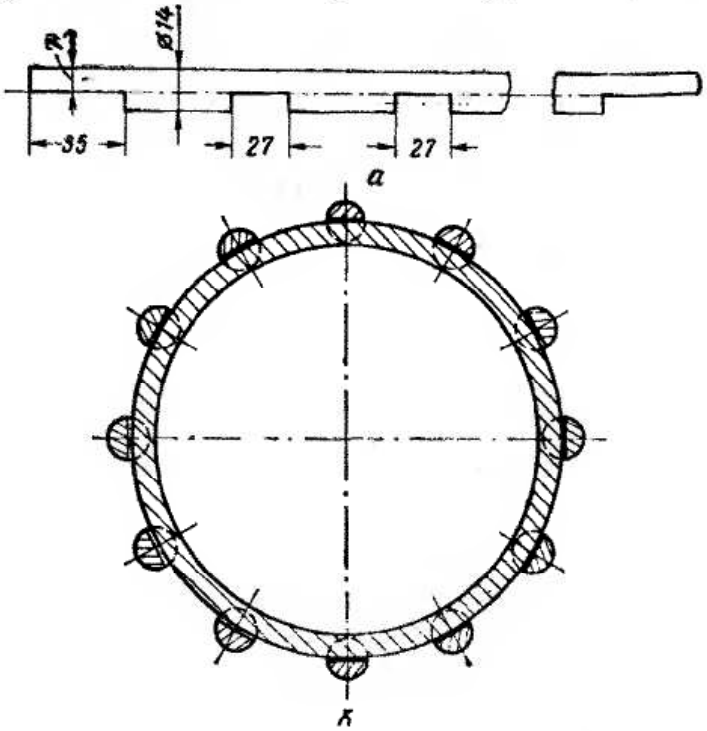


Рис. 35. Соединение стержней с опорными кольцами и патрубками впотай:
а — фрезерованный стержень; *б* — соединение стержней с кольцом

отрезки труб с фасками для сварки. Для уменьшения гидравлических сопротивлений при движении воды по фильтру на торцовой стороне соединительного патрубка по внутреннему его периметру необходимо снять фаску под углом 45°.

Стержни каркаса соединяют с патрубком внахлестку (рис. 34) электросваркой, при этом внешний диаметр фильтра увеличивается на двойную толщину стержней.

Для уменьшения внешнего диаметра фильтра может быть применен другой вид соединения патрубков со стержнями-впотай. В этом случае стержни закрепляют не на поверхности патрубков, а в специальных прорезях, выполненных фрезерованием (рис. 35, 36). При таком соединении внешний диаметр фильтра уменьшается на двойную толщину стенки соединительного патрубка.

Металлические стержни изготовляют из обычной прутковой стали марки Ст. 3 или Ст. 5. Для сильно агрессивных вод целесообразно употреблять нержавеющую сталь. Длину стержней следует принимать от 2 до 3,5 м как наиболее удобную для обработки, монтажа и перевозки (в виде готовых фильтров). Толщина стержней зависит от диаметра фильтра.

Для образования каркаса стержни располагают по образующей патрубков на расстоянии 30—40 мм друг от друга. Данные о количестве стержней и их диаметрах в зависимости от диаметра патрубков приведены в табл. 25.

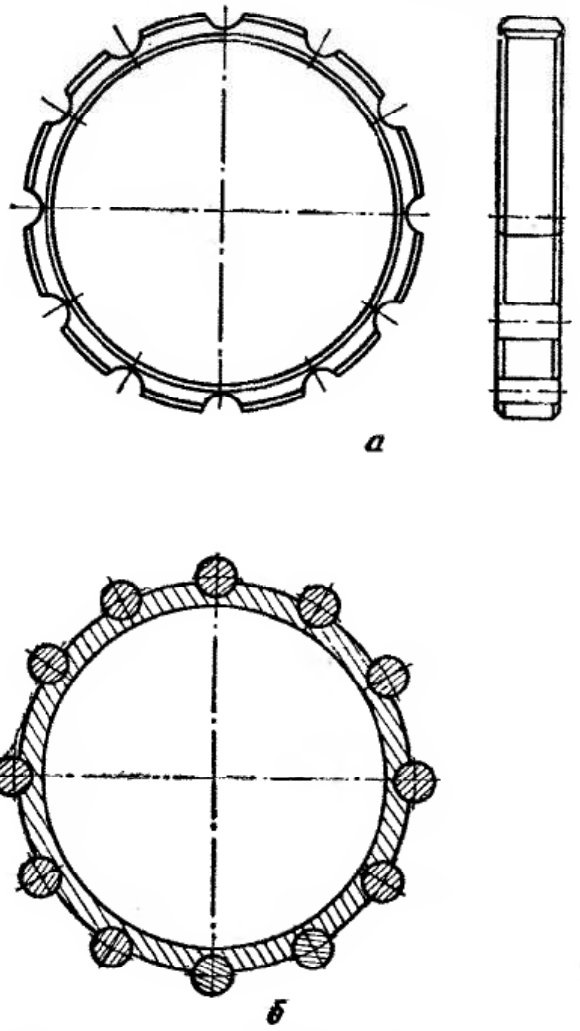


Рис. 36. Соединение стержней с опорными кольцами впотай:

а — фрезерованное кольцо; *б* — соединение кольца со стержнями

Таблица 25

Основные данные каркасных фильтров диаметром до 150 мм

Диаметр патрубков, мм		Диаметр стержней, мм	Число стержней по образующей
наружный	внутренний		
89	77	10	8
102	91	10	8
127	114	12	10
146	132	12	12
168	150	14	12

Указанные диаметры рекомендуются для фильтров, предназначенных для установки в скважинах, эксплуатирующих напорные или безнапорные водоносные горизонты большой мощности. Наличие столба воды над фильтром позволяет в этих случаях устанавливать насосное оборудование без спуска его в фильтр.

При установке фильтров в водоносных горизонтах малой мощности или в условиях, когда необходимо откачивать воду с максимальным понижением уровня, насосы следует заглублять в рабочую часть фильтров. В этих случаях требуются фильтры больших диаметров, соответствующих габаритным размерам насосов (табл. 26).

Таблица 26

Основные данные каркасных фильтров диаметром 200 мм и более

Диаметр патрубка, мм		Диаметр стержней, мм	Число стержней по образующей
наружный	внутренний		
219	210	14	12
273	255	14	12
325	305	16	20
377	355	16	24
426	402	16	32

При применении надежной антикоррозионной защиты диаметр стержней может быть уменьшен.

Опорные пояса жесткости. Для придания стержням необходимой жесткости при монтаже каркаса устанавливают опорные пояса из колец или сварные на «сухарях» с закладкой кусков металла между стержнями. Количество поясов и расстояние между ними зависят от диаметра фильтра, толщины стержней и глубины скважин. При изготовлении каркаса из стержней диаметром 10—12 мм пояса устанавливают через 200 мм; при 14-мм стержнях — через 250 мм; при 16-мм стержнях — через 300 мм.

Сборка фильтров. Каркасы фильтров необходимо собирать, исходя из целевого назначения. Когда фильтр устанавливают в водоносных горизонтах большой мощности либо в скважинах с высокими напорами, где установка насосов и сработка уровней воды будут производиться выше фильтров, последние целесообразно собирать на опорных кольцах.

Если необходимо погружать насосы в фильтры или их отстойники, в опорные пояса рекомендуется закладывать куски металла или использовать кольца, соединенные со стержнем впотай, когда внутренняя и наружная поверхности фильтра не имеют выступающих частей.

Для определения предельной глубины установки каркасных фильтров в 1952 г. в Проектстальспецконструкции были сделаны

поверочные расчеты, при которых установлена возможность использования фильтров в скважинах глубиной до 200 м [58].

В 1973 г. были проверены расчеты Проектстальспецконструкции и установлено, что по принятой схеме расчета прочность каркасно-стержневых фильтров занижена более чем в 2,5 раза [90], следовательно, глубина установки фильтров может быть увеличена.

До недавнего времени основная потребность в фильтрах удовлетворялась за счет их изготовления на мелких кустарных

Таблица 27

Основные размеры каркасно-стержневых фильтров и их цена (ТУ 51-644—74)

Типоразмер секции фильтров	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Длина секции, мм	Масса секции, кг	Скважность, %	Цена за одну секцию, руб.
Фильтры стержневые (каркасы)						
С-5Ф5В	174	132	3100	69	51,2	29
С-8Ф5В	196	152	3100	77	53,8	34
С-8Ф5В	247	203	3100	88	58,9	41
С-10Ф5В	301	255	3100	105	62,2	50
С-12Ф5В	352	307	3100	161	60,2	—
С-14Ф5В	405	359	3100	178	60,8	—
С-16Ф5В	454	408	3100	202	61,2	—
Фильтры стержневые с проволочной обмоткой из нержавеющей стали						
СП-5Ф 7В	178	132	3100 ± 15	80	28,8	46
				78	38,5	43
СП-6Ф 7В	200	152	3100 ± 15	89	31,3	51
				86	42	50
СП-8Ф 7В	251	203	3100 ± 15	103	33,5	58
				100	43,7	55
СП-10Ф 7В	307	255	3100 ± 15	136	27,5	75
				131	37,5	72
СП-12Ф 7В	359	307	3100 ± 15	158	38,7	85
СП-14Ф 7В	411	359	3100 ± 15	180	39,1	97
СП-16Ф 7В	460	408	3100 ± 15	200	39,2	106
Фильтры стержневые с просечным листом из нержавеющей стали						
СЛ-5Ф11В 176	—	132	3100 ± 15	81	15—25	60
СЛ-6Ф11В 198		152	3100 ± 15	90	15—25	64
СЛ-8Ф11В 249		203	3100 ± 15	104	15—25	83
СЛ-10Ф11В 303		255	3100 ± 15	122	15—25	96
СЛ-12Ф11В 355		307	3100 ± 15	189	15—25	—
СЛ-14Ф11В 407		359	3100 ± 15	210	15—25	—
СЛ-16Ф11В 456		408	3100 ± 15	237	15—25	

Примечания. 1. В фильтрах диаметрами 168—200 мм диаметр проволоки 2 мм, а для фильтров диаметром 254 мм и более — 3 мм.

2. Проволока на фильтры наматывается с зазором (просветом) в 1,5 и 2,5 мм.

3. Цены на фильтры оптовые, утверждены Государственным комитетом цен Совета Министров СССР 31 марта 1975 г. № 523.

4. При поставке стержневых фильтров без антикоррозионного покрытия цены снижаются на 7%; при поставке фильтров без резьбовых соединений с фасками под сварку — на 3%.

предприятиях, в различных СМУ, ПМК и других организациях. Такая децентрализация без специальных станков и оборудования, а также без установок по антикоррозионной защите фильтров не могла обеспечивать долговременную работу водозаборных скважин и по этим причинам было принято решение о переходе на заводское изготовление фильтров.

В настоящее время централизованное промышленное производство фильтров сосредоточивается на двух заводах: механическом заводе экспериментального оборудования в Дрогобыче Львовской области (находится в подчинении Мингазпрома СССР) и заводе «Буровая техника» в Новосибирске (находится в ведении Минводхоза РСФСР).

Около 50—60% всех фильтров будут составлять каркасно-стержневые и 40—50% — на трубчатой основе, которые в ближайшие годы будут заменены фильтрами из просечного листа.

Техническая характеристика и стоимость выпускаемых в настоящее время каркасных фильтров приведены в табл. 27.

В настоящее время в процессе изготовления каркасно-стержневых фильтров на Дрогобычском экспериментально-механическом заводе существенно изменена технология изготовления каркасных фильтров, а Институтом электросварки им. Е. А. Патона спроектирован и изготовляется станок-автомат для сварки каркасов длиной 3 м, диаметрами 168—254 мм и производительностью 250 м в смену.

§ 6. ФИЛЬТРЫ ЩЕЛЕВЫЕ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫЕ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

При выборе материала для фильтров, кроме коррозионной устойчивости, необходимо учитывать также возможность обработки материала и его прочность после обработки. Основными конструктивными характеристиками фильтра являются его скважность и размер проходных отверстий. Проведенные автором обследования фильтров из инертных материалов (фарфоровых, гончарных, деревянных) показали, что процент скважности этих фильтров составляет 6—15% и, следовательно, эти конструкции, несмотря на их устойчивость против коррозии, не могут обеспечить большую пропускную способность. Кроме того, при большом водоотборе вследствие малого процента скважности могут произойти механическая и химическая закупорки фильтров.

Наибольший процент скважности (до 25—30%) фильтров, изготовляемых из неметаллических материалов, может быть получен при использовании пластических масс. Диэлектрические свойства последних и их достаточная коррозионная устойчивость способствует широкому использованию этих материалов в химической, электротехнической и других отраслях производства.

Фильтры, изготовляемые из синтетических материалов, имеют следующие преимущества:

1) обладают устойчивостью против всех видов коррозии как в кислой, так и в щелочной средах;

2) не требуют для изготовления остродефицитных цветных металлов;

3) допускают устройство проходных щелей шириной от 0,25 мм и более;

4) легко подвергаются механической обработке, сохраняя при этом достаточную прочность;

5) допускают обработку кислотами при химической закупорке;

6) легки и удобны при изготовлении; транспортировке и установке; так как фильтры из пластмасс (при равных диаметрах и длине) в 5 раз легче фильтров из стальных труб;

7) не требуются сложные работы при смене фильтра, в случае затруднений фильтр может быть раздроблен желонкой или долотом и извлечен на поверхность;

8) в агрессивных средах эксплуатационный срок службы фильтров из пластических масс должен быть высоким.

В настоящее время известно использование в фильтрах поливинилхлорида, полиэтилена, полипропилена, полистерола, стеклопластиков и древесноволокнистых материалов на основе пропитки и связи фенолформальдегидными и эпоксидными смолами.

Фильтры с использованием поливинилхлоридных труб

В относительно небольших объемах эти фильтры выпускают фирмы ФРГ.

В отечественной практике для изготовления фильтров применяется поливинилхлорид (винипласт) со следующими показателями:

Плотность, г/см³	1,38—1,45
Предел прочности, кгс/см²:	
при растяжении	500—600
при сжатии	800—1000
при изгибе	1000—1200
Удлинение при растяжении, %	10—15
Удельная ударная вязкость, кгс/см/см²	120
Температура сварки, ° С	200—240

По физико-техническим показателям винипласт обладает рядом положительных качеств: устойчив против воздействия кислот и щелочей, обрабатывается на обычных механических станках, сваривается горячим воздухом, при температурах свыше +60° С размягчается, а при —20° С становится хрупким.

На литьевых машинах звенья фильтров могут быть получены со щелями заданной ширины и резьбовыми соединениями без всякой дополнительной механической обработки. В настоящее время в отечественной промышленности выпускаются винипластовые

трубы двух марок: из винипласта марки А, стабилизированные меламином, допущены органами санитарного надзора для питьевых целей; трубы марки Б, стабилизированные свинцом, пригодны только для технических целей.

Характеристика труб, выпускаемых отечественной промышленностью, приведена в табл. 28.

Таблица 28

Основные данные по трубам из винипласта, выпускаемым по ТУ МХП 6-05-1573—72

Внутренний диаметр, мм	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса 1 м трубы, кг (приближенно)	Условный проход, мм	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса 1 м трубы, кг (приближенно)
50	60	4,5	1,7	90	102	6,5	2,73
60	76	5,0	1,56	100	114	7,0	3,30
70	83	6,0	2,20	125	140	8,0	4,64
80	96	6,5	2,53	150	166	8,0	5,60

Согласно техническим условиям, трубы выпускают длиной 1,5—3 м. При поставке труб допускается включение в партию до 15% коротких труб длиной 1—1,5 м при диаметре до 100 мм и 20% — при диаметре труб свыше 100 мм. В технических условиях имеется пункт, согласно которому допускается поставка труб и других размеров.

Стоимость труб из винипласта (поливинилхлорида) легкого типа согласно прейскуранту 0503 в расчете на 1000 м:

Наружный диаметр, мм	96	102	114	140	166	250
Стоимость, тыс. руб	2,4	2,7	3,24	4,175	5,084	6,3

Для большинства скважин длина рабочей части фильтра в среднем составляет около 6—10 м и, следовательно, при установке фильтров трубы необходимо соединять в колонну. В настоящее время разработаны и применяются следующие виды соединений труб из винипласта (рис. 37):

а — соединение металлическими муфтами на резьбе, когда в концы труб в горячем состоянии вставляют патрубки с муфтой и резьбой, после чего стыки завальцовывают, патрубки же удерживаются в теле трубы силой трения. Для предохранения соединений от сдвигающих усилий на патрубках имеются заточки — расширения. В целях защиты от коррозии поверхность муфты после свинчивания покрывают защитным лаком;

б — соединение в раструб, когда конец трубы разогревают до размягчения, а второй холодный вставляют в него, и шов обваривают сварочной проволокой;

в — соединение гладкой надвижной муфтой, когда концы труб, усиленные с помощью насадок, вставляют в металлическую муфту соответствующего диаметра; муфту укрепляют на теле фильтра болтами; во избежание коррозии муфты изготовляют из нержавеющей стали со сваркой продольного шва (можно применять простую сталь толщиной 4—5 мм с антикоррозийными покрытиями);

г — соединение металлическими и пластмассовыми резьбовыми муфтами можно применять для труб небольших диаметров; резьба на муфте должна быть крупной.

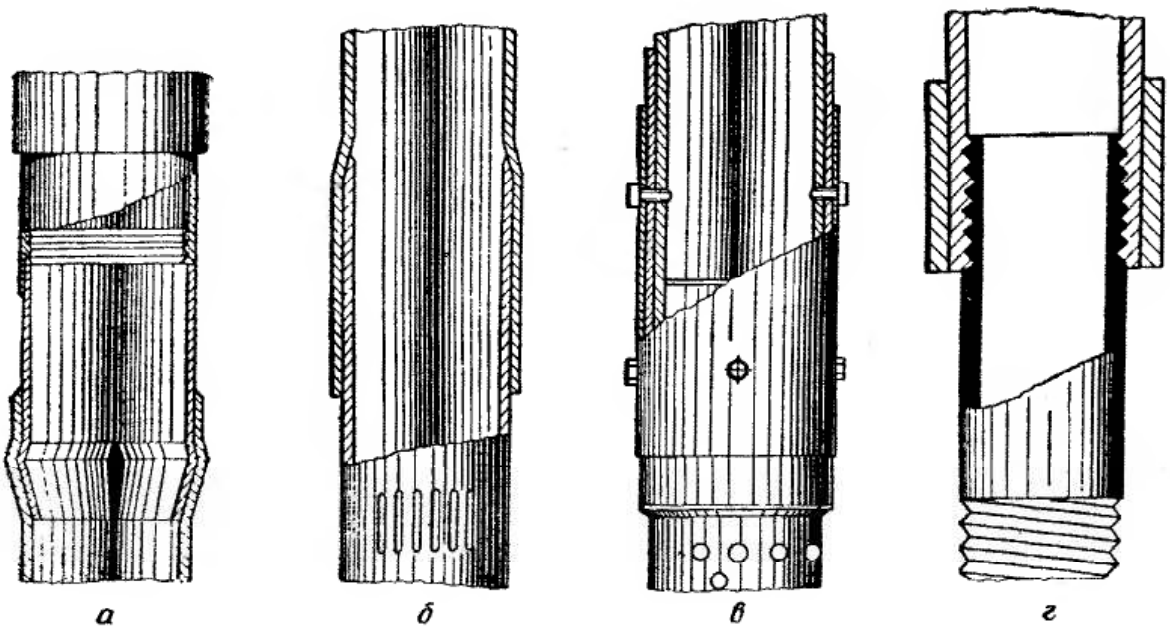


Рис. 37. Соединение труб и фильтров из пластических масс

Для соединения винипластовых труб надвижными муфтами, а также для увеличения толщины труб в торце необходимо упрочнять их с помощью насадок.

Практика применения фильтров из пластических масс показала, что наиболее удобным является соединение металлическими гладкими надвижными и резьбовыми муфтами. Изготовлять фильтры необходимо на заводе, а собирать их можно в полевых условиях.

Проходные отверстия на трубах из пластических масс могут иметь круглую и щелевидную форму. Круглая перфорация производится на сверлильных ручных или механических станках. Опыт сверления отверстий показал, что наилучшие результаты (скорость резания, чистота отверстий) получаются при больших оборотах сверла и плавном нажатии. При сверлении пластмасс не требуется водяной или мыльной смазки. Следует обращать внимание на форму заточки сверла, так как неправильный угол может вызвать скалывание тела трубы при выходе сверла.

Максимальная скважность фильтра при круглой и щелевой перфорации достигает 30%.

Щели нарезают дисковыми фрезами и перовыми сверлами с внешней поверхности фильтра (рис. 38). Ширина отверстий может быть принята от 0,25 мм и более. Длина щели зависит от диаметра фрезы, но наилучшие результаты получены при применении фрезовых дисков диаметром 70—75 мм; в этом случае длина щели достигает 50—55 мм.

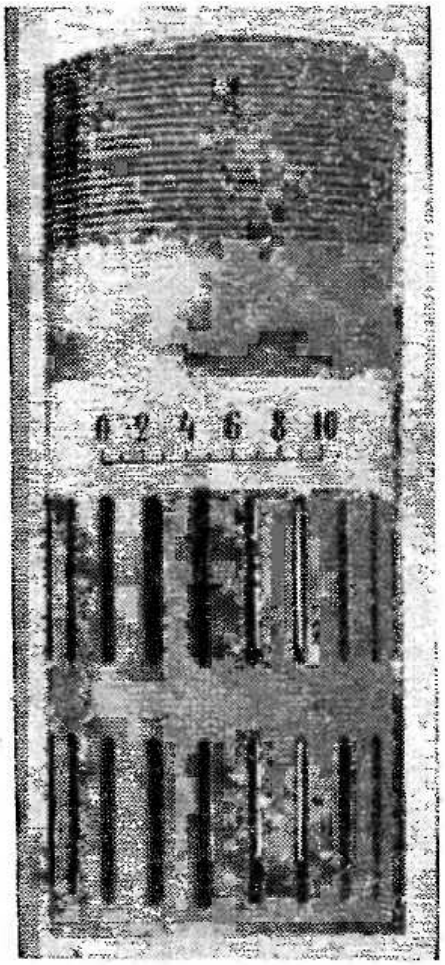


Рис. 38. Фильтр из винипластовых труб со щелями, нарезанными перовыми сверлами

Для получения щелей, расширяющихся внутрь фильтра, применяют нарезку дисками под двумя углами. Такая форма щелей предпочтительна при установке фильтра в мелкозернистых грунтах без гравийной засыпки. При крупных гравийных засыпках щели можно нарезать под прямым углом.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает только трубы из пластических масс, а фильтры изготовляют в механических мастерских. Следует отметить, что при нарезке щелей кустарным способом в различных мастерских наблюдаются потери пластмассы в количествах, соответствующих величине скважности фильтров, в результате чего стоимость фильтров повышается. Кроме того, механическая обработка значительно снижает прочность конструкций.

Внедрение фильтров из винипласта в приктику отечественного водоснабжения началось по предложению автора в 1945—1946 гг., когда эти конструкции были им впервые применены в скважинах Вильнюсского водопровода [28]. В последующие годы фильтры устанавливали в водозаборах Белорусской ССР и Литовской ССР, а также Горьковской области в скважинах глубиной до 100 м. Большинство скважин с фильтрами из винипласта, по сведениям Белорусского треста Промбурвод, работало удовлетворительно.

Большое количество щелевых фильтров из винипласта было изготовлено и внедрено Гидропроектом для инженерно-геологических изысканий.

В последние годы вследствие децентрализованного изготовления фильтров и недостаточного выпуска труб из винипласта внедрение фильтров этой конструкции резко сократилось.

Фильтры щелевые, изготовляемые литьевым способом

Технологический процесс изготовления фильтров литьевым способом отличается простотой: пластический материал, разогретый до соответствующей температуры, вдавливается при помощи литьевой машины в пресс-форму. После охлаждения, затвердевания пластического материала и распалубки пресс-формы фильтры извлекаются в готовом виде без всякой дополнительной механической обработки.

В последние годы на отечественных и зарубежных предприятиях фильтры изготовляли из поливинилхлорида и других синтетических смол литьевым способом без дополнительной механической обработки или с ее применением в минимальном объеме.

Фирма «Нольд» (ФРГ) выпускает фильтры из поливинилхлорида, техническая характеристика которых дана в табл. 29.

Таблица 29

Фильтры щелевые из поливинилхлорида для разведочных и водозаборных скважин

Параметры	Размеры, мм													
Диаметр:														
условный	30	40	50	65	80	100	125	150	170	200	230	260	300	400
внутренний	35	41	52	67	80	100	126	150	163	196	235	253	285	366
наружный	41	48	60	75	89	110	140	160	180	210	250	280	315	400
Толщина стенки, мм	3	3,5	4	4	4,5	5	7	5	8,5	7	7,5	13,5	15	17
Наружный диаметр (с соединениями), мм	45	53	65	80	95	120	149	166	180	220	260	280	315	415
Масса 1 м, кг	0,61	0,74	1,05	1,30	1,79	2,46	4,16	3,64	6,86	6,64	8,28	16,6	16,7	30

В этих фильтрах проходные отверстия горизонтальные и могут иметь ширину 0,3—0,5; 1,0—1,5 мм. Фильтры выпускаются длиной 1; 1,5; 2; 3 и 4 м.

Эти конструкции фильтров используются при оборудовании скважин контрольно-наблюдательной сети и в мелких скважинах, а также при оборудовании водозаборных скважин. Отмечается хрупкость и большой бой фильтров при транспортировке.

Фирма «Нольд» выпускает также фильтры из полимерных материалов, получаемых литьевым способом без дополнительной механической обработки (рис. 39). Однако в процессе бурения и при транспортировке было отмечено повреждение фильтров, так как поливинилхлорид не обладает необходимой прочностью при ударных нагрузках.

Фильтры из синтетических материалов литьевым способом в отечественной практике впервые были изготовлены на Тульской ремонтно-механической базе треста Союзшахтоосушение, где

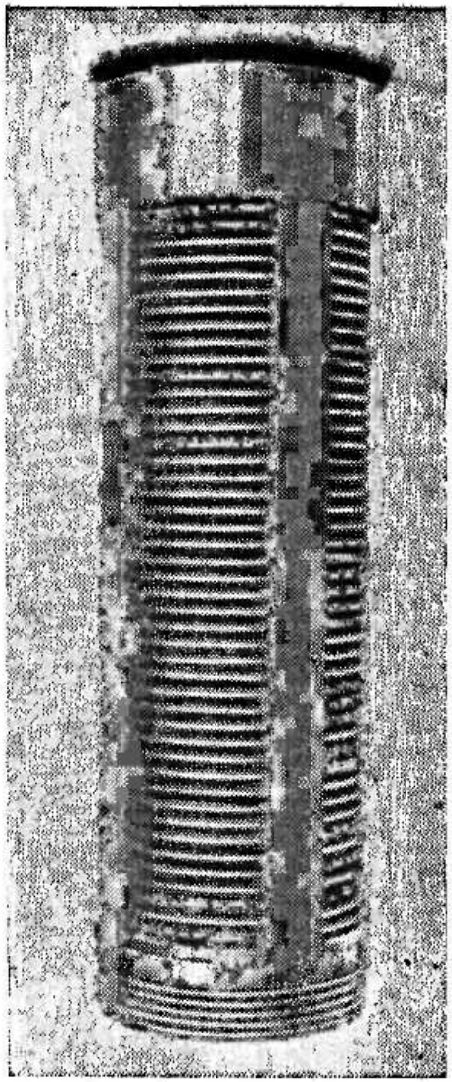


Рис. 39. Фильтр из полистирола, полученный литьевым способом

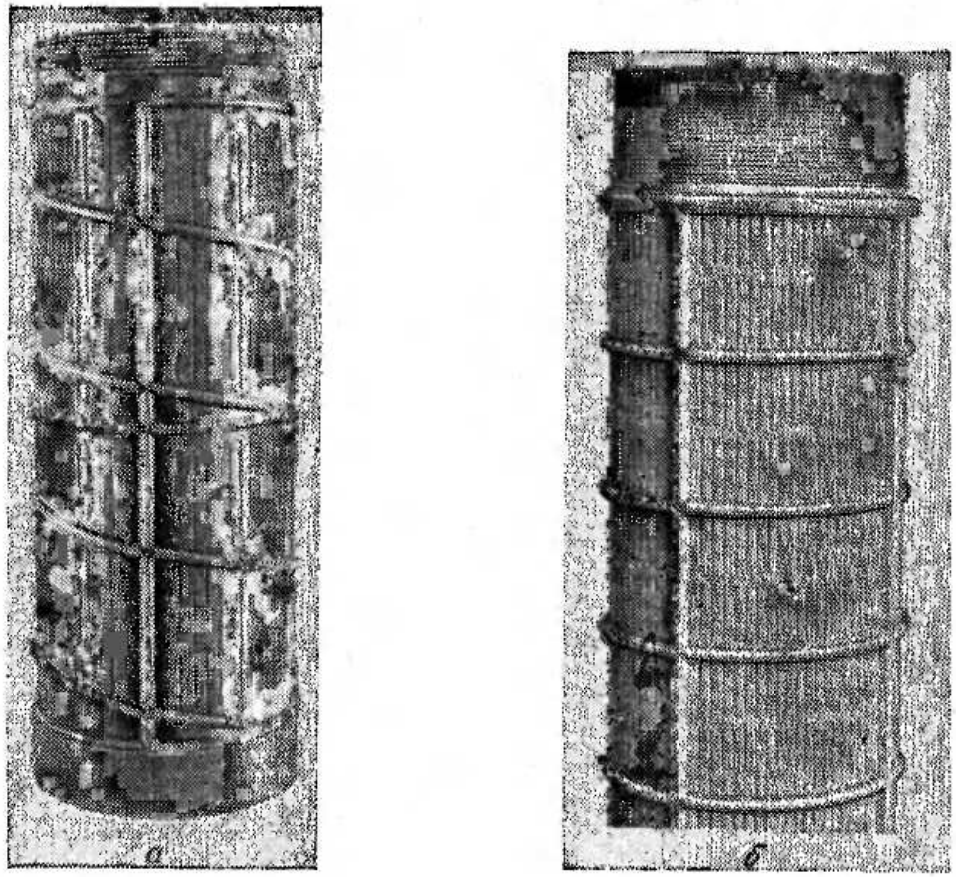


Рис. 40. Фильтры щелевые из капрона:
а — внутренний диаметр 150 мм; *б* — внутренний диаметр 200 мм

в конце 1963 г., по предложению инж. В. Г. Довбыш и В. П. Римша, были разработаны машина и пресс-формы. На первом этапе промышленного освоения фильтры изготовляли из вторичного капрона, но, как указывают авторы предложения, не исключается возможность применения других термопластических материалов: аминопласта, полистирола, смолы АК-7, П-68 и др. Конструкции фильтров из капрона показаны на рис. 40.

Тульской ремонтно-механической базой была освоена технология изготовления фильтров двух диаметров. Основные данные по этим фильтрам приведены ниже:

Диаметр фильтра, мм	150	200
Толщина стенки, мм	12	10
Длина щели, мм	50—80	50
Ширина щели, мм:		
по внешней поверхности	1	1
по внутренней поверхности	1,5	1,5
Скважность фильтра, %	8	12,5
Длина звена, мм	750	600
Число звеньев фильтра при длине колонны 3 м	4	5
Масса звена, кг	4,7	5,1
Временная отпускная цена за 1 м, руб.	13,5	19

Перед установкой фильтров из капрона в скважины были проведены стендовые испытания, результаты которых даны в табл. 30.

Таблица 30

Механическая прочность литых щелевых фильтров из капрона

Вид испытания	Диаметр фильтра, мм		Длина фильтра, мм	Скважность, %	Допустимая нагрузка, кгс/см²	Нагрузка, приведенная к высоте колонны диаметром 168 мм, м	Критическая нагрузка, кгс/см²	Относительное удлинение, %
	наружный	внутренний						
Сжатие	180	168	500	8,5	5	75	—	—
	180	156	750	12	10	150	—	—
	180	156	2000 (500 × 4)	8,5	5	75	—	—
Растяжение	180	168	1000 (500 × 2)	8,5	—	—	4	3
Внешнее боковое радиальное сжатие	180	168	500	8,5	—	—	1,5	—
Внутреннее боковое радиальное сжатие (распор)	180	168	500	8,5	—	—	2,5	—

Испытания фильтров из капрона в полевых условиях не подтвердили их преимуществ перед другими конструкциями.

В пробах воды отмечено постоянное присутствие капролактама, что исключает возможность применения фильтров из капрона для питьевых скважин. При отрицательных температурах (—27° С) происходило растрескивание стыковых соединений. Производство литьевых фильтров прекращено.

Вторая попытка изготовления фильтров литьевым способом была предпринята Гипроводхозом при участии лаборатории полимеров ВНИИ Сантехника и ВНИИ ВОДГЕО. Однако освоение фильтров этой конструкции было приостановлено.

Фильтры на основе полиэтиленовых труб

В отечественной промышленности трубы из полиэтилена выпускаются серийно. Полиэтилен представляет собой термопластический материал, обладающий хорошими физическими, диэлектрическими и санитарными свойствами, что позволяет использовать трубы из полиэтилена в водопроводном хозяйстве. Органами санитарного надзора полиэтилен допущен для оборудования водозаборных сооружений хозяйственного назначения. Промышленность выпускает трубы двух видов из полиэтилена низкой плотности (ПНП) и полиэтилена высокой плотности (ПВП), которые отличаются физико-химическими и механическими свойствами (табл. 31).

Таблица 31

Характеристика полиэтилена

Показатели	Полиэтилен	
	низкой плотности	высокой плотности
Плотность, г/см³	0,92—0,93	0,94—0,96
Предел прочности, кгс/см²:		
при растяжении	100—160	220—400
при изгибе	120	200—380
при сжатии	125	240
Модуль упругости, кгс/см²	1500—2500	5000—8000
Водопоглощение за 30 сут при 20° С, %	0,03—0,004	0,03—0,004
Температурный предел применения, °С	—30 + 70	

Полиэтилен стоек к воздействию слабых растворов кислот и щелочей. Детали из него и стыки труб легко свариваются при температуре 200° С путем сжатия. Как показали исследования, прочность сварных швов составляет 80—100% прочности целой трубы. Полиэтилен хорошо обрабатывается на металлорежущих станках, склеивается и в размягченном состоянии хорошо формуется при температуре 110—140° С.

Исследованиями установлено, что под влиянием давления и температуры трубы из полиэтилена стареют: они становятся более

жесткими и хрупкими, что необходимо учитывать при их применении.

Согласно ГОСТ 18599—73, трубы напорные из полиэтилена выпускаются четырех типов (табл. 32).

Таблица 32

Характеристика труб из полиэтилена

Тип труб	Максимальное давление воды (в кгс/см²) при 20° С для труб из полиэтилена	
	высокой плотности	низкой плотности
Л (легкий)	2,5	2,5
СЛ (среднелегкий)	4,0	4,0
С (средний)	6,0	6,0
Т (тяжелый)	10,0	10,0

Для изготовления фильтров и крепления ствола скважин на воду применяются полиэтиленовые трубы высокой плотности среднего и тяжелого типов. Для водоснабжения рекомендуется применять фильтры минимального диаметра — от 80 —100 мм и более (табл. 33).

Таблица 33

Трубы из полиэтилена высокой плотности (по ГОСТ 18599—73)

Средний наружный диаметр, мм		Трубы типа С			Трубы типа Т		
		Толщина стенки, мм			Толщина стенки, мм		
номинальный	предельное отклонение	номинальная	предельное отклонение	Теоретическая масса 1 м трубы, кг	номинальная	предельное отклонение	Теоретическая масса 1 м трубы, кг
90	+1,6	5,1	+0,7	1,88	8,2	+1,0	2,11
110	+1,8	6,2	+0,8	2,04	10,0	+1,2	3,14
125	+2,1	7,1	+0,9	2,65	11,4	+1,3	6,07
140	+2,3	7,9	+1,0	3,30	12,7	+1,5	5,07
160	+2,6	9,1	+1,1	4,33	14,6	+1,7	6,66
180	+2,7	10,2	+1,2	5,45	16,4	+1,8	8,41
200	+2,8	11,4	+1,3	6,77	18,2	+2,0	10,4
225	+2,9	12,8	+1,5	8,56	20,5	+2,2	13,1
250	+3,0	14,2	+1,6	10,5	22,8	+2,5	16,2
280	+3,1	16,9	+1,8	13,2	25,5	2,8	20,3
315	+3,3	17,9	+2,0	16,7	—	—	—
355	+3,4	20,1	+2,2	21,1	—	—	—
400	+3,6	22,7	+2,5	26,9	—	—	—
450	+3,8	25,5	+2,8	33,9	—	—	—

Примечания: 1. ГОСТом предусматривается выпуск труб диаметром 500, 560 и 630 мм.
2. Трубы должны изготовляться длиной 6, 8, 10 и 12 м.

Инициатива использования труб из полиэтилена при бурении скважин на воду в нашей стране принадлежит тресту Укрсовхозспецстрой, в котором с 1963 г. разработана технология проходки скважин и оборудования их полиэтиленовыми трубами, изготовлены и испытаны фильтры [16]. Трестом используются фильтры с сетками № 16/100 и 14/90 на основе перфорированных труб из полиэтилена.

На трубах диаметром 100 мм при диаметре отверстий 10 мм число отверстий составляло 800 на 1 м; при диаметре труб 125 мм и диаметре отверстий 12 мм — 700 на 1 м.

Напайка сетки и намотка проволочной спирали на полиэтиленовых каркасах производятся по продольным ребрам, выполненным из проволоки диаметром 4—5 мм. Такие ребра устанавливают путем термического прокола нагретых концов проволоки в каркас.

Фильтры на основе щелевых труб из полиэтилена с сеткой из винипласта применялись Гидропроектом в водопонизительных скважинах Саратовской ГЭС.

В тресте Промбурвод использовали фильтры из полиэтилена при оборудовании 16 скважин глубиной от 40 до 180 м. Эти фильтры выпускают в виде каркасов с круглой перфорацией, со щелями шириной 1 мм под обсыпку и с водоприемной поверхностью из латунных, стальных нержавеющих сеток и капрона. Как показал опыт, намотка проволочных спиралей на трубы из полиэтилена приводит к их деформации и к смещению витков спирали.

Перфорированные трубы из полиэтилена устанавливались в скважинах для крепления известняков.

К сожалению, данных по эксплуатации во времени фильтров на основе труб из полиэтилена не имеется, поскольку буровые организации после сдачи скважин заказчику таких наблюдений не вели.

Однако по сведениям, полученным в трестах Укрсовхозспецстрой и Промбурвод, работа скважин с полиэтиленовыми фильтрами при дебитах, не превышающих 30—50 м³/ч, проходит удовлетворительно, поскольку жалоб от потребителей за прошедший период не поступало.

Фильтры на основе стеклопластиков

В последние годы из стеклопластиков — стекловолокна или стекложгута — на основе связи полиэфирными, эпоксидными, фенолформальдегидными, кремнийорганическими и другими смолами получают новые конструкционные материалы, которые по прочности превосходят лучшие сорта стали. Стеклопластики в 1,5 раза легче алюминия и в 4,5 раза легче стали. Эти материалы устойчивы в агрессивных средах, противостоят ударным и вибрационным нагрузкам. Стеклопластики применяют при изготовлении труб, трубопроводов, резервуаров и других изделий. Про-

мышленное производство этих труб освоено в США, Англии, Франции, Голландии, Австралии.

В настоящее время трубы из стеклопластика выпускают Северодонецкий завод стеклопластиков и Уфимской завод текстильного стекловолокна. Материал труб состоит из стекловолокна — 60—70%, полиэфирной смолы марки ПН-1 — 40—30% с добавкой отвердителя, гидроперекиси изопропилбензола и ускорителя — нафтената кобальта.

При такой технологии изготовления получают трубы со следующими показателями:

Объемная масса, г/см³	1,7—2,2
Допустимое осевое растяжение на разрыв, кгс/см²	1500
Радиальное сжатие, кгс/см²	2500
Удельная ударная вязкость, кгс/см/см²	0,6

При изготовлении труб стекложгут наматывается на стеклошпон в строго заданных порядке и количестве поперечных и продольных слоев, в результате чего обеспечивается высокая прочность труб. Каждая труба проходит опрессовку под давлением не менее 45 кгс/см². В колонну трубы собирают с помощью гладких муфт и фланцевых соединений. При использовании стеклопластиковых труб в буровом деле их соединяют гладкими муфтами с применением особо прочных клеев (на эпоксидных смолах, БОВ и др.).

Трубы, выпускаемые Северодонецким заводом стеклопластиков, имеют следующие данные:

Диаметр, мм	30—300
Толщина стенки, мм	2—10
Длина, м	3—6

Трубы из стеклопластика на основе полиэфирных смол, не апробированные органами санитарного надзора, можно использовать для технических целей, а в случае применения в качестве связующего эпоксидных смол — для питьевого водоснабжения (опыт США).

Применение труб из стеклопластика для фильтров было предложено ВНИИ ВОДГЕО в 1963 г. [37]. Перфорированные трубы из стеклопластика использовали в качестве опорных каркасов для фильтров с водоприемной поверхностью из винипластовой сетки. Три фильтра такой конструкции установлены на Горьковском стационаре ВНИИ ВОДГЕО. Технология изготовления таких фильтров затруднялась тем, что при выходе сверла или фрезы на внутренней поверхности трубы разрывались стеклянные нити. Этот недостаток мог быть ликвидирован путем футеровки внутренней поверхности трубы прочной пленкой из смол.

Американская фирма «Фибергаст Компани» в штате Оклахома выпускает трубы из стеклопластика диаметром от $2\,^3/_8''$ до $10\,^3/_4''$. В отличие от существующих методов навивки стеклоткани на стеклошпон в виде стекложгутов эта фирма для труб больших

диаметров применяет грубую стеклоткань полотняного переплетения и эпоксидные смолы. Внутреннюю поверхность труб покрывают прочной пленкой, которая образует гладкую зеркальную поверхность. Щели на фильтрах нарезают дисковыми фрезами.

Основные данные фильтров из стеклопластика

	I тип	II тип
Наружный диаметр, мм	219	260,35
Толщина стенки, мм	4,57	
	5,08	
Ширина щели, мм	2,28	
Длина щели, мм	44,45	
Число щелей:		
в одном поясе по горизонтали на 1 фут	6	7
в одном ряду по вертикали на 1 фут	24	26
Скважность, %	7	8

В настоящее время фильтры из фибергласса применяются в африканских странах и Пакистане при оборудовании скважин, сооружаемых для орошения и дренажа сельскохозяйственных территорий, а также используются при каптаже вод с температурой до 60—80° С, обладающих большой коррозионной способностью.

Исследования фильтров из стеклопластиковых труб показали, что механическая обработка связана с рядом отрицательных факторов:

нарушается структура материала, разрыв нитей ведет к уменьшению механической прочности;

требуется применение специального режущего инструмента, так как абразивное воздействие стеклопластика на режущий инструмент быстро выводит последний из строя;

вызывает отходы материала при технологической обработке;

запыленность и вредность участка механической обработки;

происходит отслоение разорванных стеклонитей при выходе сверла или фрезы на внутреннюю поверхность трубы, что вызывает необходимость футеровки внутренней поверхности трубы прочной пленкой из смол;

происходит повышенное водопоглощение на участках, где обработанная поверхность отверстий не покрыта смоляной пленкой.

Перечисленные недостатки свидетельствуют о нецелесообразности использования готовых стеклопластиковых труб в качестве исходного материала для изготовления фильтров, тем более что существующие способы намотки пропитанных соответствующими связующими непрерывных стеклонитей (стекложгутов) на оправку обеспечивают непосредственное формование трубы с перфорацией, не требующей дальнейшей механической обработки.

Рассмотрим несколько вариантов конструкций стеклопластиковых фильтров, полученных двумя методами намотки: косой перекрестной и продольно-поперечной.

Фильтры, образованные косой перекрестной намоткой. Стеклонити *1*, сматываясь с бобин, пропитываются связующим в ванночке *2* (рис. 41). Затем специальным устройством *3* с них снимается избыток связующего и с помощью нитеводителя *4* стеклонити наматываются на оправку *5*.

Вращение оправки кинематически жестко связано с возвратно-поступательным движением нитеводителя. Это позволяет подобрать такое соотношение между числом оборотов оправки и скоростью

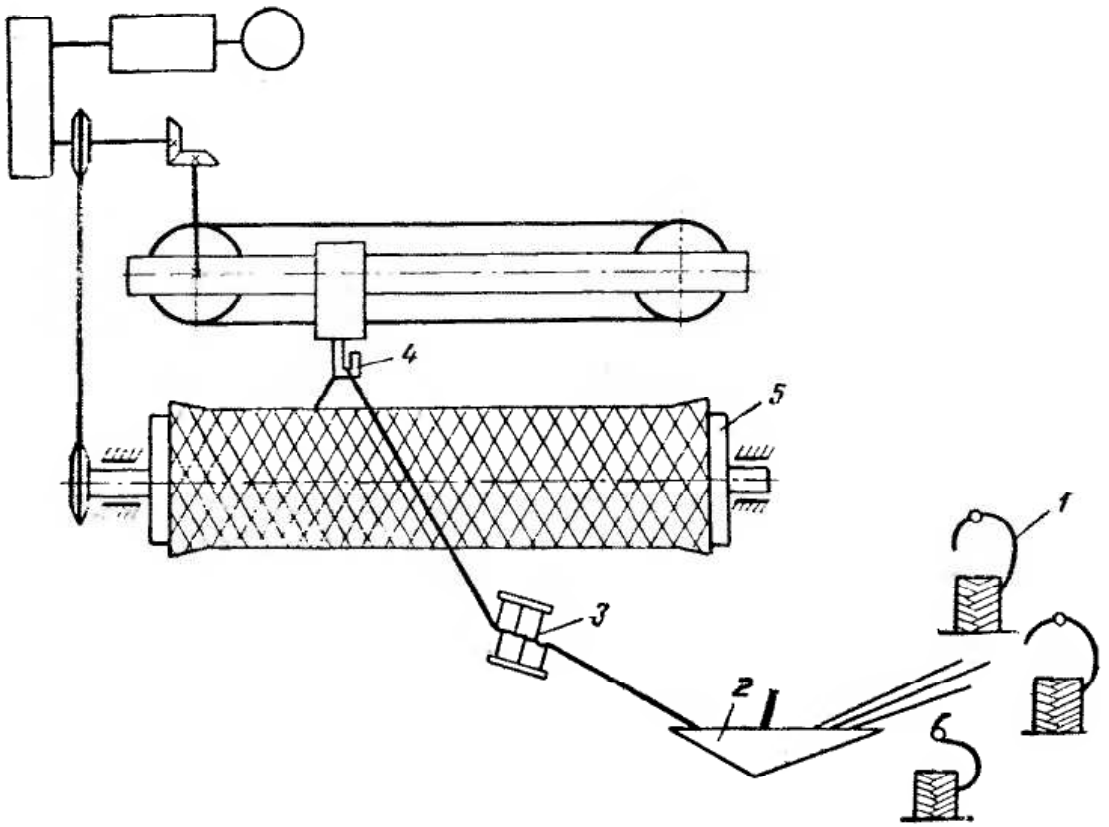


Рис. 41. Схема установки для намотки фильтров из стеклопластика

движения нитеводителя, что стеклонить будет формовать на оправке сетчатую структуру с отверстиями заданного размера. Эти отверстия не нуждаются в механической обработке, а сам фильтр — в антикоррозионной защите.

При условии одинакового числа отверстий как в стальном, так и в стеклопластиковых фильтрах, если $D = a$, площадь квадратного отверстия стеклопластикового фильтра будет на 21,4% больше круглого.

Действительно, если D — диаметр отверстия, a — сторона квадратного отверстия, s_1 — площадь круглого отверстия, s_2 — площадь квадратного отверстия, то $s_2 - s_1 = 0{,}214\ a^2$.

Впервые этот метод был использован в Харьковском отделении стеклопластиков ВЭИ им. В. И. Ленина при изготовлении фильтров внутренним диаметром 165 мм и длиной 3 м.

Изменяя угол намотки (от 5 до 85°), можно изготовить фильтр с отверстиями ромбической формы (рис. 42).

Прочность и жесткость фильтров из стеклопластика зависят от толщины стенки, которая создается в процессе формования в довольно широких пределах от 3 до 30 мм.

В скважинах, где применяются фильтры с каркасами из бурильных дырчатых труб с водоприемной поверхностью из сеток и тканей, могут быть использованы стеклопластиковые фильтры следующих конструкций. Опорный каркас выполнен из дырчатого стеклопластикового фильтра и застильно обмотан стеклонитями без пропитки. Поверх стеклонитей намотана структура, напоминающая или точно повторяющая рисунок каркаса.

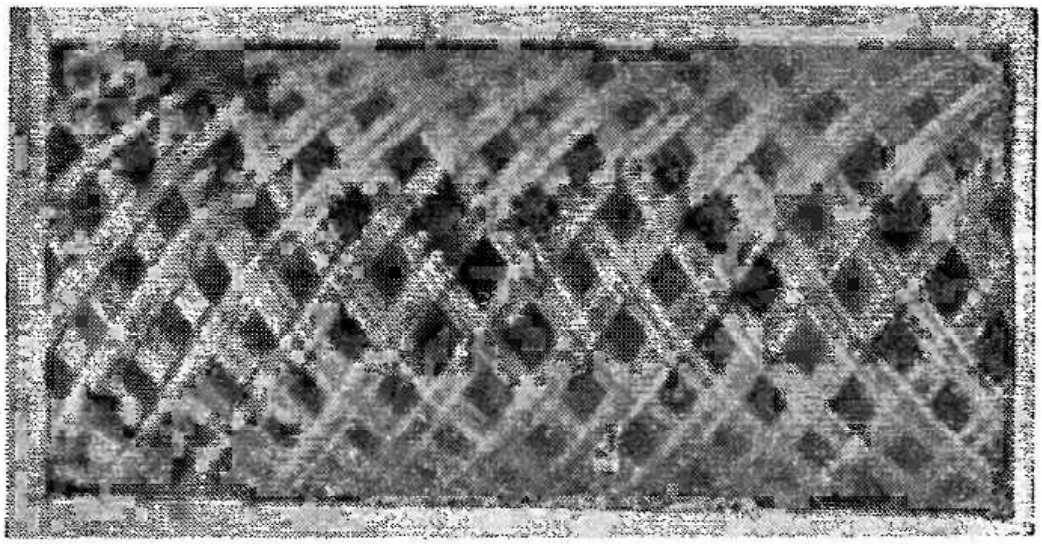


Рис. 42. Фильтр из стеклопластика с ромбической формой отверстий

Такой фильтр состоит из внутреннего стеклопластикового каркаса, водоприемной поверхности из стеклонитей и наружного стеклопластикового каркаса. Вместо стекложгутов, используемых в качестве водоприемной поверхности, можно использовать фильтровальные синтетические ткани.

В некоторых случаях, если размеры отверстий опорного каркаса велики (диагональ 25 мм и более), для предупреждения продавливания стеклонитей или стеклоткани наматывается винтообразная стеклопластиковая спираль с шагом 8—12 мм. Все перечисленные операции осуществляются на специальном оборудовании с помощью одной установки.

В рассмотренной конструкции фильтра внутренний опорный каркас принимает давление горных пород и служит основой для устройства на нем водоприемной поверхности.

Фильтры из стеклопластика соединяются следующим образом: в оба торца трубы на клею запрессовывают металлические патрубки с наружной и внутренней резьбами.

При испытании образца дырчатого фильтра длиной 770 мм, изготовленного из шести жгутов, в 30 сложений каждый при числе слоев 19, в результате приложения растягивающих сил вдоль оси фильтра среднее разрушающее усилие составляло 1780 кгс, а при сжатии — 1720 кгс.

Фильтры, образованные продольно-поперечной намоткой. Из стеклопластиков при продольно-поперечной намотке могут изготовляться фильтры с отверстиями в виде щелей, перпендикулярных к оси или параллельных ей. В настоящее время при изготовлении щелевых фильтров из металла отверстия выполняются фрезерованием, штамповкой, автогенной резкой и электроэрозионным способом.

Сущность продольно-поперечной намотки состоит в том, что на оправку одновременно наматываются как продольные, так и поперечные стеклонити, предварительно пропитанные связующим.

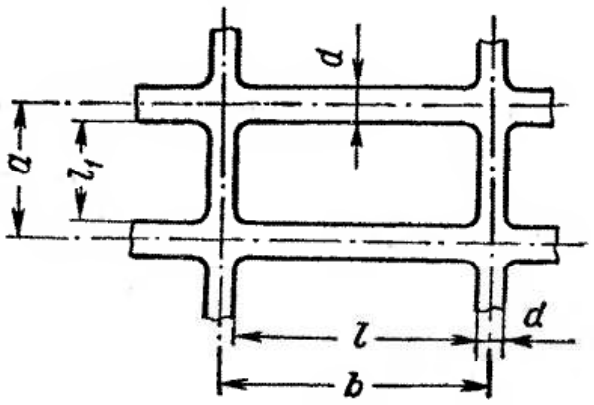


Рис. 43. Схема фильтра из стеклопластика с продольными щелями:

a — шаг поворота оправки; *в* — расстояние по оси между поперечными стекложгутами; *d* — ширина стекложгута; *l* и l_1 — ширина просвета образованной щели

Причем во время возвратно-поступательного движения нитеводителя оправка не вращается. Поворот ее происходит в момент нахождения нитеводителя в крайних положениях. Угол поворота оправки определяет величину паза вдоль оси, в то время как расстояния между поперечными стеклонитями определяют величину поперечных пазов.

Продольные стеклонити крепятся с помощью специальных коронок, надетых на края оправки.

На рис. 43 изображена ячейка каркаса фильтра, полученная указанным способом.

Сочетая продольно-поперечную намотку с косой перекрестной, можно изготовлять стеклопластиковые каркасно-стержневые фильтры. В таком фильтре каркас образован продольно-поперечной намоткой, а затем методом косой перекрестной намотки на каркас наматывается стеклопластиковая спираль.

Следует заметить, что при намотке проволочной спирали металлический каркас испытывает сжимающие усилия, которые в дальнейшем складываются с давлением горных пород. При намотке стеклопластиковой спирали на стеклопластиковый каркас такого явления не происходит, так как спираль наматывается до снятия каркаса с оправки. В данном случае силы натяжения стеклонитей воспринимаются оправкой, в то время как нормальное давление стеклонитей на каркас лишь усиливает адгезионные свойства материала.

В заключение следует заметить, что перечисленные конструкции стеклопластиковых фильтров, имитирующие существующие, не исчерпывают всех возможностей указанных способов, на основе которых могут быть созданы принципиально новые конструкции.

В настоящее время в лаборатории ВЭИ им. В. И. Ленина (г. Харьков) по заказу Дрогобычского экспериментального механического завода специального оборудования, где выпускаются металлические фильтры, изготовлены опытные образцы фильтров из стеклопластика.

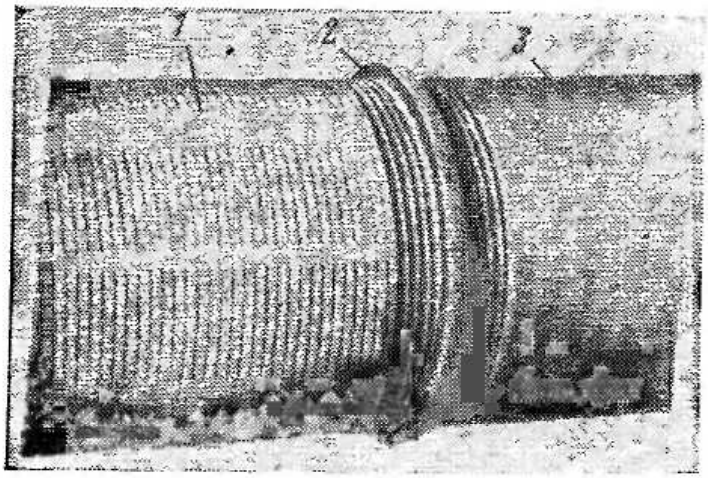


Рис. 44. Фильтр щелевой из стеклопластика:
1 — рабочая часть; *2* — соединительный ниппель; *3* — надфильтровая труба

Фильтры из стеклопластика на основе полистерола разрабатываются также фирмой «Нольд» [117]. Конструкция фильтра состоит из спирали и полос полистерола, армированных стекловолокном, витки которых образуют щелевые отверстия, расположенные горизонтально по окружности (рис. 44). Спираль стабилизируется при помощи восьми продольных полос шириной 30 мм, которые способны принимать на себя нагрузку. Витки спирали имеют V-образное сечение, расширяющееся внутрь фильтра. Спираль стеклопластика намотана с шагом в две нитки на 26 мм с глубиной канавки около 6 мм. Такая форма спирали стеклопластика придает конструкции особую прочность. Намотка стеклопластика по спирали позволяет разрезать фильтр в любом сечении и соединить его при помощи ниппеля.

В настоящее время фирмой «Нольд» освоен фильтр из стеклопластика следующих размеров.

Диаметр, мм:	
внешний	432
внутренний	415
Толщина стенки, мм	8,5
Ширина проходного отверстия, мм	1,8
Скважность, %	10,5
Масса 1 м, кг	13
Диаметр соединительного ниппеля, мм:	
внешний	470
внутренний	396
Масса ниппеля, кг	5,5
Масса заглушки для отстойника, кг	6
Нормальная длина звена фильтра, м	3

Фирма «Нольд» фильтры из стеклопластиков благодаря их высокой прочности считает более эффективными, чем фильтры из поливинилхлорида.

При всех положительных качествах данная конструкция фильтра, по нашему мнению, имеет недостаточный процент скважности и не может быть рекомендована для скважин высокой производительности.

Фильтры наборные из кольчатых стеклянных дисков

Устойчивость стекла против коррозии послужила основанием для разработки разнообразных конструкций фильтров для водозаборных скважин. Стекло обладает высокими механическими показателями. Для некоторых его сортов временное сопротивление сжатию достигает 7000—13 000 кгс/см^2, а сопротивление растяжению — 400—900 кгс/см^2.

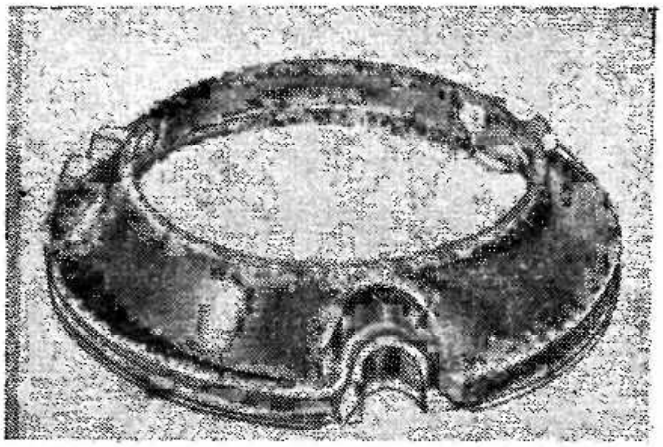


Рис. 45. Кольчатый стеклянный диск для набора щелевых фильтров

В практике водоснабжения известно [99] изготовление щелевых фильтров из стекла в форме кольчатых дисков (рис. 45). Рабочая часть фильтра составляется из этих дисков, собираемых при помощи анкерных болтов и металлических подпятников. Щели для прохода воды между дисками регулируются при сборке. Стеклянные диски изготовляли путем прессования с последующей шлифовкой их поверхности. Вследствие гладкой поверхности и инертности материала отложение осадков, выпадающих из воды, и их накопление в фильтрах происходило более продолжительное время, но вообще не исключалось. Такие фильтры устанавливали в крупнозернистых песках без обсыпки и в мелкозернистых с обсыпкой.

Отрицательными сторонами этих фильтров является их громоздкость и чувствительность к ударным нагрузкам.

Фильтры наборные из кольчатых пластмассовых дисков

Разработка пластмассовых фильтров из кольчатых элементов была начата в Московском гидромелиоративном институте (МГМИ) в 1959 г. В фильтрах этой конструкции отдельные элементы из пластмасс собираются на металлических стержнях, где между кольцами образуются проходные отверстия.

Были разработаны и исследованы фильтры-каркасы двух типов. Фильтры первого типа состоят из колец сложной формы, общий вид которых показан на рис. 46, а техническая характеристика приведена в табл. 34.

Таблица 34

Характеристика фильтров из наборных колец сложного профиля

Диаметр фильтра, мм		Ширина щели по внутреннему диаметру, мм	Скважность, %	
наружный	внутренний		по наружному диаметру	по внутреннему диаметру
100	60	1,5	70	15
150	110	1,5	70	15
170	120	1,5	70	15
200	150	1,5	70	20
250	200	1,8	50	20
290	226	1,8	50	20

Примечания: 1. Фильтры наружным диаметром 170 и 250 мм проверены в скважинах.
2. Длина звена 2500 мм.

При сборке колец в колонну образуется фильтр, представленный на рис. 47.

В мелкозернистых песках фильтр может работать как корзинчатый с обсыпкой его мелким гравием при движении воды сверху вниз (рис. 48, *а*).

В крупнозернистых песках и галечниках рекомендуется применять фильтр по схеме гравитационного типа, в котором движение воды совершается снизу вверх, когда образуется гравийная обсыпка из естественных пород (рис. 48, *б*).

Таблица 35

Характеристика фильтров из наборных колец простого профиля

Минимальный диаметр труб, рекомендуемый для установки фильтра, мм	Диаметр фильтра, мм		Ширина зазора между дисками по внутреннему диаметру, мм	Болты для стягивания		Скважность, %	
	внутренний	наружный		число	диаметр, мм	по наружному диаметру	по внутреннему диаметру
219	150 *	110	1,0	3	10	70	20
324	210	170	1,5	4	14	70	20
377	260	210	1,8	4	16	50	30
426	310 *	260	1,8	4	18	50	30

* Фильтры, проверенные в скважинах.

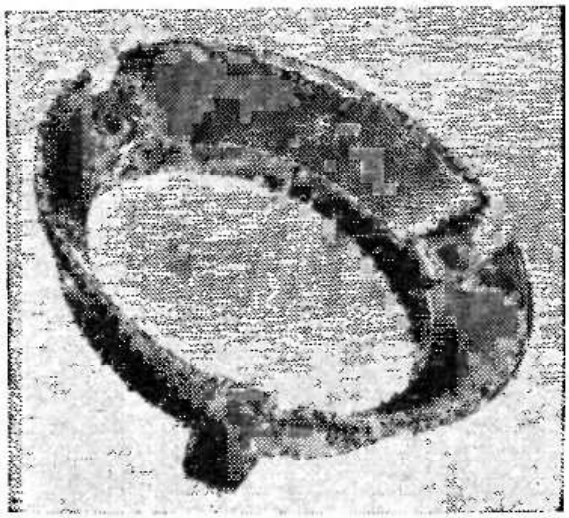


Рис. 46. Элемент сборного фильтра из пластмассовых колец

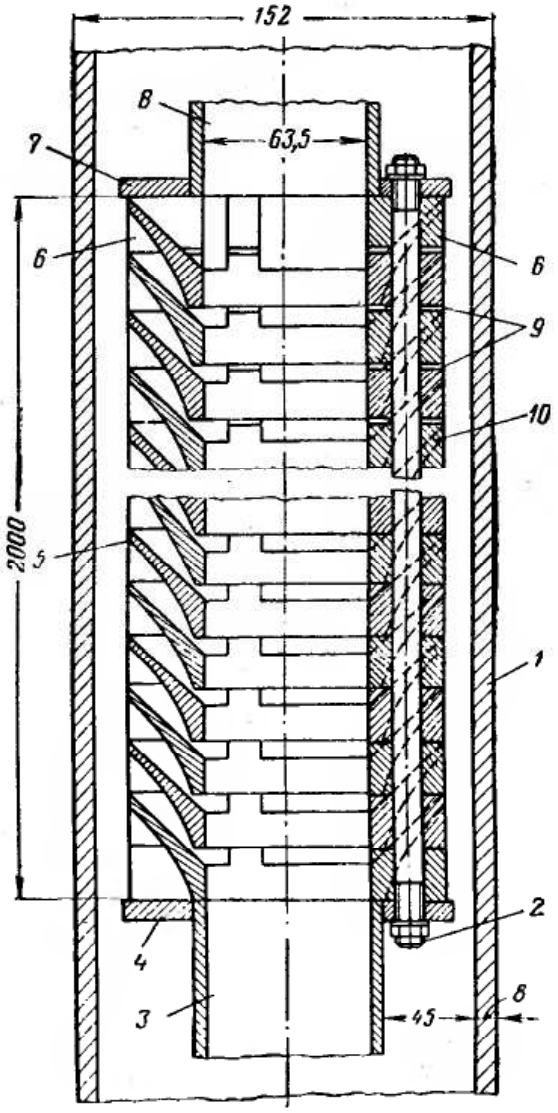


Рис. 47. Звено сборного пластмассового фильтра из кольчатых дисков сложного профиля:

1 — обсадная труба; *2* — болт; *3* — отстойник; *4*, *7* — нижний и верхний опорные фланцы; *5* — кольцо фильтра; *6* — вкладыш; *8* — надфильтровая труба; *9* — прокладки; *10* — опорные площадки

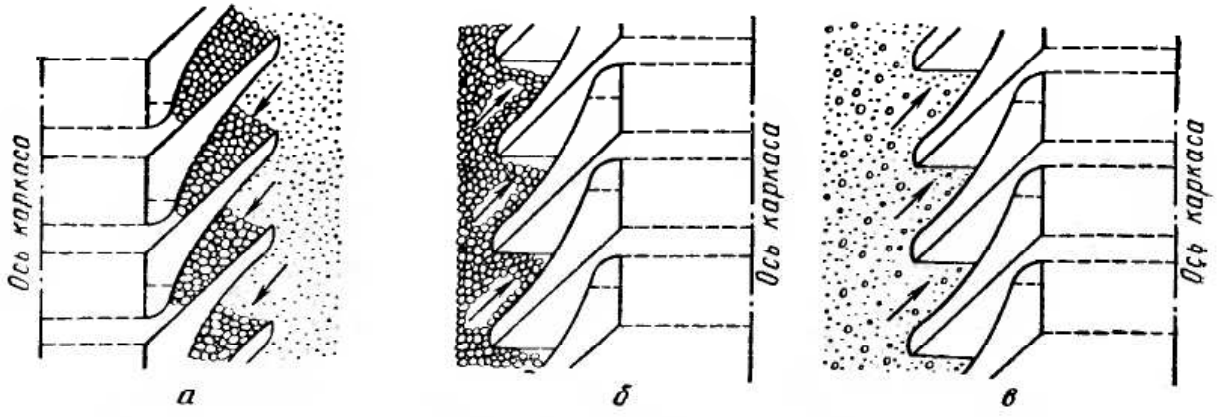


Рис. 48. Схема установки фильтра из пластмассовых дисков

В мелкозернистых грунтах и в водах неустойчивого химического состава фильтр устанавливают как обычный щелевой с искусственным контуром гравийной обсыпки, которая позволяет увеличить проходные отверстия (рис. 48, *в*).

В МГМИ разработана конструкция фильтра из наборных горизонтальных колец, подобно фильтрам французской фирмы «С. Н. Мареп», лишь с той разницей, что во французской конструкции проходная щель расширяется от внешней поверхности к внутренней, тогда как в фильтрах МГМИ проходные отверстия имеют на внешней поверхности скважность, превышающую внутреннюю в 2—3 раза. Фильтр этой конструкции в разрезе представлен на рис. 49, а техническая характеристика дана в табл. 35.

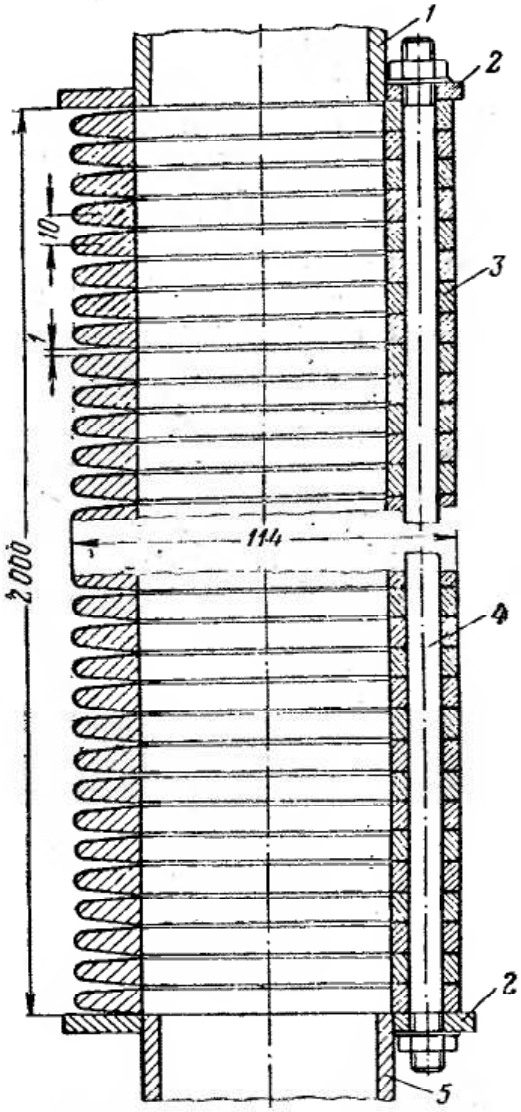


Рис. 49. Разрез сборного фильтра из колец простого профиля:
1 — надфильтровая труба; *2* — фланцы; *3* — кольца; *4* — болт; *5* — отстойник

Для изготовления фильтров из наборных колец, предназначенных для скважин питьевого водоснабжения, в МГМИ применялись пластические и синтетические материалы, которые не влияют на качество воды. Например, пластмассовые фильтры, каркасы которых изготовляли из волокнита и декоррозита, допущены Минздравом СССР для скважин хозяйственно-питьевого назначения.

Конструкции фильтров МГМИ проходили производственную проверку в эксплуатационных скважинах в течение 8 лет на различных объектах: в Латвийской ССР, Армянской ССР, в Голодной степи и других, где была подтверждена их эффективная работа.

К недостаткам фильтров этой конструкции относятся:

1) меньшая скважность по сравнению со штампованными щелевыми и каркасно-стержневыми фильтрами;

2) сужающаяся форма проходных отверстий от внешней поверхности фильтра к внутренней не является совершенной и будет способствовать большому заклиниванию проходных отверстий частицами песка;

3) меньшие дебиты скважин по сравнению с дебитами скважин, оборудованных каркасно-стержневыми фильтрами.

Фильтры сборные из пластин полипропилена

Институт инженерной геологии в Брно (ЧССР) разработал конструкцию фильтров из сборных элементов — пластин полипропилена, которые собираются в колонну необходимого диаметра. Элемент такого фильтра показан на рис. 50. Каждый элемент фильтра сферической формы имеет длину 155 мм, ширина пластины в зависимости от диаметра 15—27 мм, толщина 2 — 3 мм. На концах элемента имеется два соединительных кольца с отверстиями диаметром 13 мм для пропуска анкерных болтов диаметром 12 мм. Общий вид конструкции в собранном виде дан на рис. 51.

При сборке фильтров из пластин получаются каркасы многогранной формы, которая при увеличении диаметра и числа пластин приближается к окружности.

Характеристика этих фильтров приведена в табл. 36.



Рис. 50. Элемент сборного фильтра из пластин полипропилена

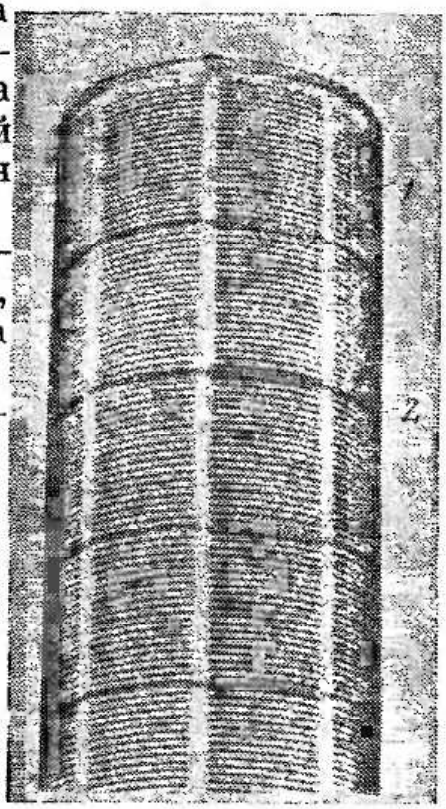


Рис. 51. Общий вид щелевого фильтра из пластин полипропилена:

1 — фильтрующая поверхность из сборных элементов; *2* — металлическое кольцо жесткости

Ширина просвета между щелями регулируется при помощи толщины соединительных колец и штифтов-приливов, находящихся в средней части сборного элемента.

Конструкции фильтров должны, как правило, устанавливаться с контуром гравийной обсыпки.

К числу недостатков данной конструкции, по нашему мнению, следует отнести большое несоответствие ширины щели ее длине, например, 2 : 15 или 3 : 27. Практика подтверждает, что с увеличением пути фильтрации ухудшаются гидравлические показатели конструкции фильтров и в проходных отверстиях накапливаются осадки (механические и химические).

Таблица 36

Техническая характеристика сборных фильтров из пластин полипропилена

Диаметр, мм		Внутренний диаметр, обусловленный многогранностью фильтра, мм	Число пластин	Ширина пластины, мм
наружный	внутренний			
244	214	164	5	15
282	252	214	6	15
320	290	256	7	15
360	330	300	8	15
443	408	378	10	17
484	447	417	11	18
566	527	497	13	19
607	566	536	14	—
648	606	576	15	21
689	646	617	16	22
850	—	755	20	—
1100	1045	1010	26	27

Фильтры щелевые из фанерных труб, обработанные раствором смолы CHS-epox 300 AC

Фанерные фильтры со щелевой перфорацией изготовляются в ЧССР. Для повышения механической прочности и антикоррозийной стойкости эти фильтры обрабатываются раствором эпоксидной смолы марки 300 АС с добавкой саргена в специальных вакуумных установках [45].

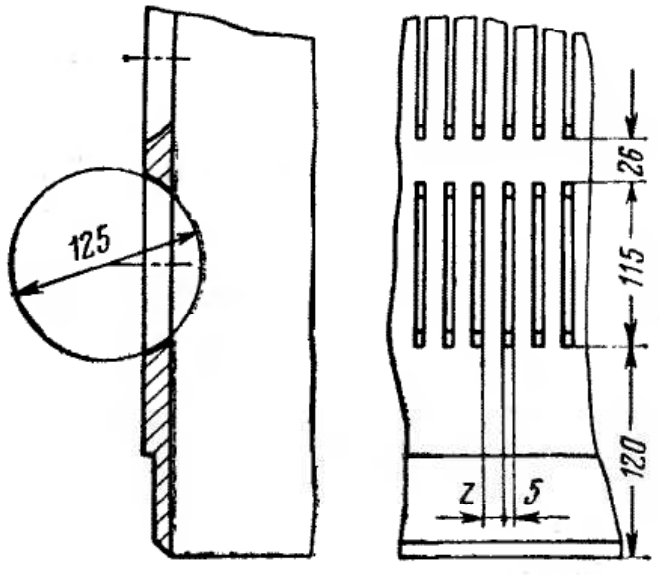


Рис. 52. Схема нарезки щелей на фанерных трубах

Основные параметры выпускаемых фильтров приведены в табл. 37.

Повышение прочности фанерных фильтров после обработки эпоксидной смолой проверялось на образце трубы диаметром 272/250 мм. Осевое давление составляло 24,5 и 42,1 кгс/см², а давление на изгиб — 2650 и 3890 кгс/м² соответственно до и после обработки.

Щели на фильтрах нарезаются дисковыми фрезами $d = 125$ мм по схеме, представленной на рис. 52.

Звенья фильтра собирают в колонну необходимой длины при помощи конусных соединений, растачиваемых на обоих концах фанерных труб и склеиваемых эпоксидной смолой.

Таблица 37

Характеристика фильтров из фанерных труб

Диаметр, мм		Ширина щели, мм	Перемычка между щелями, мм	Число щелей по окружности	Длина звена, мм	Масса 1 м, кг	Скважность, %
внешний	внутренний						
282	250	5	14,7	45	1750	26,5	18,4
332	300	5	14,7	53	1750	32,0	18,3
402	370	5	14,7	64	1750	42,0	18,2

В зависимости от гранулометрического состава пород фильтры устанавливаются с гравийной обсыпкой или без нее. В ЧССР эти фильтры в большинстве случаев устанавливаются с контуром однослойной и двухслойной гравийной обсыпки.

§ 7. ФИЛЬТРЫ ГРАВИЙНЫЕ

Проблема увеличения водоотбора и долговечности службы водозаборных скважин, стоящая в настоящее время во всех странах, связана с внедрением фильтров гравийного типа. Гравийные фильтры получают всеобщее признание, в связи с чем совершенствуются как конструкции, так и методы сооружения скважин, оборудованных ими.

К гравийным относятся фильтры, у которых поверхность, контактирующая с водоносной породой, состоит из искусственно вводимого гравия, расположенного вокруг опорных фильтровых каркасов, из щелевых труб, проволочных, стержневых и др.

Гравийную обсыпку следует рассматривать как средство увеличения радиуса фильтра скважины, улучшения фильтрационных свойств пород в прифильтровой зоне и как конструктивный элемент, позволяющий увеличивать размер проходных отверстий, а следовательно, и скважность фильтровых каркасов. С применением обсыпки снижаются входные скорости и удлиняется срок службы фильтров.

При эксплуатации подземных вод используют гравийные фильтры двух видов: опускные, которые устанавливают в скважины в готовом виде, и создаваемые внутри скважин путем засыпки или закачки гравия на забой по межколонному пространству.

Подразделение гравийных фильтров на две основные группы дает только общее представление о методах устройства и установки фильтров в скважины. В настоящее время в этих группах появились свои конструктивные особенности.

В табл. 38 приведена классификация фильтров гравийного типа.

Таблица 38

Классификация фильтров гравийного типа

Фильтры гравийные с однослойной или многослойной обсыпкой, собираемые на поверхности земли			Фильтры гравийные, создаваемые на забое скважины		
			с однослойной обсыпкой		с многослойной обсыпкой
корзинчатые	кожуховые	блочного типа	обсыпка тонкослойная толщиной 40—50 мм	обсыпка расширенного контура толщиной 100—200 мм и более	
Ввиду малой производительности и сложности установки массового применения не получили	Изготовляются на основе стальных щелевых труб и сеток, деревянных труб и сеток, стальных труб и штампованной листовой стали, винипластовых труб и сеток, металлических каркасов из стержней, сеток, изготовляемых на основе синтетических материалов (полиэтилена, полистерола и и др.)	Изготовляются из гравия на основе связи его частиц следующими веществами: сульфит-спиртовой бардой, цементом, клеем БФ-4, битумом, лаком бакелитовым, жидким стеклом, резиновым клеем, эпоксидной смолой	Обсыпка производится по межтрубному пространству при свободном падении частиц на забой	Обсыпка производится следующими способами: бурением скважин большого диаметра, прокачкой эрлифтом, бурением скважин эрлифтом, бурением скважин через фильтр, закачкой гравия на забой, методом обрушения	Сооружаются с помощью бурения скважин большого диаметра и вспомогательных колонн

Фильтры, создаваемые на поверхности земли

Фильтры кожуховые с гравийным заполнителем. К гравийным фильтрам, изготовляемым на поверхности земли, следует отнести корзинчатые, кожуховые и блочного типа. Из названия фильтров первых двух типов следует, что рыхлая гравийная обсыпка удерживается вокруг каркасов при помощи корзинок или кожухов.



Рис. 53. Кожуховый фильтр перед спуском в скважину

Из отечественного опыта бурения и эксплуатации скважин с корзинчатыми фильтрами на водозаборах в Вильнюсе, Воронеже, Мозыре и других было установлено, что эти конструкции малопроизводительны, быстро кольматируются; они сложны в производстве и при установке в скважины. По этим причинам такие фильтры не получили развития.

Фильтры, у которых гравийные обсыпки удерживаются при помощи кожухов, изготовляемых из металлических и синтетических сеток, применяются в нашей стране и за рубежом. Как правило, кожуховые фильтры устанавливаются для отбора воды из мелкозернистых песков и в этих случаях после спуска кожухового фильтра в скважину производится обсыпка второго слоя гравитационным способом. В некоторых случаях для глубоких скважин фильтры устанавливаются без дополнительной гравийной обсыпки. На рис. 53 показан такой фильтр перед спуском в скважину.

Основой для кожухового фильтра могут быть трубчатые опорные каркасы, из просечного листа, а также каркасно-стержневые.

Кожуховые фильтры устанавливались при строительстве дренажных скважин в Ульяновске, Каменке-Днепровской и в других местах.

Для устройства кожухов в нашей стране применяется строительная сетка из простой стали квадратного плетения с размером ячейки 1 × 1 или 2 × 2 мм и редко более. В практике строительства скважин в ГДР и ФРГ используются сетки из синтетических материалов, описание которых дано в § 2.

При больших диаметрах скважин глубиной до 100 м толщина засыпки гравия в кожухе может варьировать от 35 до 70 мм.

Фильтры блочного типа

При бурении скважин малых и средних глубин (до 100 м) успешно применяются гравийные фильтры с рыхлой обсыпкой, которая создается путем засыпки или закачки гравия в межтрубное пространство. В более глубоких скважинах с небольшим конечным диаметром, а также при вскрытии напорных водоносных горизонтов, самоизливающихся на поверхность земли, устройство таких гравийных фильтров затруднено, а в некоторых случаях невозможно.

Кроме того, производство рыхлых обсыпок требует необходимых технических навыков у буровых мастеров. Поэтому были созданы фильтры блочного типа, у которых гравийная обсыпка связана различными склеивающими и цементирующими веществами. Основная идея создания фильтров этой конструкции заключается в том, чтобы не производить операций по подбору фильтров и обсыпки, а устанавливать их в готовом виде. Изготовленные пористые блоки надевают или наклеивают на опорные каркасы из стальных или асбестоцементных труб и опускают в скважину в готовом виде.

Гравийные фильтры блочного типа должны отвечать следующим требованиям:

1) блоки, надеваемые на стальные каркасы, поскольку неплотно прилегают к плоскости трубы и, следовательно, воспринимают на себя горное и фильтрационное давление, должны сохранять необходимую прочность, или она может снижаться в такой степени, чтобы остаточная прочность была достаточной в течение срока работы сооружения;

2) склеивающие вещества должны быть устойчивыми по отношению к коррозии и эрозии, неизбежно возникающим при фильтрации воды различного химического состава;

3) склеивающие вещества не могут содержать в своем составе химических компонентов, вредных для здоровья человека, что необходимо строго учитывать при бурении скважин питьевого назначения;

4) фильтры блочного типа должны иметь достаточные размеры пор и пористость, обеспечивающие необходимый приток воды к скважине.

Гравийные фильтры блочного типа могут быть двух видов: монолитные и пустотелые. Монолитные фильтры имеют сплошное гравийное заполнение: фильтрация воды через него происходит по периметру, а выходит вода через верхний торцовый конец. В пустотелых фильтрах блочного типа фильтрация воды происходит по периметру через гравийное кольцо, а выходит вода через ствол, образованный пустотелыми блоками по всей длине фильтра, либо через трубчатый каркас, на который надеты блоки.

В нашей стране для связи гравийных частиц в блоки применялись различные склеивающие и цементирующие вещества: клей резиновый, силикатный, БФ-2, БФ-4, бакелитовый лак марки А, битум, цемент, эпоксидная смола и другие вещества.

В настоящем разделе не рассматриваются подробно конструкции фильтров блочного типа по двум причинам: во-первых, потому что эти конструкции детально были ранее описаны в литературе [33], а во-вторых, потому что они не получили массового применения при оборудовании буровых скважин на воду.

В результате лабораторных и полевых исследований выявились основные причины неудовлетворительной работы фильтров блочного типа.

1. Введение склеивающих веществ в массу гравия приводит к образованию тупиковых пор, в связи с чем в блоках задерживаются мелкие частицы водоносных пород, что резко повышает входные сопротивления в фильтрах и снижает производительность скважин. Это особенно резко проявляется в фильтрах, изготовленных из мелкого гравия и песка.

2. Образование механического и химического кольматажа на внешней поверхности фильтров и химического кольматажа на внутренней поверхности вследствие проникновения продуктов коррозии, образующихся при разрушении стальных опорных каркасов [35].

3. Скважины, оборудованные фильтрами блочного типа, по сравнению со скважинами, оборудованными фильтрами с рыхлой гравийной обсыпкой, менее производительны и менее устойчивы к процессам химического зарастания и кольматажа.

4. Фильтры блочного типа при восстановлении производительности скважин с помощью взрыва детонирующего шнура разрушаются. При кислотных обработках гравийных фильтров с использованием клея БФ-2 и БФ-4 резко понижается механическая прочность блоков. При кислотных обработках фильтров блочного типа (керамических и клеевых) восстановление производительности менее эффективно по сравнению со скважинами, оборудованными фильтрами с рыхлым контуром гравийной обсыпки.

5. Значительные повреждения при перевозках. В некоторых организациях бой фильтров достигал 40—60%. При установке

фильтров в зимнее время наблюдались повреждения блоков вследствие замерзания и расширения воды в порах.

Все указанное выше привело к тому, что в настоящее время производство фильтров блочного типа и их внедрение в практику бурения в нашей стране повсеместно прекращено, однако за рубежом эти конструкции применяются.

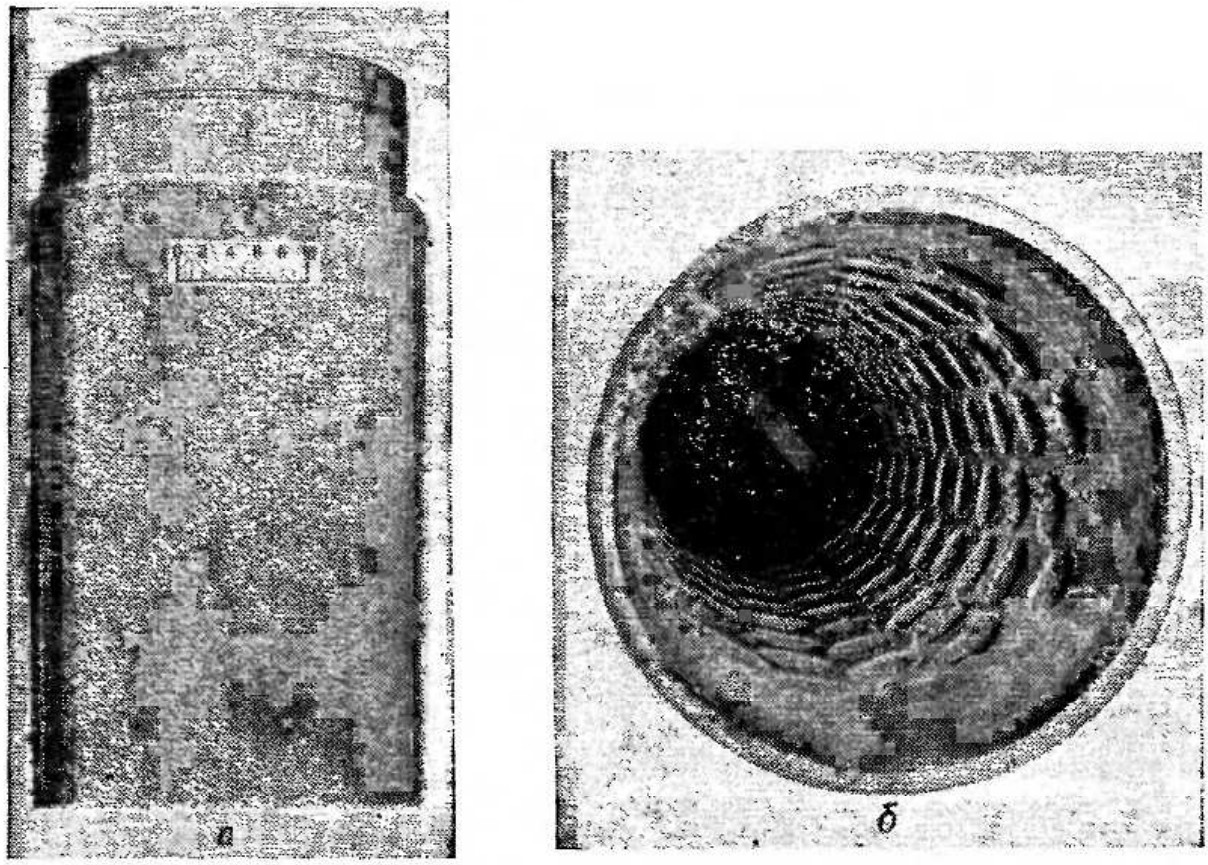


Рис. 54. Общий вид фильтра «Бистрал»:
а — внешний контур; *б* — внутренний контур

За последние годы в ряде стран: Югославии, ГДР, ФРГ, Австрии, Чехословакии — получили распространение фильтры, у которых опорные каркасы выполнены из стального штампованного листа с антикоррозионным покрытием либо из перфорированных асбестоцементных труб с жесткими гравийными обсыпками. На поверхности этих каркасов гравийная или песчаная обсыпка удерживается при помощи различных цементирующих или склеивающих веществ.

По предложению различных авторов, фильтры из пористой керамики, бетона и другие должны сочетать одновременно опорный каркас и фильтрующую обсыпку; они устанавливаются в скважинах без дополнительной гравийной обсыпки. Согласно рекомендациям западных фирм, фильтры с гравийной оболочкой следует устанавливать в скважинах большого диаметра под защитой контура рыхлой гравийной или песчаной обсыпки. Такие конст-

рукции фильтров и способы их установки резко изменяют условия работы фильтров, так как гравийная оболочка в этих условиях не контактирует с водоносной породой, а выполняет роль второго опорного слоя из гравия. Наружная рыхлая гравийная обсыпка предохраняет гравийную оболочку от механического, а отчасти химического кольматажа, что создает более благоприятные условия работы фильтров.

В Югославии, ГДР, ФРГ такие фильтры устанавливают при бурении скважин больших диаметров (800—1000 мм) с контуром рыхлой гравийной обсыпки толщиной 200—250 мм на сторону.

Асбестоцементные фильтры «Бистрал». Югославский завод асбестоцементных изделий «Салонит» в 1965 г. освоил выпуск фильтров блочного типа на основе асбестоцементных труб и гравия, связанного между собой и с каркасом цементом [40]. Отличие фильтров этой конструкции от известных заключается в том, что в исходных материалах почти полностью удалена известь и, следовательно, повышена их антикоррозийная устойчивость к разрушению. При изготовлении фильтров из обычного пористого бетона остаточное содержание извести составляет 17%, в то время

Таблица 39

Характеристика фильтров «Бистрал» на основе асбестоцементных труб с контуром гравийной обсыпки

Внутренний номинальный диаметр, мм	Класс труб				
	В—легкий		С—тяжелый		
	Внешний диаметр, мм	Масса 1 м, кг	Внешний диаметр, мм	Масса 1 м, кг	№ гранулометрического состава гравийной оболочки
100	165	17,9	165	18,9	1—4
150	204	25,0	212	30,6	
200	260	37,5	270	44,8	
250	312	48,0	322	58,9	1—6
300	366	61,6	376	77,2	
350	416	76,9	430	97,8	
400	474	93,6	492	124,1	
500	582	131,5	604	177,6	
600	690	175,5	716	240,2	
800	872	295,0	908	416	
1000	1090	436	1122	608,5	

Примечания: 1. Фильтры поставляются длиной 2 м.

2. Гранулометрический состав гравийных оболочек в зависимости от номера имеет следующий размер в мм:

№ 1—0,8—1,2
№ 2—1,2—2,0
№ 3—2,0—3,0
№ 4—3,0—5,0
№ 5—5,0—7,0
№ 6—7,0—10,0

как при автоклавном производстве фильтров с использованием силикатных цементов ее содержание не превышает 0,5%.

Технология производства фильтров «Бистрал» заключается в следующем: на перфорированную асбестоцементную трубу с диаметром отверстий 46 мм при скважности опорного каркаса 31—45% наносится слой гравия, частицы которого связаны между собой и с каркасом цементным раствором. После сушки в автоклавах фильтры готовы к употреблению. Общий вид фильтра из асбестоцементных труб показан на рис. 54, а техническая характеристика приведена в табл. 39.

Фильтры соединяются в колонну, а также с трубами и отстойником при помощи гладких асбестоцементных муфт, укрепляемых на трубах при помощи троса. Последний укладывается в полуканавки, выточенные в теле трубы и муфты, как показано на рис. 55.

Для уплотнения стыка, а также снижения напряжения в торцах соединяемых труб в теле муфты укладываются Т-образные резиновые прокладки. Как показали испытания, прочность на сжатие этих соединений достигает 4500 кгс/см^2 для труб диаметром 150 мм и 3100 кгс/см^2 для труб диаметром 400 мм.

Асбестоцементные трубы и фильтры применяли в следующих условиях:

в водопонизительных скважинах при разработке угольных месторождений;

в скважинах, эксплуатирующих минеральные воды и рассолы;

при оборудовании водозаборных скважин;

при строительстве дренажных сооружений;

при устройстве пьезометров для наблюдений за режимом подземных вод;

при оборудовании скважин для эксплуатации термальных, минерализованных вод.

Как правило, фильтры «Бистрал» устанавливают в скважинах большого диаметра с последующей обсыпкой фильтра гравием. Для обеспечения равномерного кольцевого зазора между фильтром и незакрепленной стенкой скважины предусмотрены направляющие фонари, выполненные из полосовой стали размером 80 × 6 мм, крепление которых показано на рис. 56.

При бурении дренажных скважин на месторождении легнита применяли станки «Вирт-L—300» (ФРГ), которые позволяли бурить скважины диаметром 1000 мм на глубину 400 м. При установке блочных фильтров диаметром 376/300 под защитой гравийной обсыпки толщиной около 300 мм на сторону расход гравия на одну скважину составлял около 290 м^3. На глубину 400 м фильтры обсыпали сортированным гравием D_{50} = 1,5 мм и D_{10} = = 0,8 мм гравитационным способом, что давало достаточно удовлетворительные результаты. При откачке скважин эрлифтами и погружными насосами пескования не наблюдалось.

Фильтры с гравийной оболочкой. Фирмы «Хагуста» и «Нольд» (ФРГ) выпускают фильтры блочного типа с гравийной обсыпкой

на основе связи гравия композициями из эпоксидных смол [105]. Основу фильтров составляют асбестоцементные трубы с круглой перфорацией диаметром 50—60 мм, либо стальные трубы с щелевой перфорацией, имеющие антикоррозийные покрытия на основе латексов или полиамидных смол.

Такие фильтры изготовляют по следующей схеме. В перфорированный каркас для предупреждения просыпания гравия внутрь

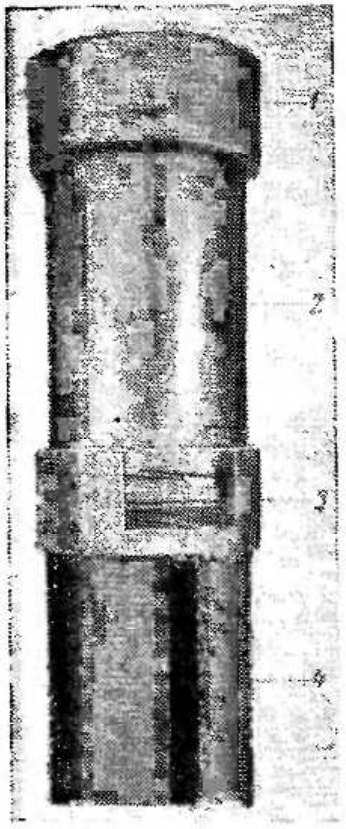


Рис. 55. Схема соединения асбестоцементных труб и фильтров в колонну:

1 — муфта гладкая; *2* — надфильтровая труба; *3* — муфта в разрезе с тросами для крепления; *4* — фильтр из пористого бетона

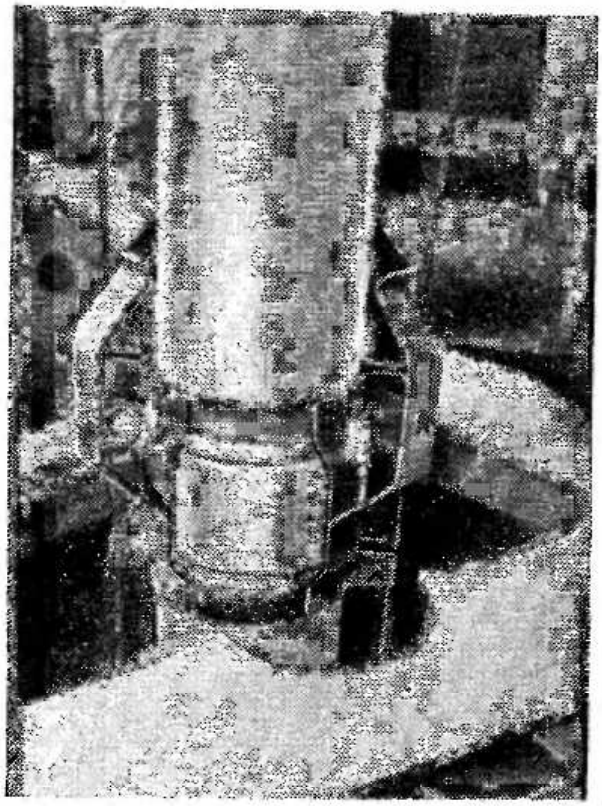


Рис. 56. Установка фонарей (центраторов) на асбестоцементных фильтрах

фильтра вставляются специальные раздвижные оправки с подвижными штифтами, которые крепятся в кольцевые ряды отверстий с таким расчетом, чтобы штифты не доходили до наружной поверхности фильтра на 2—5 мм. После окончания сборки элементов оправки внутрь ее вставляется пластиковый баллон, который раздувается сжатым воздухом. Подготовленный таким образом каркас фильтра вставляется в металлический кожух, диаметр которого больше диаметра опорного каркаса фильтра. Вся эта система устанавливается на поддон виброплощадки. Гравий,

смешанный с полимером, засыпается в межтрубное пространство и уплотняется при вибрации, образуя гравийную обсыпку толщиной 23 мм на сторону. Виброустановка находится в шахте, куда подводится тепло около 130° С, в результате чего ускоряется процесс полимеризации. Для предупреждения склеивания вспомогательного кожуха с обсыпкой последний покрывается предохранительной смазкой. Сведения по асбестоцементным фильтрам с гравийной оболочкой приведены в табл. 40.

Таблица 40

Масса фильтров с гравийной обсыпкой на основе асбестоцементных труб

Наименование элементов	Номинальный диаметр труб, мм						
	150	200	300	400	500	600	800
1 м труб	20,8	28,5	54,0	89,1	137,0	162,8	232,1
1 м труб с гравийной обсыпкой на эпоксидной смоле	36,3	47,5	82,0	119,1	219,8		299,1
Заглушка из асбестоцемента для отстойников фильтров	5,0	7,0	16,0	47,2	56,5	81,4	100,1

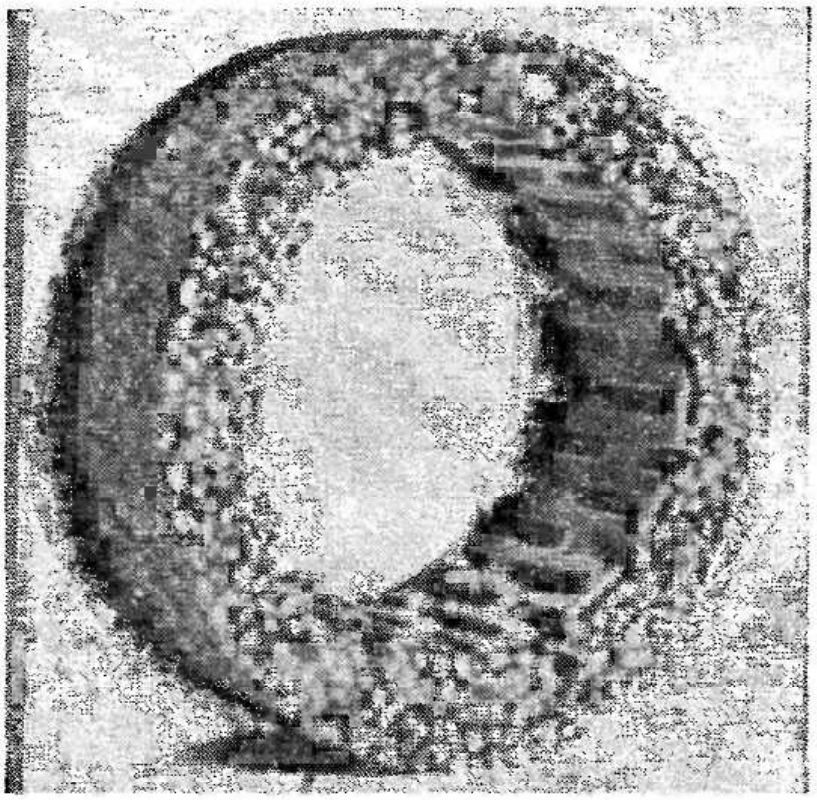


Рис. 57. Фрагмент фильтра с гравийной оболочкой на штампованном щелевом фильтре с рильсановым покрытием

Таблица 41

Фильтры с гравийной обсыпкой на эпоксидной смоле с каркасами из штампованных щелевых сварных труб

Размеры, мм	Номинальный диаметр фильтра, мм													
	80	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	1000
Муфтовые соединения														
Внутренний диаметр	76	96	146	196	244	294	344	394	440	—	—	—	—	—
Диаметр по внешнему контуру обсыпки	126	146	196	248	298	348	398	448	498	—	—	—	—	—
Длина соединительных патрубков		115				140								
Фланцевые соединения														
Внешний диаметр по фланцам	162	182	232	282	332	382	432	482	—	582	682	782	882	1082
Внутренний диаметр	76	96	146	196	246	296	346	396	—	496	596	696	796	996
Диаметр по внешнему контуру обсыпки	126	146	196	248	298	346	398	448	—	554	654	754	854	1054

Примечание. Длина звена фильтра 2500 мм.

Фильтры данной конструкции выпускаются звеньями длиной 1,25—2,50 м.

При нанесении слоя гравийной обсыпки (оболочки) на металлические щелевые фильтры с проходными отверстиями открытого типа внутрь каркаса вставляется резиновый или пластиковый баллон без оправок, в который накачивается воздух, что предупреждает просыпание гравийной массы внутрь фильтра. Фильтры с гравийной оболочкой на стальных штампованных каркасах выпускаются двух типов: с фланцевыми и муфтовыми соединениями. Сведения о фильтрах даны в табл. 41.

Фирма «Нольд» выпускает фильтры блочного типа с гравийной и песчаной обсыпками на основе связи частиц эпоксидными смолами и штампованными щелевыми каркасами.

В отличие от фильтров фирмы «Хагуста», в которых стальные каркасы защищаются латексами электрофоретическим способом, в фильтрах фирмы «Нольд» антикоррозионная защита стальных каркасов осуществляется за счет рильсанового покрытия [1]. Характеристика фильтров этой конструкции помещена в табл. 42, а фрагмент фильтра показан на рис. 57.

Таблица 42

Фильтры с гравийной обсыпкой на эпоксидной смоле с каркасами из штампованных щелевых сварных труб

Размеры, мм	Номинальный диаметр фильтра, мм											
	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	1000
Внутренний диаметр	98	148	192	248	298	348	391	498	598	698	786	998
Толщина:												
просечного стального листа	2,5	2,5	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6
стального листа с антикоррозийным покрытием	4	4	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	5,5	6,5	6,5	7,5	7,5
слоя гравийной обсыпки	18	18	18	18	18	18	18	20	20	20	20	22
Внешний диаметр фильтра:												
с гравийной обсыпкой	144	194	239	295	345	396	438	551	653	753	848	1059
с муфтовым соединением	119	176	222	276	333	383	426	—	—	—	—	—
с фланцевым соединением	168	219	264	320	370	422	465	593	695	795	885	1115
Масса 1 м фильтра, кг	16,5	27	34	42	50	57	65	89	104	120	137	173

[1] Подробно изложено в разделе по защитным покрытиям.

Фильтры, создаваемые на забое скважин

В отличие от гравийных фильтров, которые изготовляются на поверхности земли и опускаются в скважины в готовом виде, применяются гравийные фильтры, сооружаемые на забое скважин. Существует два способа сооружения фильтров таких конструкций.

1. Способ гравитации, при котором гравий осаждается вокруг фильтра при свободном падении частиц на забой в межтрубном пространстве под действием сил тяжести.

2. Способ принудительного осаждения гравия путем закачки его на забой потоком промывочной жидкости с использованием различных приспособлений.

Обычно гравитационный способ применяется в скважинах, глубина которых не превышает 100 м. При установке фильтров на эксплуатационной колонне впотай толщина гравийной обсыпки обычно невелика и находится в пределах 50—75 мм. Такие скважины очень часто сооружаются в сельскохозяйственном водоснабжении. За нижний предел принимается толщина обсыпки 50 мм, так как при меньшей разнице между диаметрами фильтровой и обсадной колонн гравийные обсыпки могут быть не надежными.

Как показывает практика, при искривлении ствола, некачественной сортировке гравия, нарушении режима засыпки, при возможности его расслоения в зависимости от величины столба воды в скважине, степени неоднородности гравия, формы окатанности его частиц очень часто скважины с тонкослойными обсыпками пескуют.

Для сооружения гравийных обсыпок в глубоких скважинах небольших диаметров гравитационный способ не применим по следующим причинам:

при свободном падении гравия не всегда удается получить достаточно уплотненные фильтры, что может вызвать длительное пескование скважин и обрушение пород в фильтровой области;

при недостаточном зазоре между рабочей и фильтровой колоннами и большой глубине скважины возможно заклинивание труб гравием и образование висячих гравийных пробок выше фильтра.

В мелкозернистых породах, а также в породах, представленных среднезернистыми фракциями, но при наличии вод, склонных к выделению солей на фильтрах, необходимо применять двухслойную и реже трехслойную обсыпки. В описанных выше условиях гравийная обсыпка улучшает фильтрацию как в призабойной зоне, так и в самом фильтре.

Допустим, что водоносный горизонт представлен песками с преобладающим диаметром частиц 0,1 мм, воды этого горизонта имеют неустойчивый химический состав. Если соотношение диаметра зерен гравийной обсыпки и диаметра невымываемых частиц равно 1 : 10, размер зерен гравийной обсыпки должен составлять 1 мм. Для предупреждения вымывания гравийной обсыпки

толщиной 50—75 мм размер щелей на фильтре должен быть 0,9—1 мм. В данном случае в полной мере обеспечивается нормальная работа фильтров без пескования и разрушения гравийной обсыпки. Однако узкие щели и мелкие поры в гравийной обсыпке подвержены зарастанию в короткое время.

Поэтому необходимо применять фильтры с двойным слоем гравийной обсыпки. Приняв для расчета слоев засыпки то же соотношение (1 : 10), получим диаметр фракций второго слоя 10 мм, что позволяет увеличить размер щелей на фильтрационной поверхности в 10 раз. Введение второго контура обсыпки в этом случае диктуется не механическими, а физико-химическими факторами.

Если вода нестабильного состава и в процессе эксплуатации из нее выпадают соли, необходимо стремиться к увеличению размера пор гравийных засыпок и размера проходных отверстий фильтра, что может быть достигнуто путем сооружения фильтров с двухслойными или трехслойными обсыпками.

Применение многослойных обсыпок усложняет и удорожает сооружение скважин. Кроме того, при небольшой разнице в диаметрах труб обсыпки получаются тонкослойными, малонадежными. Некоторыми теоретическими и лабораторными исследованиями подтверждено, что суффозионный вынос пород через обсыпки мало зависит от их толщины, в частности, для успешной работы фильтра слой гравия 38—50 мм является достаточным. Однако наблюдениями установлено, что производительность фильтров и устойчивость их от зарастания во времени будут тем большими, чем больше толщина гравийной обсыпки. Это положение согласуется с данными работы нефтяных скважин и подтверждается теоретическими исследованиями В. Н. Щелкачева [96].

Наблюдения и исследования, проведенные во ВНИИ ВОДГЕО, также подтверждают, что при увеличении объема и контура обсыпки эффективность применения обсыпок разнозернистого состава увеличивается, а опасность суффозионного выноса уменьшается. С учетом этого рекомендуется принимать минимальную толщину слоя обсыпки 50 мм, стремясь по возможности увеличивать контур гравийной обсыпки.

Исходя из анализа указанных выше причин неудовлетворительной работы фильтров с тонкослойными обсыпками, стремятся сооружать скважины с однослойной обсыпкой гравия уширенного контура. В настоящее время это достигается различными техническими методами и приемами.

Наиболее успешно скважины с гравийными фильтрами сооружаются при роторном способе бурения с обратной промывкой забоя чистой водой. В отечественной практике при этом способе бурения достигнута глубина 200—250 м при диаметрах скважин 750—1000 мм, а толщина обсыпки гравия нередко достигает 200—300 мм на сторону, что расширяет возможность устройства гравийной обсыпки гравитационным способом.

При бурении в Югославии скважин диаметром 1000 мм с фильтром диаметром 380 мм гравий с $k_н = 2$ засыпался в скважины глубиной 385 м без заметных признаков расслоения. После прокачки скважины работали без выноса песка.

За последние годы во многих организациях, например трестах Союзшахтоосушение, Востокбурвод, Промбурвод, Курсксельхозводстрой и других, при бурении скважин диаметрами 250—400 мм увеличивают контур гравийной обсыпки на участке установки фильтров при помощи механических и гидравлических расширителей, а также путем интенсивной прокачки скважины эрлифтом при одновременном нагнетании воды за контур фильтра с подачей гравия на забой. Эти способы полностью себя оправдали при сооружении водопонизительных скважин на Белозерском железорудном месторождении, а также при бурении скважин глубиной 800 м для водоснабжения Харькова.

В целях борьбы с пескованием скважин и увеличения контура обсыпки, а следовательно, и повышения производительности скважин известны и были запатентованы методы бурения вспомогательных скважин вокруг центральной для последующей засыпки в них гравия.

Такие скважины были пробурены на Украине, но дебит существенно не увеличился. Наибольшее число скважин (55) такой конструкции пробурено ударным способом трестом Промбурвод на Киевском водозаборе в Курске, где отмечено некоторое увеличение дебита. Однако эффективность этих конструкций может быть оценена только, когда будут закончены опытные работы на этом водозаборе.

Сведения по гравийным фильтрам, создаваемым на забое скважин, даны в несколько сжатой форме с учетом того, что этот материал с конкретным указанием технических приемов будет изложен в специальном разделе по сооружению гравийных фильтров.

§ 8. КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОД И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ФИЛЬТРЫ

Под коррозионными свойствами подземных вод следует понимать воздействие вод на материалы, из которых изготовлены конструктивные элементы фильтров, вызывающее их разрушение [49].

В производстве фильтров применяются различные материалы: сталь, нержавеющая сталь, бетон, пластические массы и стеклопластики. В настоящее время большинство фильтров делают из металла, который разрушается под коррозионным воздействием воды. При этом необходимо различать два вида коррозии: электрохимическую, обусловленную действием микрогальванических пар, и биологическую, вызванную жизнедеятельностью бактерий.

Остановимся кратко на факторах, обусловливающих процессы коррозии. Кислая или щелочная среда воды определяется

концентрацией водородных ионов. При pH = 7 среда считается нейтральной, pH > 7 — щелочной и pH < 7 — кислой. Если pH = 5 ÷ 9, то величина pH не является основным показателем коррозионных свойств воды. Большее значение имеют другие факторы, рассмотренные ниже. При pH < 7 на металлах образуется рыхлая пленка из окислов железа, обладающая слабыми защитными свойствами. Через эту пленку происходит диффузионное проникновение кислорода к металлу. В таких условиях коррозия металла с течением времени почти не замедляется и протекает равномерно по всей поверхности труб и фильтров.

При повышении pH образующаяся на металлических фильтрах пленка окислов уплотняется и лучше защищает металл от коррозии. Однако в отдельных случаях отмечается на трубах язвенная коррозия при pH = 7,5 ÷ 8,5.

Кислород является основным окислителем в природных водах, и коррозионное разрушение стальных фильтров усиливается почти пропорционально его содержанию в воде. Растворенный кислород двояко влияет на стальные фильтры. Под влиянием кислорода могут образовываться защитные окисные пленки, но при небольшом содержании кислорода получаются рыхлые пленки, обладающие слабой адгезионной способностью, а при большом содержании образуются плотные пленки, замедляющие процессы коррозии.

В кислых средах при pH < 6 замедляющее действие кислорода исчезает, при pH < 3 ÷ 4 железо подвергается сильному коррозионному разрушению, что необходимо учитывать, когда фильтры обрабатывают кислотами и когда восстанавливают производительность скважин, оборудованных стальными фильтрами.

Увеличение концентрации свободной углекислоты обусловливает понижение pH воды. Содержание в воде агрессивной углекислоты препятствует образованию защитных пленок на металлах. Отложения становятся рыхлыми, пористыми.

При содержании в воде сероводорода и гидросульфидов коррозия низкоуглеродистой стали значительно увеличивается. В результате воздействия сероводорода на железо образуется сернистое железо FeS. Эти осадки обычно черного цвета не обладают большой плотностью и не предохраняют фильтры от коррозионного разрушения.

Образование FeS стимулирует коррозию, так как образующиеся на анодных участках микропар катионы железа связываются в малорастворимое сернистое железо, которое при фильтрации может уноситься потоком воды.

При содержании сульфатов (SO_4^{--}) до 300 мг/л принято считать воду слабоагрессивной, до 600 мг/л — среднеагрессивной и более 600 мг/л — сильноагрессивной.

Растворенные в воде хлориды также являются ускорителями коррозии вследствие разрушающего воздействия хлор-иона (Cl^-) на защитные пленки.

Если содержание хлор-ионов в воде составляет 100—150 мг/л, вода считается слабоагрессивной, при возрастании их содержания агрессивность значительно увеличивается. Это необходимо учитывать в процессе бурения скважин в аридных зонах для защитных дренажей, в строительном водопонижении, береговом и морском строительстве.

В качестве общих закономерностей следует отметить, что коррозионное разрушение фильтров ускоряется с увеличением количества солей, растворенных в воде, а также с повышением скорости фильтрации воды при больших водоотборах. Анализ коррозионных факторов указывает на необходимость антикоррозионной защиты фильтров.

§ 9. ТЕХНОЛОГИЯ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ФИЛЬТРОВ ОТ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

Антикоррозионные покрытия, которые применяются для защиты фильтров от разрушения, должны удовлетворять следующим требованиям:

1) сохранять устойчивость против химической и электрохимической коррозии в процессе эксплуатации;

2) не повреждаться при химических и взрывных способах восстановления производительности скважин в процессе эксплуатации;

3) включать элементы, безопасные в токсическом отношении, и не влиять на вкус и запах воды, полностью удовлетворять санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Процесс покрытия должен быть прямоточным и ограниченным по возвратным операциям.

Детали фильтров, изготовляемые из простых углеродистых сталей, подвергаются коррозионному разрушению более интенсивно, чем нержавеющие стали, и поэтому должны быть надежно защищены антикоррозионными покрытиями.

При выборе защитных покрытий для серийного производства фильтров большое значение имеет прямоточность производства. Так, нанесение некоторых покрытий требует двукратного нанесения грунтовок, трехкратного нанесения антикоррозионного слоя, причем после каждой операции необходимо делать перерывы для воздушной или температурной сушки. Такая технология покрытий затрудняет поточность производства, при этом необходимы большие площади для промежуточного складирования. Поэтому отдается предпочтение покрытиям, которые производятся по схеме: очистка — нанесение покрытий — сушка — выход готовой продукции.

В настоящее время имеется много предложений по защитным покрытиям из металла (цинкование, обмеднение, кадмирование) и синтетических материалов на основе полимерных веществ и латексов. Как показал опыт, металлические покрытия, в частности

цинковые, являются малонадежными и разрушаются при эксплуатации в течение 2—4 лет. Синтетические покрытия в сочетании с металлическими опорными каркасами должны отвечать перечисленным выше требованиям, предъявляемым к конструкциям фильтров.

Условия, вызывающие старение синтетических материалов: резкое изменение температур и облучение солнечным светом — отпадают, поскольку фильтры будут работать в полной темноте и в водах практически нейтральных, где pH = 6,8÷7,5. Температура подземных вод для северных и центральных районов колеблется в пределах 6—8° С, а для южных — 16—18° С.

С учетом отечественной и зарубежной практики для антикоррозионной защиты фильтров наибольший интерес представляют следующие виды покрытий:

эмалевые, наносимые в электромагнитном поле;

полиэтиленовые, наносимые вихревым способом;

органосиликатные, на основе кремнийорганических соединений, наносимые путем опускания в емкость и окраски;

полиамидные, наносимые вихревым способом;

найритовые на основе хлоропреновых каучуков, наносимые путем опускания в емкость и окраски.

Основной операцией перед нанесением защитных покрытий является очистка фильтров от окалины и жировых веществ, а также удаление с фильтров острых кромок и заусениц, которые образуются при механической обработке. Фильтры подготовляют путем травления в кислотах либо механической очистки дробеструйными аппаратами. На некоторых предприятиях в СССР применяется комбинированный способ кислотного травления с последующей дробеструйной обработкой поверхностей. На практике отдают предпочтение дробеструйной очистке, поскольку защитные пленки, наносимые на шероховатые поверхности, обладают лучшими адгезионными свойствами.

Эмалевые покрытия для трубчатых фильтров, изготовляемых из обсадных труб или штампованного листа, разработаны во ВНИИСТе в содружестве с ВНИИ ВОДГЕО и рекомендованы для внедрения на Дрогобычском заводе.

Эмалевые покрытия отличаются устойчивостью к кислым и щелочным средам и ударным нагрузкам, а гладкая их поверхность способствует уменьшению осадкообразования на фильтрах.

Технология нанесения эмалевых покрытий на фильтры отличается относительной простотой и выполняется в следующем порядке:

1) очистка каркасов от окалины;

2) нанесение эмалевого шликера на фильтры путем опускания в шликер;

3) подсушивание шликера на каркасах при температуре 100—150° С;

4) оплавление шликера при температуре 700—800° С;

5) воздушное охлаждение.

В отличие от обжига эмалевых покрытий в муфельных печах эмалируемые каркасы нагревают токами высокой частоты при помощи кольцевых индукторов либо методом контактных сопротивлений. При индукционном нагреве и оплавлении эмалей энергия электромагнитного поля превращается в тепло в нагреваемом металле и эмалевом шликере, расплавляет их и спекает в одно целое. Состав эмалей подбирается с таким расчетом, чтобы коэффициенты объемного расширения металла и эмали были близки, так как в противном случае при охлаждении будут возникать трещины. Индукционный метод является экономичным, и к. п. д. этих установок превышает к. п. д. обжига в муфельных печах в 8—9 раз.

Стоимость покрытий не будет превышать 2 руб. за 1 м² поверхности. Стоимость эмалевого шликера в настоящее время составляет 32 руб. за 1 т.

При внедрении способа эмалирования на трубчатых каркасах полностью не отработана технология снятия острых кромок на внутренней поверхности проходных отверстий. Эта задача значительно упрощается при изготовлении фильтровых каркасов штампованием с последующей вальцовкой и сваркой. При этом зачистка отверстий и снятие заусениц значительно упрощаются. Нанесение эмалей на каркасно-стержневые фильтры находится в стадии разработки.

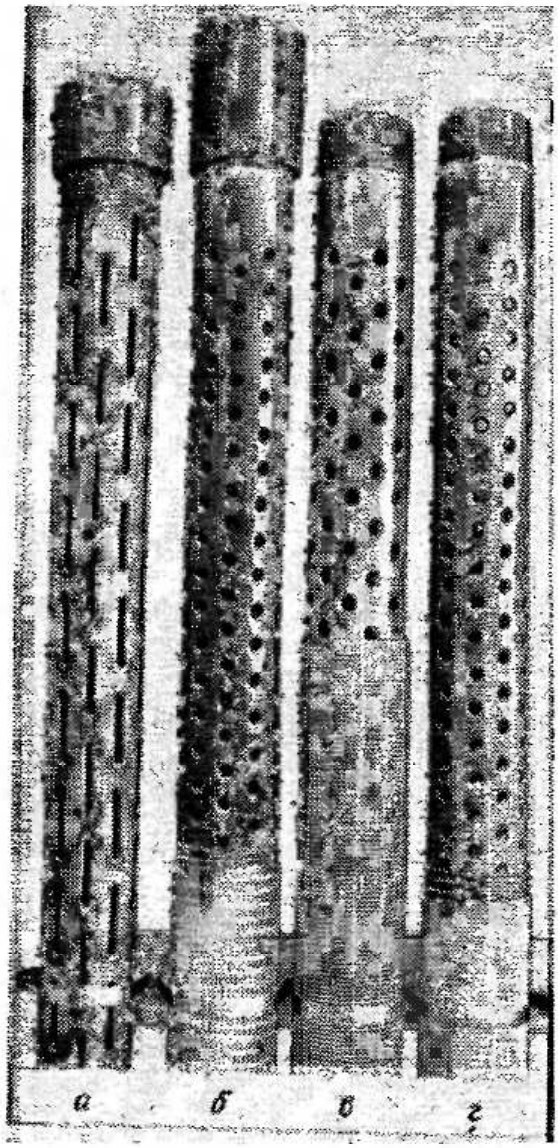


Рис. 58. Фильтры трубчатые с эмалевым покрытием:

а — щелевой; *б* — с просечным листом; *в* — с проволочной обмоткой; *г* — с сеткой

На рис. 58 представлены эмалированные трубчатые каркасы с круглой и щелевой перфорацией, выполненные на производственных установках ВНИИСТа. Из рисунка видно, что каркасы имеют водоприемные поверхности из проволоки, сетки и штампованного листа.

Полиэтиленовые покрытия. Технология нанесения полиэтилена на трубы и фильтры разработана во ВНИИметмаше [70].

Полиэтилен наносится вихревым способом, который является универсальным и позволяет одновременно покрывать внутреннюю и наружную поверхности фильтров.

Технология нанесения полиэтилена осуществляется по схеме: нагрев — напыление — оплавление — охлаждение под душем. Для этого звенья фильтров помещают в печь, где нагреваются до 240—250° С, после чего они поступают в камеру напыления. В этой камере находится тщательно просеянный порошкообразный полиэтилен, смешанный с термостабилизирующими добавками и 5% окиси хрома. При помощи поддува воздуха или другого инертного газа через пористое дно камеры порошок переводится в псевдосжиженное состояние и оседает на подогретый фильтр. Толщина пленки зависит от времени нахождения фильтра в камере. После напыления фильтр перемещается в камеру оплавления, температура в которой составляет 200° С.

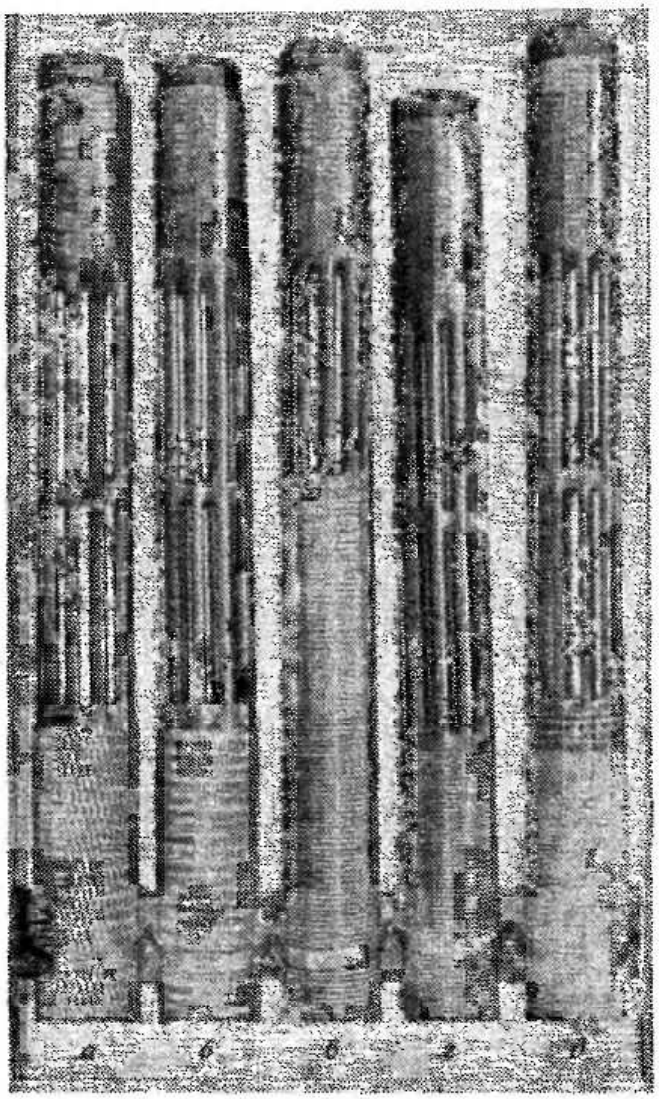


Рис. 59. Фильтры каркасно-стержневые с полиэтиленовым покрытием:
а, б — с просечным листом; *в, г* — с проволочной обмоткой; *д* — с сеткой

Для получения гладкой поверхности и уплотнения полиэтилена фильтры на выходе из камеры оплавления попадают в душевую, где, охлаждаясь, приобретают глянцевую поверхность. Согласно разработанной ВНИИСТом технологии, покрытие на звено фильтра длиной 3 м наносится в течение 6—8 мин. При этом расход полиэтилена на 1 м² поверхности составляет 1,5—2,0 кг при толщине пленки 0,8—1,0 мм, стоимость его 1,5—2,0 руб.

На рис. 59 представлены стержневые и трубчатые каркасы с защитным покрытием из полиэтилена, выполненные на установке ВНИИметмаша. На каркасно-стержневых фильтрах водоприемные поверхности изготовлены из штампованного листа, проволоки и сетки из нержавеющих сталей.

Органосиликатные покрытия. Рецептура и технология защитных покрытий на основе кремнийорганических соединений разработаны в институте химии силикатов АН СССР в Ленинграде [26]. Эти покрытия выпускаются под товарным наименованием ВН-30 (СТУ-30-2943—66) и ВН-30 ДТС/8.

В состав покрытий входят лаки, пигменты, органический растворитель и отвердитель. Эти покрытия представляют собой суспензии тонкоизмельченных силикатов и окислов в толуоловом растворе модифицированных полиорганосилоксанов. Кремнийорганические соединения обладают хорошей адгезией, ударной, химической и температурной стойкостью. Покрытия ВН-30 разрешено применять в фильтрах артезианских скважин.

Технологический процесс антикоррозионного покрытия ВН-30 разбивается на следующие основные операции:

подготовка поверхности изделия (очистка от окалины, загрязнений и обезжиривание);

подготовка материалов для покрытия;

нанесение материала на подготовленную поверхность;

сушка покрытий.

Органосиликатные материалы представляют собой однородные смеси, приготовленные из кремнийорганических полимеров и неорганических добавок в растворителе. При хранении и перевозке твердые компоненты органосиликатных материалов оседают. Для получения покрытий высокого качества жидкие органосиликатные материалы должны быть тщательно перемешаны в лопастной краскомешалке. При вращении лопастей в мешалке со скоростью 400—450 об/мин перемешивание длится 1—3 ч. Материал для покрытий можно перемешивать и в заводской таре до ее раскрытия в специальном смесителе со скоростью вращения 120 об/мин, однако, как установлено опытом, время перемешивания при этом увеличивается на 1—2 ч по сравнению с лопастным перемешиванием.

После перемешивания вязкость материала должна быть одинаковой по всему объему (примерно 18—20 с), проверяется она по воронке ВЗ-4.

Покрытие можно наносить кистью, путем пульверизации и погружения в емкость. Толщина одного слоя покрытия не должна превышать 0,05—0,1 мм. Для защиты поверхности фильтров необходимо наносить три слоя покрытия: два слоя ВН-30 (грунт) и третий слой ВН-30 ДТС/8 (отделочный). После нанесения каждого слоя покрытия требуется воздушная сушка в течение 1 ч и сушка после нанесения последнего слоя — в течение 3 ч с постепенным повышением температуры от 20 до 300° С (1—2° С в 1 мин).

На покрытие 1 м² поверхности в один слой расходуется около 100—150 г кремнийорганической краски. Как следует из описания, нанесение этого покрытия требует выполнения возвратных операций.

Для осуществления трехслойного покрытия ВН-30 в поточной линии необходимо иметь три последовательно стоящих комплекта ванн для окраски и сушильных камер.

Полиамидные покрытия. На современном этапе полиамидные композиции должны гарантировать надежную работу конструкций в агрессивных средах.

Установки для полиамидных покрытий на металлические изделия и технология по их нанесению наиболее полно разработаны французской фирмой «Акитен-Арганико» и широко используются в промышленности многих стран под торговым наименованием «Рильсанизация». Рильсан — химическое название которого «Полиамид—11» — органическое вещество, синтезированное из касторового масла, представляет собой порошок с диаметром частиц от 80 до 210 мкм.

Технология покрытия фильтров рильсаном отличается простотой: очищенная от окалины труба или фильтр нагревается на газовых горелках до 350—400° С, после чего деталь погружается в кипящий слой рильсана на 2—3 с. При соприкосновении с горячей поверхностью порошок оплавляется и фильтр покрывается однородным слоем толщиной около 300 мкм. Если деталь остывает на воздухе, то поверхность имеет матовый вид, а если охлаждать ее в воде, поверхность становится блестящей.

Рильсановые покрытия прошли многолетнюю проверку в различных условиях, при которых было установлено, что они обладают большой химической стойкостью к атмосферным осадкам и температуре, к солям, щелочам, углеводородам и кислотам. Покрытия обладают хорошей адгезионной способностью, большим сопротивлением к ударным нагрузкам и сопротивлением на истирание.

В настоящее время рильсановые покрытия наиболее распространены в ФРГ. Время нагрева фильтра диаметром 300 мм до 400° С составляет 4—4,5 мин, а время покрытия этих деталей в камере напыления с охлаждением — 1,5—2 мин.

Использование рильсановых покрытий для фильтров в нашей стране затруднено из-за сырьевой базы. В настоящее время отечественная промышленность освоила выпуск полиамида-12 на основе синтеза нефтехимических продуктов. Это покрытие по техническим показателям близко к полиамиду-11 и может быть использовано при антикоррозионной защите фильтров.

Найритовые покрытия. Рецептура и методика нанесения покрытий разработаны во ВНИИ синтетического каучука им. С. В. Лебедева в Ленинграде [25]. Для покрытий разработаны составы двух типов:

1) гуммировочный состав на основе дисперсного или масляного жидкого найрита (ВТУ № ЛУ-109-61, ВТУ № ЛУ-126-62) — для покрытий с помощью горячей вулканизации;

2) гуммировочный состав на основе найрита марки НТ (ВТУ № В-5-63) — для вулканизированных и невулканизированных

покрытий, твердеющих без нагревания вследствие кристаллизации каучука.

Основой гуммировочных составов являются хлоропреновые каучуки-найриты, подвергнутые химической деструкции для улучшения их растворимости. В качестве наполнителя используется термическая смола, вулканизующие агенты и смешанный растворитель, состоящий из сольвента, скипидара и *n*-бутилового спирта.

Указанные выше гуммировочные составы не обладают адгезией к металлам и поэтому должны наноситься на предварительно загрунтованные поверхности. Для грунтовки применяется хлорнайритовый грунт (ВТУ № ЛУ-108-61). Грунт и покрытия можно наносить путем покраски, пульверизаций или путем погружения фильтра в емкость при температуре 15—25° С. Согласно рекомендациям, грунт на изделие наносится в два слоя с промежуточной сушкой на воздухе в течение 20 мин, а затем через 15 мин наносят первый слой гуммировочного состава. Для создания надежного покрытия состав наносится в три-четыре слоя с выдержкой между очередным покрытием не менее 2 ч.

При воздушной сушке полная кристаллизация каучука происходит при 20° С в течение 15 сут. Сушка изделий может быть ускорена путем вулканизации в автоклавах, но перед этим изделия должны находиться в течение 3 сут на воздухе при 20° С.

В готовом виде трехслойное покрытие толщиной в 1 мм, при котором на 1 м^2 поверхности расходуется около 3 кг гуммировочного состава и 0,3 кг грунта, надежно защищает конструкции в агрессивных кислых и щелочных средах.

Приведенный обзор по антикоррозионным покрытиям показывает, что организация этого производства связана с установками (печи с регулированным подогревом, автоклавы, обеспечение приточно-вытяжной вентиляции и др.), которые могут быть выполнены на специализированном предприятии. По мнению автора, наибольшего внимания заслуживает установка по нанесению рильсана, полиэтилена и частично эмалей.

Приведенный выше обзор представляется, безусловно, полезным, поскольку он позволяет оценить все направления, которые существуют в настоящее время в области производства и применения фильтров и будут способствовать развитию этой отрасли в нашей стране.

Обзор показывает, что в фильтрах могут применяться различные конструктивные материалы. Например, в ЧССР и ФРГ широко применяются эпоксидные смолы для изготовления деревянных, стеклопластиковых и блочных фильтров. В нашей стране из-за недостаточного выпуска эпоксидные смолы строго лимитированы и на данном этапе не могут быть рекомендованы для массового производства. То же самое относится и к нержавеющим сталям. Изготовление фильтров полностью из нержавеющих сталей представляется идеальным, однако, учитывая дефицитность

этой стали, задача научных исследований заключается в поисках заменителей, которые при снижении расхода нержавеющей стали и стоимости фильтров удовлетворяли бы потребностям производства.

Такая задача была разрешена в ВОДГЕО, где разработаны каркасно-стержневые фильтры, которые на протяжении 26 лет широко внедрялись на различных объектах городского, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения. Эксплуатационная проверка конструкций этих фильтров подтвердила их работоспособность: фильтры обеспечивают максимальный забор воды при долголетней работе скважин и позволяют производить все операции по восстановлению скважин.

Каркасно-стержневые фильтры, извлеченные из дренажных скважин в Ульяновске после 18—20 лет эксплуатации, подтверждают их надежную работу. При выполнении антикоррозионных покрытий каркасов, изготовленных из простых сталей, конструкции могут приобрести конкурентную способность.

Из других конструкций фильтров следует рекомендовать фильтры из просечного листа со щелями открытого типа и типа «мост». В этих конструкциях фильтров по сравнению с фильтрами с трубчатыми каркасами снижается потребление металла в 2—2,5 раза и при выполнении защитных покрытий обеспечивается долголетняя работа скважин. Поскольку просечные фильтры из стального листа используются при бурении скважин в ряде стран на протяжении 40—50 лет, нет оснований для сомнения в работоспособности этих конструкций.

Наибольшая перспектива представляется при оборудовании скважин фильтрами этих двух типов в сочетании с контуром гравийной обсыпки.

Применение фильтров с сетками галунного плетения следует ограничить и использовать их в скважинах больших глубин, где по техническим условиям бурение скважин большого диаметра затруднительно.

Для сооружения наблюдательных скважин режимной сети необходимо шире применять сетки из пластмасс, стекловолокна и других синтетических материалов.

ГЛАВА II

ГИДРАВЛИКА ФИЛЬТРОВ СКВАЖИН

Гидравлические параметры фильтров скважин играют решающую роль при определении оптимальных конструкций фильтров и их элементов. Сведения о сопротивлениях фильтров, их влиянии на фильтрационный приток к скважине позволяют судить о действительных параметрах водоносных пород, зональной неоднородности пластов, обоснованно подходить к проектированию скважин в зависимости от их назначения.

Гидравлика фильтров скважин зависит от гидрогеологических условий, конструктивных особенностей скважин, специфики их эксплуатации или опробования. Так, при устройстве скважин в относительно устойчивых породах, установка фильтров в которых диктуется необходимостью предотвращения попадания в ствол крупных обломков породы, вполне приемлема оценка сопротивлений фильтров на основе использования аналитических решений задачи о притоке к скважине с водоприемной поверхностью, имеющей определенным образом расположенные отверстия.

При установке фильтров в рыхлых отложениях или устройстве их с гравийной обсыпкой существенными оказываются контактные потери напора в зоне фильтр — порода (гравийная обсыпка). Причем величины гидравлических потерь различны и зависят от того, откачивается ли из скважины вода (жидкость) или нагнетается в нее. Анализ особенностей работы фильтров в этих условиях требует специфического подхода, что, однако, не исключает формулирования общих требований к фильтрам, характеризующимся минимальными гидравлическими сопротивлениями.

§ 10. ОБЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СКВАЖИНЫ

Различают скважины двух типов: совершенные и несовершенные. Под совершенной скважиной следует понимать такую, которая вскрывает водоносный горизонт на полную мощность и стенки ее не закреплены водоприемным устройством. Совершенные скважины можно сооружать только в устойчивых не склонных к обрушению породах.

В водозаборных скважинах, оборудованных фильтрами, по В. Н. Щелкачеву [96], следует различать несовершенства:

по степени вскрытия горизонта, которое зависит от отношения длины фильтра к мощности пласта;

по характеру вскрытия, которое зависит от конструкций фильтров, устанавливаемых в пласте.

Для отбора воды из рыхлых обломочных пород, естественно, можно сооружать только несовершенные скважины, поскольку их стенки всегда требуют крепления на участках водоносных горизонтов. Несовершенство скважины любого типа приводит к уменьшению ее дебита по сравнению с дебитом совершенной скважины.

В фильтрационных расчетах принято схематизировать поток к скважине в соответствии с геометрическими особенностями пласта и конструкции скважины. При этом рекомендуется разделять общее фильтрационное сопротивление на частные, соответствующие различным зонам фильтрации, что позволяет значительно упростить задачу расчета скважин [89].

В первой зоне, наиболее удаленной от скважины, можно пренебречь влиянием конструкции водоприемной части на характер течения.

Следовательно, в общем случае можно рассчитывать скважины на воду с учетом дополнительных гидравлических потерь в прифильтровой зоне и на фильтре, суммируя (вычитая) некоторые дополнительные показатели безразмерного сопротивления с сопротивлением, обусловленным геометрическими характеристиками пласта и водозабора в целом и граничными условиями, или вводя в расчетные зависимости величину приведенного (фиктивного) радиуса вместо фактического радиуса скважины.

Дополнительное сопротивление ζ в соответствии с принятой схематизацией потока может быть представлено в виде двух слагаемых:

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2, \qquad \text{(II.1)}$$

где ζ_1 и ζ_2 — сопротивления, обусловленные несовершенством соответственно по степени и характеру вскрытия пласта.

Величина приведенного (фиктивного) радиуса скважины оценивается по формуле

$$r_0^* = r_0 \exp(-2\pi\zeta)$$

(r_0 — действительный радиус скважины).

Для определения ζ_1 используются решения М. Маскета, А. Л. Хейна, Н. Н. Веригина, которые исследовали задачу влияния неполноты вскрытия водоносного горизонта в условиях установившегося и неустановившегося движения [19, 60, 86].

Графики для определения ζ_1 [68] позволяют оценить влияние несовершенства скважины по степени вскрытия пласта на приток к ней в зависимости от параметров l/m и m/r_0 (l — длина фильтра, m — полная мощность водоносного пласта).

Величина ζ_2, представляющая собой комплексную характеристику вскрытия пласта, зависит от конструкции фильтра, его гидравлических особенностей, изменений в водопроницаемости пород вблизи скважины в процессе бурения и эксплуатации,

цементации пород в прифильтровой зоне и зарастания отверстий фильтра (суффозия, кольматаж, химическое зарастание), турбулизации потока у скважины. Таким образом, величина ζ_2 складывается из следующих составляющих:

$$\zeta_2 = \zeta_{2ф} + \zeta_{2п} + \zeta_{2н.\,л}. \qquad (II.2)$$

Здесь $\zeta_{2ф}$, $\zeta_{2п}$, $\zeta_{2н.\,л}$ — сопротивления, обусловленные соответственно фильтром, породой и отклонением от линейного закона фильтрации.

Каждое из перечисленных сопротивлений может быть найдено аналитически и экспериментально. В частном случае при сохранении линейного закона на всем пути фильтрации показатель обобщенного сопротивления ζ_2 является суммой сопротивлений фильтра и прифильтровой зоны с измененной проницаемостью.

На основании оценки сопротивления прифильтровой зоны скважины можно предусмотреть рациональное устройство ее водоприемной части, оптимальный режим водоотбора, определить качество работ по бурению и прокачке скважины. Кроме того, наблюдения за изменением ζ_2 во времени позволяют установить интенсивность развития процессов зарастания и запроектировать профилактические мероприятия по поддержанию первоначальных фильтрационных свойств пород прифильтровой зоны.

§ 11. СОПРОТИВЛЕНИЕ ФИЛЬТРА $\zeta_{2ф}$ БЕЗ УЧЕТА КОНТАКТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА

Гидравлическое сопротивление фильтра зависит от формы отверстий, их числа (скважности), размера, определяющего дисперсию потока, характера расположения по водоприемной поверхности скважины и их взаимодействия.

Исследованиями М. Н. Тихова [79] установлено, что существует оптимальное число отверстий (оптимальная скважность). Увеличение числа отверстий, хотя и способствует общему возрастанию суммарного дебита, однако темп роста дебита и уменьшения сопротивления замедляется вследствие усиления взаимодействия отверстий (эффект интерференции). Поэтому общий эффект увеличения суммарного дебита будет снижаться и тем сильнее, чем больше будет введено в действие отверстий.

Рассмотрим некоторые гидродинамические решения задачи о притоке к скважине, оборудованной фильтром, без учета наложения пород и снижения скважности фильтров, а также возможности химического зарастания фильтров. При этом сопротивление фильтров можно оценивать только в условиях каптажа устойчивых пород, когда не сказывается эффект наложения водоносных пород на водоприемную часть скважин. В отдельных случаях величины сопротивлений фильтров будут занижены.

Поскольку геометрия фильтрационного потока вблизи скважины определяется формой входных отверстий, классифицировать

фильтры для этих целей, очевидно, правильнее всего по этому признаку. Из существующего разнообразия фильтров следует выделить фильтры-каркасы с одинарной поверхностью фильтрации и фильтры с дополнительной водоприемной поверхностью.

В табл. 43 и на рис. 60 приведены фильтры, используемые в настоящее время при сооружении водозаборных и водопонизительных скважин.

Таблица 43

Классификация фильтров по форме проходных отверстий

Тип фильтра	Подтип фильтра	Класс фильтра
Одинарная поверхность фильтрации	Круглые отверстия (рис. 60, *а*). Квадратные щелевые отверстия (рис. 60, *е*) Линзообразные и эллипсовидные отверстия (рис. 60, *ж*, *з*).	Вертикальные щели ограниченной высоты (рис. 60, *б*) Вертикальные щели по всей мощности вскрываемого пласта (рис. 60, *в*) Горизонтальные щели (рис. 60, *г*, *д*).
Двойная поверхность фильтрации	То же	—

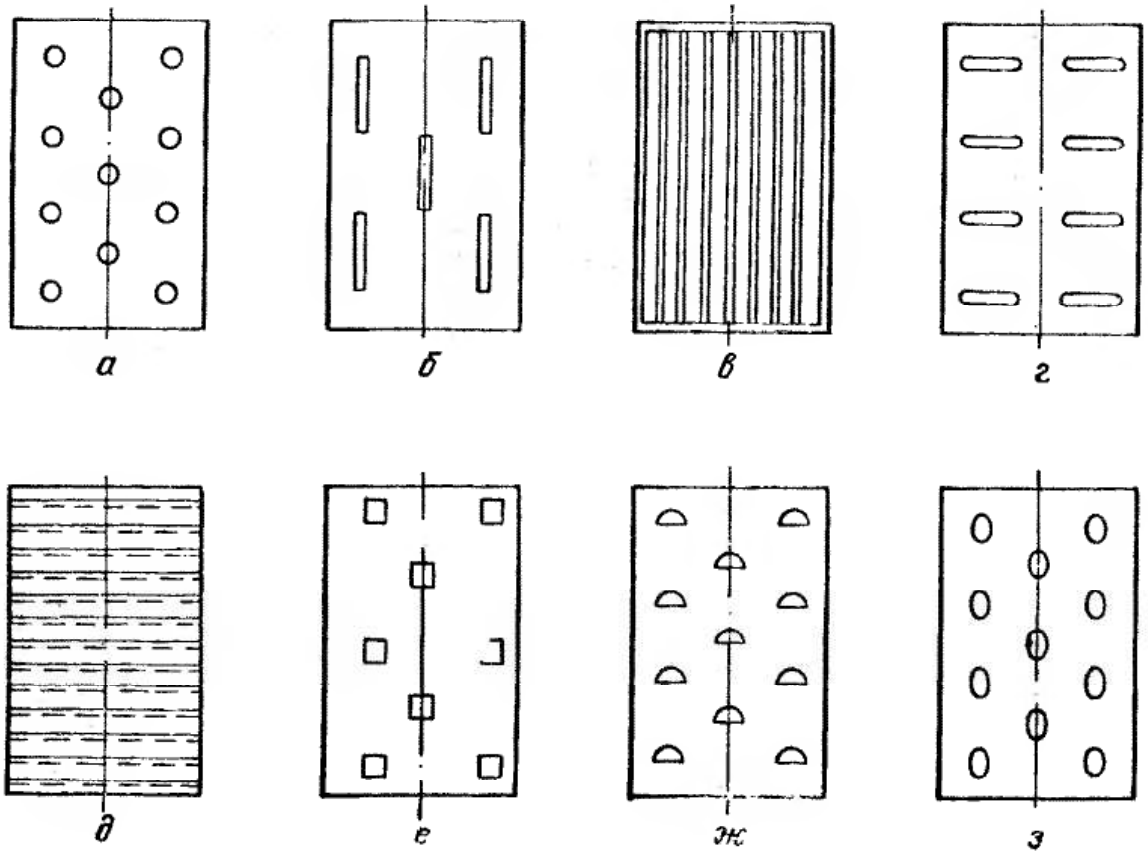


Рис. 60. Формы отверстий на фильтрах с одинарной и двойной водоприемной поверхностями

Фильтры с круглыми отверстиями. Аналитические решения притока жидкости к фильтру с круглыми отверстиями получены М. Маскетом и А. Л. Хейном. Круглые отверстия при решении задачи заменялись стоками, размещенными по образующим трубы-фильтра. Очевидно, что такая схема не обеспечивает физического подобия, поскольку при этом не учитывается непроницаемость стенок, однако предполагается, что этот недостаток компенсируется эффектом интерференции стоков.

Решение М. Маскета детально исследовано В. И. Щуровым. В результате было установлено, что величина сопротивления фильтра $\zeta_{2ф}$ практически не зависит от диаметра скважины (при изменении диаметра в пределах 168—325 мм). В. И. Щуровым составлены кривые $\zeta_{2ф} = f(n)$ путем аппроксимирования аналитических решений М. Маскета однотипными эмпирическими уравнениями для трех диаметров отверстий: 6,4; 12,7 и 19 мм

$$\zeta_{2ф} = an^b, \qquad \text{(II.3)}$$

где a и b — параметры кривых; n — число отверстий на 1 м длины фильтра.

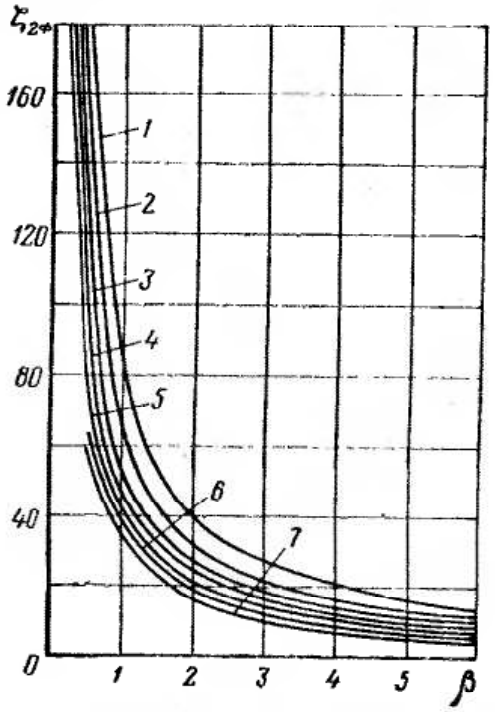


Рис. 61. График зависимости $\zeta_{2ф}$ для фильтров с круглыми отверстиями от параметров $\beta = 0{,}01nD$ и α:

1 — $\alpha = 0{,}03$; *2* — $\alpha = 0{,}04$; *3* — $\alpha = 0{,}05$; *4* — $\alpha = 0{,}06$; *5* — $\alpha = 0{,}07$; *6* — $\alpha = 0{,}08$; *7* — $\alpha = 0{,}09$

Величина $\zeta_{2ф}$ в зависимости от числа отверстий n и их диаметра d_0 для фильтра, установленного в однородном пласте, может быть определена следующим образом:

$$\zeta_{2ф} = \frac{49{,}39 d_0^{-1{,}823} + 48{,}77}{n^{0{,}0066 d^{4{,}5} + 1{,}0335}}. \qquad \text{(II.4)}$$

Формула (II.4) детально исследовалась В. И. Щуровым методом ЭГДА, в результате чего были получены уточненные графики (рис. 61) зависимости $\zeta_{2ф}$ от параметров $\alpha = d_0/D$ и $\beta = nD$ (D — диаметр фильтра). Рекомендации В. И. Щурова широко используются в расчетах, когда пласт вскрывается пулевой перфорацией.

А. Л. Хейном [86] получены решения для определения притока к фильтру с круглыми отверстиями в условиях неустановившегося движения. В результате доказано, что эффект неустановившегося течения в прифильтровой зоне прослеживается в течение очень коротких промежутков времени (менее 100 с), поэтому в практи-

ческих расчетах фильтров можно ограничиться рассмотрением стационарного режима фильтрации.

Фильтры со щелевыми отверстиями, расположенными в вертикальной плоскости. Фильтры со щелями, расположенными вертикально по образующей трубы, делятся на две группы: фильтры со щелями, длина которых равна мощности пласта, и фильтры со щелями ограниченной длины.

К первой группе относятся фильтры из стержней без проволочной обмотки. При определении величины сопротивления $\zeta_{2ф}$ для этих фильтров различными методами были получены весьма близкие результаты. В. Т. Кордуэллом и С. К. Додсоном [101] предложена формула:

$$\zeta_{2ф} = \frac{2}{n} \ln \frac{2}{\pi\eta} \text{ при } \eta \leqslant 0{,}3. \qquad (II.5)$$

Здесь n — число щелей; η — скважность.

Эта формула проверена экспериментально методом ЭГДА и получены удовлетворительные результаты.

Для отверстий того же типа В. П. Пилатовским [69] получено следующее выражение безразмерного гидравлического сопротивления:

$$\zeta_{2ф} = \frac{4}{n} \ln \sin \frac{n\alpha}{2}. \qquad (II.6)$$

Угол α берется из рис. 62. Здесь точка O является центром скважины ($r_i/r_0 < a$), окруженной n непроницаемыми порогами A_1B_1, A_2B_2, . . ., A_nB_n. Пороги представляют собой равные дуги окружности радиусом r_0 и с центром O; дуговые расстояния между порогами B_1A_2, B_2A_3, . . ., B_nA_1 равны $2\alpha a$. Решая задачу течения в пласте, в котором изолированные области представлены обтекаемыми дугами окружности, и переходя к предельному случаю, когда эти дуги оказываются на контуре скважины, найдем выражение (II.6).

Аналогичный результат получен А. Л. Хейном [85] при вычислении $\zeta_{2ф}$ для фильтра с вертикально расположенными отверстиями без ограничения скважности.

Величину $\zeta_{2ф}$ стержневых каркасов и аналогичных им конструкций фильтров можно найти по графикам, составленным по результатам расчета по формуле В. П. Пилатовского (рис. 63). Как видно из графиков, сопротивление фильтров этой конструкции существенно уменьшается с увеличением суммарной площади отверстий.

Для определения сопротивления щелевого фильтра с прямоугольными щелями ограниченной длины, размещенными вертикально по образующей фильтра, А. Л. Хейном [85] получено соответствующее решение, причем на поверхности дренирования им принималась некоторая средняя скорость движения жидкости, а на непроницаемых участках фильтра — градиент потенциала,

равный нулю. Это решение очень громоздко и не доведено до расчетных зависимостей. Расчетами А. Л. Хейна установлено, что приближенно сопротивление фильтров с вертикальными щелями ограниченной длины можно найти по графикам В. И. Щурова (см. рис. 61) для фильтров с круглыми отверстиями путем приведения прямоугольного отверстия к равновеликому круглому. При отношении длины щели l к ширине b, меньшем или равном 3,

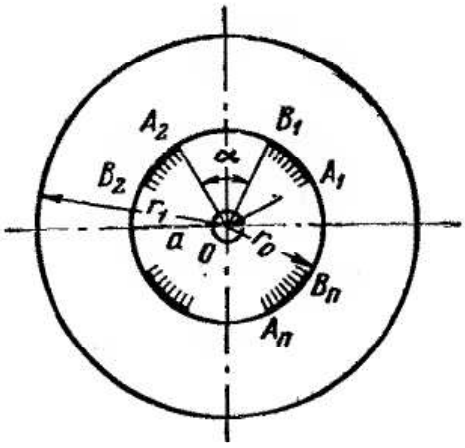


Рис. 62. Расчетная схема к определению $\zeta_{2ф}$ фильтров со щелями по всей мощности пласта

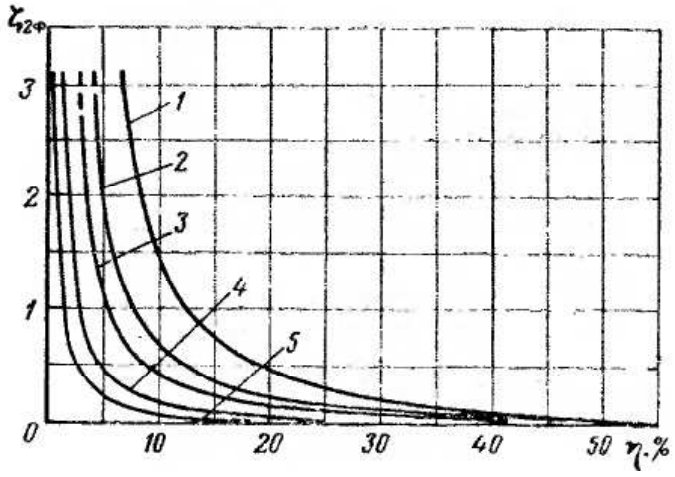


Рис. 63. График зависимости $\zeta_{2ф}$ от скважности η фильтра диаметром 168 мм со щелями по всей мощности пласта:
ширина щели: *1* — 10 мм; *2* — 5 мм; *3* — 3 мм; *4* — 1 мм; *5* — 0,5 мм

приведение предпочтительнее производить по площади, т. е. радиус приведенного отверстия

$$r_{0\,пр} = \sqrt{bl/\pi}. \qquad (II.7)$$

В случае же длинных и узких щелей (при $l/b > 3$) приведенный радиус можно определить приведением по периметру

$$r^{*}_{0\,пр} = bl/2\pi. \qquad (II.8)$$

Фильтры со щелевыми отверстиями, расположенными в горизонтальной плоскости. С гидравлической точки зрения, наиболее предпочтительной конструкцией является фильтр со щелями, расположенными в горизонтальной плоскости. При такой конструкции меньше искажается поток в прифильтровой зоне скважины в результате сохранения осесимметричности линий тока. Учитывая преимущества фильтров со щелями, расположенными в горизонтальной плоскости, в практике сооружения водозаборных скважин в СССР и за рубежом широко применяются каркасно-стержневые фильтры с проволочной обмоткой.

Сопротивление фильтров этой конструкции можно оценить по формуле А. Л. Хейна при относительно больших значениях r_c/d (d — расстояние между центрами соседних щелей):

$$\zeta_{2\phi} = \frac{d^3}{\pi^2 r_c b^2}\left[6{,}835\frac{b}{d}\left(1-\frac{b}{d}\right) - 2\mathrm{Li}\left(\pi\frac{b}{d}\right) + \varkappa\left(\frac{b}{d};\ \frac{2r_c}{d}\right)\right], \quad \text{(II.9)}$$

где d — расстояние между центрами соседних щелей; b — высота щели; Li — интегральная функция Лобачевского; $\varkappa\ (b/d;\ 2r_c/d)$ — табулированная функция, значения которой приведены в [85].

Согласно решению М. Н. Тихова [79], приближенно сопротивление фильтра с горизонтальными щелями можно найти по графикам (см. рис. 61), но полученная величина должна быть уменьшена на 20%.

Анализ теоретических решений для определения сопротивления фильтров различных конструкций позволяет сделать следующие выводы.

1. С увеличением суммарной площади всех отверстий (скважности) фильтра дебит скважины повышается.

2. При сохранении постоянной скважности дебит увеличивается с уменьшением размера отверстий, однако темп увеличения дебита снижается при отверстиях малого размера вследствие возрастания эффекта интерференции.

3. Фильтры со щелевой и дырчатой перфорацией при одинаковой скважности имеют примерно одинаковые сопротивления.

4. Интерференция вертикальных малых отверстий всегда больше, чем горизонтальных, находящихся на том же расстоянии по параллели, и поэтому суммарный расход через фильтры с горизонтальными отверстиями больше на 20—35%.

Таким образом, в аналитической теории притока жидкости к гидродинамически несовершенной скважине по характеру вскрытия пласта явление интерференции играет основную роль и теоретически объясняет специфику работы скважины, позволяя при этом сделать общие практические выводы о конструировании фильтров. В первую очередь следует рекомендовать фильтры-каркасы с горизонтальными щелями, у которых значительно меньше сопротивление и влияние интерференции отверстий. Скважность и размеры отверстий фильтров не могут быть рекомендованы без выяснения специфики скелетообразования и без учета явлений зарастания, неизбежных при любой конструкции фильтра. Эти параметры, а также потери напора на контакте фильтр-порода могут быть определены лишь в результате экспериментальных исследований на лабораторных и натурных моделях.

§ 12. СОПРОТИВЛЕНИЕ (ПРОНИЦАЕМОСТЬ) ФИЛЬТРОВ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ (ПОГЛОЩАЮЩИХ) СКВАЖИН

При устройстве фильтров с гравийной обсыпкой или их установке в рыхлых образованиях без обсыпки важно знать назначение скважин. При этом гидравлические особенности действия водозаборных и поглощающих скважин будут существенно отличаться вследствие разного влияния контакта фильтра-каркаса с гравием в зависимости от направления фильтрации воды.

Особенность работы фильтров нагнетательных (поглощающих) скважин заключается в том, что вода испытывает гидравлическое сопротивление на входе в фильтр и при движении через стенки фильтра. Это приводит к деформации линий токов при осесимметричной фильтрации, что видно при растекании индикаторов, запускаемых в скважину. Высокая степень деформации линий токов и изменение скорости потока подземных вод в зависимости от конструкции фильтра послужили обоснованием для постановки Д. Клотцем в ФРГ [108] комплекса исследований.

В основу методики изучения гидравлики фильтров положены теоретические исследования Н. А. Огильви и С. А. Коля, согласно которым конструкция скважины и состояние ее призабойной зоны существенно влияли на скорость фильтрации, определенной методом разбавления с применением индикаторов. Впервые на это обратил внимание Н. А. Огильви [64], который установил, что искажающее влияние сопротивления фильтра на поток грунтовых вод может быть весьма существенным. Количественно степень нарушения фильтрационного потока оценивается коэффициентом α, входящим в формулу для расчета естественной скорости потока подземных вод

$$v_{\text{ф}} = \frac{\pi\left(r_1^2 - r_0^2\right)}{2\alpha r_1 t} \ln \frac{C}{C_0}, \qquad \text{(II.10)}$$

где r_1 — внутренний радиус фильтра; r_0 — радиус детектора; C — концентрация индикатора во время t; C_0 — концентрация индикатора в начале измерения при $t = 0$; α — показатель, характеризующий степень нарушения фильтрационного потока поверхностью фильтра.

С. А. Колем было показано, что, когда скважина без фильтра каптирует однородный водоносный пласт, $\alpha = 2$. Если же в однородном водоносном пласте установлен фильтр с заданной проницаемостью k_1 без гравийной обсыпки и $k_2 = k_3$ (k_2 — проницаемость гравийной обсыпки, k_3 — проницаемость водоносного пласта), то, согласно решению Н. А. Огильви,

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1}\left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \qquad \text{(II.11)}$$

(r_2 — наружный радиус фильтра).

Если же скважина имеет гравийную обсыпку с проницаемостью k_2 в радиусе r_3 (рис. 64), величина α, в соответствии с [10], выражается формулой

$$\alpha = \frac{8}{\left(1+\frac{k_3}{k_2}\right)\left\{1+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2+\frac{k_2}{k_1}\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\}+\left(1-\frac{k_3}{k_2}\right)\left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\right.}$$
$$\left.+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2+\frac{k_2}{k_1}\left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2-\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\} \qquad \text{(II.12)}$$

Сущность рассматриваемой методики заключается в определении величины α на основе радиоиндикаторных исследований

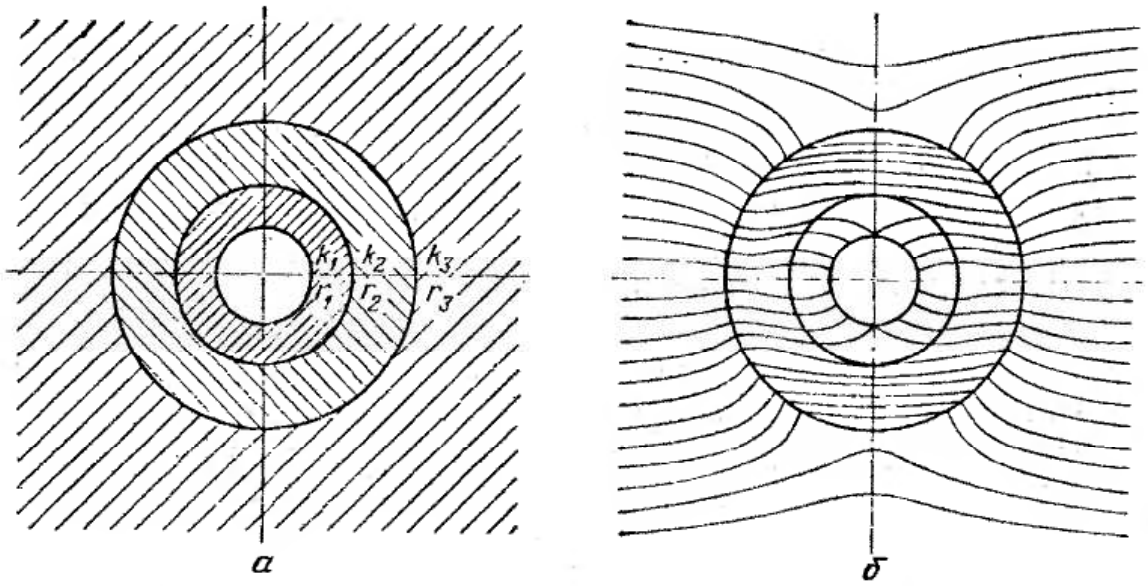


Рис. 64. Расчетная схема для описания притока к скважине с фильтром и гравийной обсыпкой:
а — схема фильтра; *б* — схема фильтрационных течений

и последующих расчетов проницаемости фильтра k_1 при известной проницаемости гравийной обсыпки и водоносных пород

$$k_1 = \frac{k_2\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]}{\frac{4}{\alpha}-\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]}; \qquad \text{(II.13)}$$

$$k_1 = \frac{k_2\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2+\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2-\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]+k_3\left[1-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2-\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\right.}{\frac{8}{\alpha}-\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2+\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]-\frac{k_3}{k_2}\left[1+\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2-\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2-\right.} \rightarrow$$
$$\left.\rightarrow \frac{+\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]}{\left.-\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]}. \qquad \text{(II.14)}$$

При этом фильтр рассматривается как пористая среда, в которой действителен закон Дарси. Лабораторные исследования проводились в фильтрационном лотке. В лотке вследствие создания разности напоров в верхнем и нижнем бьефе создавался поток грунтовых вод с заданной скоростью. Затем в скважину запускали радиоактивный индикатор и фиксировали его разбавление во времени. По формуле (II.10) вычисляли α и при известных параметрах пласта и гравийной обсыпки оценивалось значение k_1 — проницаемость фильтра. Кроме того, величину α определяли в контрольных опытах по данным о растекании индикатора-красителя в плане путем непосредственного визуального наблюдения. Рассмотрим результаты исследования различных конструкций фильтров по указанной методике.

Каркасно-проволочные фильтры с горизонтальными щелями (фильтры фирмы «Джонсон»). Гидравлика этих фильтров исследовалась Д. Клотцем [10, 111] на 24 промышленных образцах: на 8 секциях фильтров длиной 1 м и внутренними диаметрами 2″, 4″ и 16 секциях фильтров длиной 0,4 м и внутренними диаметрами 2″, 3″ и 4″.

Для оценки зависимости проницаемости фильтров k_2 от скважности η были использованы модели фильтров длиной 1 м в фильтрационных лотках, размеры которых приведены в табл. 44.

Таблица 44

Размеры фильтрационных лотков для исследования фильтров «Джонсон»

№ фильтрационного лотка	Размеры загрузки лотка грунтом, мм			Общая длина лотка, мм
	длина	ширина	высота	
1	2300	1200	1000	2500
2	1300	1000	350	1400

Гравийная обсыпка выполнялась в зоне радиуса $r_3 = 210$ мм из гравия размером 2—3 мм ($k_2 = 2{,}2$ см/с). Водоносная порода — грубозернистый песок с размером частиц 0,5—1,5 мм и $k_3 = 0{,}097$ см/с.

Модели фильтров «Джонсона» длиной 0,4 м исследовали в фильтрационном лотке № 2 с гравийной обсыпкой в зоне радиусом $r_3 = 155$ мм при аналогичном ее составе и строении водоносного горизонта, но $k_3 = 0{,}1$ см/с.

Экспериментально исследовали фильтры диаметром от 2 до 4″ с высотой щели $h_1 = 0{,}1 \div 2$ мм при толщине проволоки $h_2 = 1{,}1 \times 1{,}6$ мм, ширине щели $b_1 = 7{,}5 \div 10{,}3$ мм и скважности $\eta = 0{,}037 \div 0{,}465$.

Скважность этих фильтров рассчитывалась по формуле

$$\eta = \frac{b_1 h_1}{(b_1 + b_2)(h_1 + h_2)}, \qquad \text{(II.15)}$$

где b_1 — ширина щели; h_1 — высота горизонтальной щели; b_2 — толщина стержня; h_2 — толщина проволоки.

Результаты оценки проницаемости фильтров приведены на графике зависимости этой величины от скважности η (рис. 65) и в табл. 45.

Таблица 45

Гидравлические характеристики исследованных фильтров «Джонсона»

№ фильтра	η	k_1, см/с	Показатель сопротивления трубы $\tilde{s}$	Гидравлический радиус щели фильтра $r_н$	Показатель сопротивления фильтра T
2″-1	0,037	0,93	11,8	0,100	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$
2″-2	0,073	2,37	11,6	0,200	$7{,}6 \cdot 10^{-2}$
2″-3	0,155	6,30	11,0	0,470	$3{,}7 \cdot 10^{-1}$
2″-4	0,242	9,48	10,3	0,810	1,21
2″-5	0,285	13,50	9,8	1,07	1,86
2″-6	0,316	18,0	9,5	1,25	2,17
2″-7	0,340	20,50	9,2	1,42	2,74
2″-8	0,362	22,40	9,0	1,58	3,37
2″-9	0,087	2,76	11,6	0,14	$3{,}8 \cdot 10^{-2}$
2″-10	0,181	7,32	11,0	0,47	$3{,}7 \cdot 10^{-1}$
2″-11	0,357	11,90	10,3	0,81	1,02
2″-12	0,396	29,20	8,9	1,58	2,86
3″-1	0,040	1,03	11,8	0,10	$2{,}4 \cdot 10^{-2}$
3″-2	0,079	2,44	11,2	0,20	$8{,}0 \cdot 10^{-2}$
3″-3	0,170	6,38	11,2	0,49	$4{,}2 \cdot 10^{-1}$
3″-4	0,257	10,90	10,7	0,83	1,13
4″-1	0,040	1,03	11,9	0,10	$2{,}4 \cdot 10^{-2}$
4″-2	0,080	2,67	11,7	0,20	$7{,}4 \cdot 10^{-2}$
4″-3	0,172	6,45	11,3	0,48	$4{,}0 \cdot 10^{-1}$
4″-4	0,258	10,80	10,8	0,83	1,13
4″-5	0,111	3,61	11,7	0,20	$7{,}7 \cdot 10^{-2}$
4″-6	0,225	9,45	11,3	0,48	$3{,}6 \cdot 10^{-1}$
4″-7	0,323	18,60	10,8	0,83	$7{,}9 \cdot 10^{-1}$
4″-8	0,465	38,60	11,7	1,67	2,17

Для фильтров-каркасов фирмы «Джонсон» характерны очень высокие значения проницаемости. При скважности 3—5% они составляют 1 см/с и превышают встречающиеся в практике значения коэффициентов фильтрации водоносных пород. Тенденция к увеличению проницаемости фильтров наблюдается и при бо́льших скважностях, выше 40%.

Существенный интерес представляет оценка проницаемости фильтра в зависимости от его геометрических характеристик. В качестве исходной зависимости для расчета потерь напора на фильтре используется формула для определения гидравлических потерь на прямолинейном участке трубы произвольного сечения

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho \omega^2 l}{4 r_н}, \qquad \text{(II.16)}$$

где Δp — потери напора в трубе на участке длиной l; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; ρ — плотность воды; ω — скорость движения воды, осредненная по поперечному сечению трубы; $r_н$ — гидравлический радиус.

При ламинарном движении

$$\lambda = \frac{4\bar{s}}{\mathrm{Re}} = \frac{4\bar{s}\eta'}{r_н \rho \omega}, \qquad \text{(II.17)}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{r_н \rho \omega}{\eta'}.$$

Здесь $\bar{s}$ — показатель сопротивления трубы; Re — число Рейнольдса; η' — коэффициент вязкости.

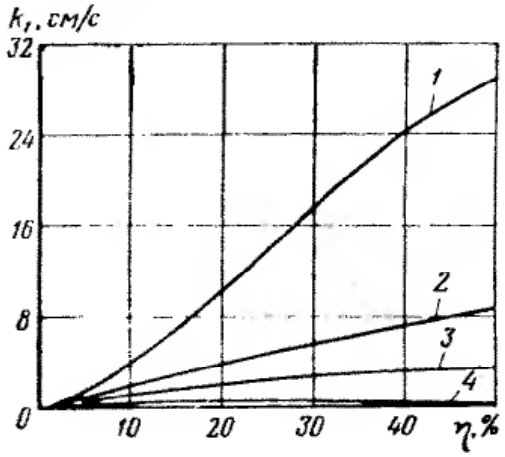


Рис. 65. График зависимости проницаемости фильтров различных конструкций от скважности (по Клотцу):

1 — каркасно-проволочные; *2* — с мостообразными отверстиями; *3* — щелевые с открытой перфорацией; *4* — сетчатые с сетками галунного плетения

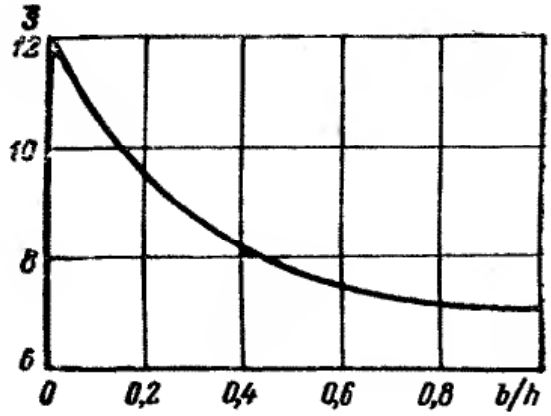


Рис. 66. График зависимости показателя сопротивления трубы от ее геометрических характеристик

Подставив значения λ в уравнение (II.16), получим

$$\Delta p = \frac{\bar{s}\eta' l \omega}{r_н^2}. \qquad \text{(II.18)}$$

Показатель сопротивления трубы $\bar{s}$ зависит от формы ее поперечного сечения. Для круглых труб, согласно закону Гагена — Пуазейля, $\bar{s} = 8$, для труб прямоугольного сечения

$$\bar{s} = \frac{12h^2}{(b+h)^2}\left\{1 - 192\,\frac{b}{\pi^5 h}\left[\tanh\left(\frac{\pi h}{2b}\right) + \left(\frac{1}{3}\right)^5 \tanh\left(\frac{3\pi h}{2b}\right) + \ldots\right]\right\}^{-1}, \qquad \text{(II.19)}$$

(b — ширина трубы; h — ее высота).

Численные значения $\bar{s}$ в зависимости от b/h могут быть получены по графику, приведенному на рис. 66.

Приведенные зависимости для труб круглого сечения справедливы при выполнении условия

$$l/r_{н} > 0{,}115\,\mathrm{Re}. \qquad (II.20)$$

Для других форм сечения труб границы применимости формулы (II.18) не даются. Но можно воспользоваться аналогичным критерием для параллельных пластин, для которых

$$l/r_{н} > 0{,}026\,\mathrm{Re}. \qquad (II.21)$$

При использовании формулы (II.18) для расчета фильтров со щелевыми отверстиями необходимо проверить выполнение условия о допустимости применения к прямоугольным щелям условия (II.21). Согласно уравнению неразрывности, получим максимальное значение скорости течения, осредненное по сечению щели

$$\omega_{max} = \alpha v_{ф}/\eta, \qquad (II.22)$$

где $v_{ф}$ — скорость движения ненарушенного потока грунтовых вод; η — скважность фильтра.

Используя это выражение, можно получить максимальное значение числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{r_{н}\rho\alpha v_{ф}}{\eta'\eta}. \qquad (II.23)$$

Согласно формуле (II.21), верхний предел относительной длины для щели фильтра

$$\frac{(r_2 - r_1)}{r_{н}} > 0{,}026\,\frac{r_{н}\rho\alpha v_{ф}}{n\eta}. \qquad (II.24)$$

Здесь $(r_2 - r_1)$ — толщина стенки фильтра.

Гидравлическими исследованиями [10] было установлено, что условие (II.24) выполняется практически для всех щелевых фильтров.

Потери давления в одной щели фильтра по аналогии с трубами, согласно уравнению (II.18), составляют

$$\Delta p = \frac{\bar{s}\eta'(r_2 - r_1)}{r_{н}^2}\,\frac{\bar{v}(r_1)}{\eta}, \qquad (II.25)$$

где Δp — потери напора при прохождении водой участка щели $(r_2 - r_1)$; $\bar{v}(r_1)$ — средняя скорость движения воды в щели фильтра.

В формуле (II.25) учитываются только потери напора, вызываемые трением в трубах. При прохождении воды через стенку фильтра, кроме того, сказываются потери напора вследствие изменения живого сечения потока и сопротивления, обусловленного наличием застойных зон в пределах непроницаемых участков

фильтра. По аналогии с приемом А. Г. Шейдеггера [91] решетчатый характер течения учитывается параметром T — коэффициентом сопротивления фильтра:

$$I = \frac{\bar{s}T\eta'}{\rho g r_н^2} \frac{\bar{v}(r_1)}{\eta}. \qquad (II.26)$$

Если предположить, что движение воды в фильтре ламинарное, то

$$\bar{v}(r_1) = k_1 I. \qquad (II.27)$$

Используя (II.26), получим проницаемость фильтра

$$k_1 = \eta \frac{\rho g}{\eta'} \frac{r_н}{\bar{s}T}. \qquad (II.28)$$

Если считать ускорение силы тяжести, плотность и вязкость постоянными величинами, то по уравнению (II.28) получим проницаемость k_1 как функцию скважности фильтра и формы щелей, выраженную через показатель $r_н/\bar{s}T$.

Для фильтров проволочного типа на стержневых каркасах гидравлический радиус щели определяется по формуле

$$r_н = \frac{b_1 h_1}{b_1 + h_1}. \qquad (II.29)$$

На рис. 67 приведена зависимость гидравлического радиуса щели $r_н$ от ее геометрических параметров. Показатель сопротивления трубы $\bar{s}$ определяется по графику на рис. 66. Показатель сопротивления фильтра «Джонсона» T может быть определен только эмпирически. Установлено, что T связан с геометрическими характеристиками фильтра следующей зависимостью

$$\lg\left[T\left(\frac{a'}{r_1 + r_2}\right)^2\right] = C \lg \frac{r_н}{r_2}. \qquad (II.30)$$

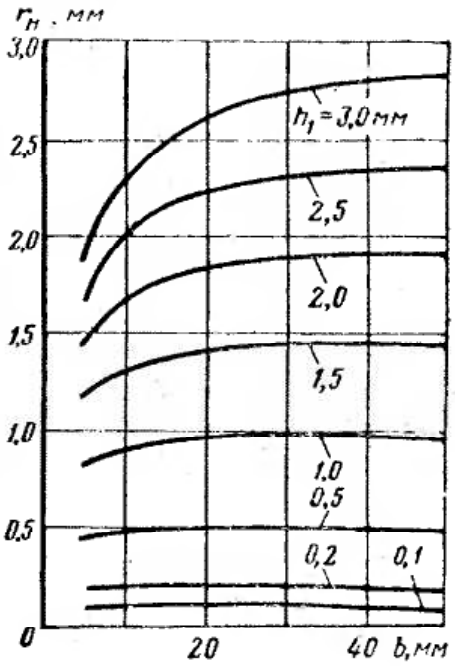


Рис. 67. Зависимость гидравлического радиуса $r_н$ фильтров каркасно-проволочного типа от размеров щелей

Величина C зависит от типа фильтра, a' — произвольно выбранная постоянная величина (здесь $a' = 50$ мм). Для определения C в уравнении (II.30) были рассчитаны значения T при известных величинах k_1 (табл. 46) и заданных η, $r_н$ и $\bar{s}$ по формуле (II.28). Построенный согласно этим расчетам график на рис. 68 может использоваться для оценки величины T и затем величины k_1 других типоразмеров каркасно-проволочных фильтров (фильтры

Таблица 46

Расчетные параметры стальных фильтров с щелевыми отверстиями открытого типа

η	(r_2-r_1), мм	b_1, мм	h_1, мм	b_1/h_1	$\bar{s}$	$r_н$, мм	T	k_1, см/с
0,259	1,5	1,0	20	0,050	11,2	0,96	8,0	1,96
0,218	1,5	1,0	20	0,050	11,2	0,96	8,0	1,69
0,352	2,0	1,5	20	0,075	10,9	1,42	17,1	2,86
0,313	2,5	2,0	20	0,100	10,6	1,85	32,4	2,34
0,345	3,0	2,5	20	0,125	10,3	2,28	42,5	3,16
0,403	2,0	3,0	20	0,150	10,0	2,49	52,0	3,61
0,373	4,0	3,0	20	0,150	10,0	2,49	49,8	3,49
0,370	3,0	3,5	20	0,175	9,8	3,07	72,4	3,70
0,368	5,0	4,0	20	0,200	9,5	3,44	90,8	3,80
0,445	2,0	4,5	20	0,225	9,2	3,79	114,5	4,56
0,379	5,0	5,0	20	0,250	9,1	4,15	133,0	4,06
0,404	6,0	5,0	20	0,250	9,1	4,15	130,0	4,42
0,346	8,0	6,0	20	0,300	8,8	4,80	163,0	4,18
0,416	5,0	7,0	20	0,350	8,5	5,39	217,0	4,93
0,400	5,0	7,0	20	0,350	8,5	5,39	217,0	4,73
0,433	3,0	8,0	20	0,400	8,2	5,96	277,0	5,09
0,457	5,0	10,0	20	0,500	7,8	6,94	354,0	5,98
0,308	2,0	1,5	25	0,060	11,1	1,43	17,5	3,01
0,255	4,0	2,5	25	0,100	10,6	2,32	43,2	2,25
0,408	4,0	3,0	25	0,120	10,4	2,74	60,5	3,66
0,332	5,0	3,5	25	0,140	10,1	3,14	75,2	3,24
0,360	5,0	4,0	25	0,160	9,9	3,54	97,3	3,52
0,379	5,0	4,5	25	0,180	9,8	3,84	111,0	3,86
0,444	5,0	5,0	25	0,200	9,5	4,29	142,0	4,56
0,485	2,0	5,5	25	0,220	9,3	4,60	167,0	4,97
0,473	2,0	6,0	25	0,240	9,2	5,02	196,0	4,97
0,370	8,0	6,0	25	0,240	9,2	5,02	177,0	4,31
0,428	3,0	7,0	25	0,280	8,9	5,67	243,0	4,78
0,477	6,0	8,0	25	0,320	8,6	6,30	282,0	5,87
0,362	5,0	5,0	30	0,167	9,9	4,40	148,0	3,58
0,388	6,0	6,0	30	0,200	9,5	5,16	197,0	4,15
0,378	8,0	8,0	30	0,267	9,0	6,55	302,0	4,49
0,467	2,0	9,0	30	0,300	8,8	7,20	388,0	5,33
0,515	4,0	10,0	30	0,333	8,5	7,80	455,0	6,09
0,427	4,0	4,0	35	0,114	10,5	3,66	104,0	3,94
0,506	5,0	6,0	35	0,171	9,8	5,26	208,0	5,16
0,460	5,0	6,0	35	0,171	9,8	5,26	208,0	4,70
0,390	6,0	7,0	35	0,200	9,5	6,00	258,0	4,31
0,422	6,0	9,0	35	0,257	9,0	7,47	404,0	4,87
0,365	8,0	10,0	35	0,285	8,9	8,08	446,0	4,51
0,355	10,0	20,0	40	0,500	7,8	13,90	1310,0	8,12
0,420	8,0	10,0	50	0,200	9,5	8,60	490,0	5,02
0,452	6,0	12,0	50	0,240	9,2	10,00	694,0	5,32
0,440	6,0	12,0	60	0,200	9,5	10,30	761,0	4,86
0,571	10,0	20,0	40	0,500	7,8	13,90	1310,0	8,12

«Джонсона», «Кука» или каркасно-стержневые фильтры конструкции В. М. Гаврилко).

Пример расчета. Требуется определить проницаемость фильтра «Джонсона» k_1 диаметром 4″ с шириной зазора между витками проволоки 0,75 мм. Внутренний радиус фильтра $r_1 = 52{,}5$ мм, наружный радиус фильтра $r_2 = 60{,}0$ мм, высота щели $h_1 = 0{,}75$ мм, ширина щели $b_1 = 10{,}3$ мм, толщина проволоки $h_2 = 1{,}6$ мм, толщина стержня $b_2 = 4{,}0$ мм.

1. Скважность фильтра определяется по уравнению (II.15)

$$\eta = 0{,}230.$$

2. Гидравлический радиус $r_н$ щели фильтра по уравнению (II.29) оценивается равным

$$r_н = 0{,}7 \text{ мм}.$$

3. Показатель сопротивления трубы $\bar{s}$ щелевого фильтра для $h_1/b_1 = 0{,}073$, согласно рис. 66,

$$\bar{s} = 10{,}9.$$

4. Коэффициент сопротивления фильтра по графику (рис. 68) определяется равным

$$T = 0{,}84.$$

В соответствии с полученными значениями параметров величина проницаемости фильтра рассчитывается по формуле (II.28)

$$k_1 = 9{,}3 \text{ см/с}.$$

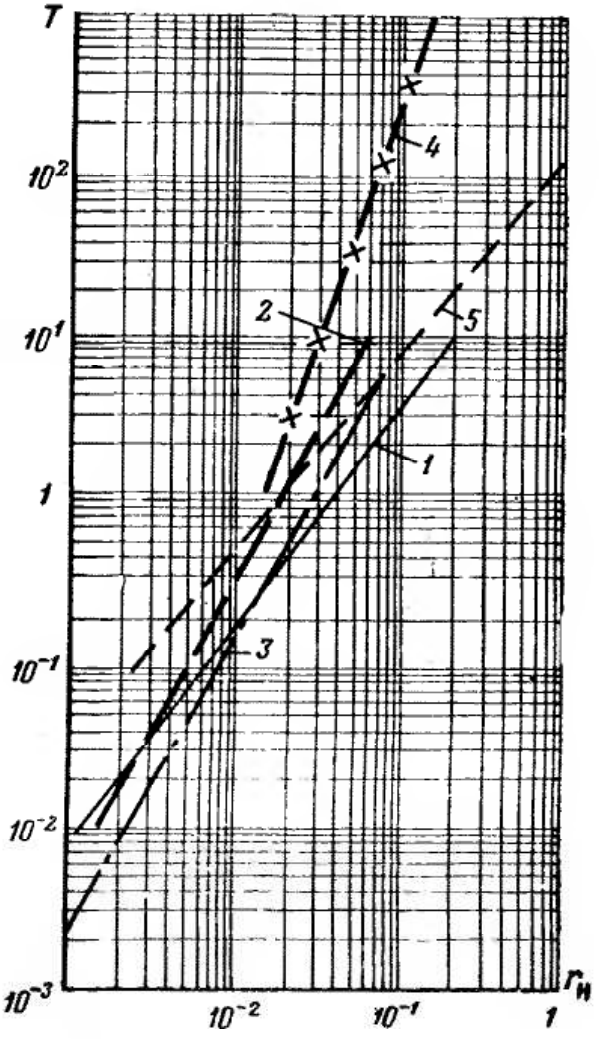


Рис. 68. График изменения коэффициента сопротивления фильтров T в зависимости от гидравлического радиуса щели фильтра:

1 — пластмассовые фильтры-каркасы с вертикальными фрезерованными щелями; *2* — фильтры с мостообразными отверстиями; *3* — каркасно-проволочные фильтры; *4* — ребристые пластмассовые фильтры; *5* — металлические фильтры-каркасы с вертикальными щелями

Гидравлические потери в фильтрах существенно увеличиваются при нарушении линейного режима течения. Для оценки критической скорости фильтрации, превышение которой обусловливает невозможность использования приведенных формул для определения проницаемости фильтра, было проведено две серии опытов [111]: с фильтрами «Джонсона» диаметром 2″, шириной щели 0,5 мм в пористых средах различной проницаемости, с фильтрами диаметром 2″, различной шириной щели в мелком гравии с размером зерен 2—3 мм.

В результате опытов установлено, что критическая скорость для исследованных фильтров «Джонсона» находится в пределах $1{,}7 \cdot 10^{-1} \leqslant v_{кр} \leqslant 1$ см/с.

Максимальное влияние турбулентности прослеживается при небольших размерах щелей и малых значениях скважности фильтров. В общем, каркасно-проволочные фильтры характеризуются весьма благоприятными гидравлическими показателями — высокой проницаемостью, небольшим входным сопротивлением и относительно высокими критическими скоростями.

Фильтры-каркасы с вертикальными щелями из штампованных материалов, как правило, имеют перфорационные отверстия, удлиненные в вертикальной плоскости. Аналогичные по форме отверстия имеют фильтры из пластмасс, щели которых нарезаются фрезами. Расчеты проницаемости фильтров этого типа ведутся по формуле (II.28). При этом скважность фильтра-каркаса определяется из выражения

$$\eta = \frac{nb_1 (\pi/4b_1 + h_1 - b_2)}{\pi (r_1 + r_2)(h_1 + h_2)}, \qquad \text{(II.31)}$$

где b_1 — ширина щели; b_2 — расстояние по горизонтали между щелями; h_1 — длина щели; h_2 — расстояние по вертикали между щелями; r_1 и r_2 — соответственно внутренний и наружный радиусы фильтра.

Гидравлический радиус щели фильтра

$$r_н = \frac{\frac{\pi}{4} b_1^2 + b_1 h_1 - b_1^2}{\frac{\pi}{2} b_1 + h_1 - b_1}. \qquad \text{(II.32)}$$

Показатель сопротивления трубы $\bar{s}$ в первом приближении может быть определен по графику на рис. 66, а показатель сопротивления фильтра — по графику на рис. 68, полученному на основании гидравлических исследований [109, 110] промышленных фильтров со скважностью 0,218—0,506 и с толщиной стенок до 8 мм (фильтры из штампованных материалов с открытыми щелями). Данные об изменении проницаемости этих фильтров в зависимости от скважности приведены на рис. 65. Как видно из рисунка, эта зависимость является линейной и осредненно аппроксимируется зависимостью

$$k_1 = 10{,}5\eta \qquad \text{(II.33)}$$

и находится в пределах

$$7{,}4\eta \leqslant k_1 \leqslant 13{,}0\eta. \qquad \text{(II.34)}$$

Опытные работы проводили с образцами промышленных фильтров без антикоррозионных покрытий. В действительности же всеми фирмами ФРГ, выпускающими эти конструкции и производящими фильтры по лицензиям фирм ФРГ в США, Югославии

и других странах, на фильтры наносятся различные покрытия. Каждое покрытие устойчиво при определенной толщине, и влияние покрытий на изменение проницаемости фильтров различно. Исследования фильтров с антикоррозионными покрытиями [109] свидетельствуют о том, что максимальное уменьшение проницаемости наблюдается при электрофоретическом гуммировании и достигает 26% по сравнению с фильтрами без покрытий (табл. 47).

Таблица 47

Размеры и расчетные значения проницаемости k_1 щелевого фильтра с различными покрытиями

Вид покрытия	Размеры, мм									
	r_2-r_1	b_1	h_1	b_2	h_2	$r_н$	η	$\bar{s}$	T	k_1, см/с
Без покрытия	3,18	5,0	20,0	4,0	6,0	4,10	0,400	9,0	142	3,96
Огненное цинкование	3,25	4,9	19,2	4,1	6,8	4,03	0,380	9,0	137	3,78
Рильсан	3,50	4,2	18,9	4,8	7,1	3,54	0,328	9,3	104	3,16
Битум	3,30	4,9	19,8	4,1	6,2	4,07	0,392	9,1	140	3,82
Электрофоретическое гуммирование	3,60	4,1	18,8	4,9	7,2	3,36	0,314	9,3	98	2,92

В общем же следует отметить, что можно обеспечить довольно большие значения скважности и проницаемости фильтров при антикоррозионном покрытии их.

Гидравлические исследования фильтров из пластмасс с прямоугольными щелями, которые осуществляются фрезерованием, позволяют также оценить их проницаемость как функцию геометрических характеристик фильтра и щелей. При этом скважность фильтра определяется по формуле

$$\eta = \frac{nb_1(h_1 - b_2)}{\pi(r_1 + r_2)(h_1 + h_2)}, \qquad \text{(II.35)}$$

где n — число щелей; b_1 — ширина щели; h_1 — длина (высота) щели; b_2 — ширина перемычки; h_2 — высота перемычки.

Гидравлический радиус $r_н$ щели фильтра определяется соотношением

$$r_н = \frac{b_1 h_1}{b_1 + h_1}. \qquad \text{(II.36)}$$

Показатель сопротивления трубы $\bar{s}$ можно найти по графику на рис. 66, а показатель сопротивления фильтра T — по графику на рис. 68. При известных значениях $\bar{s}$ и T величина k_1 оценивается по формуле (II.28). Экспериментальные значения k_1 и указанных параметров для некоторых фильтров этого типа приведены в табл. 48.

Таблица 48

Характеристика фильтров из пластмасс с фрезерованными вертикальными щелями

№ фильтра	k_1, см/с	η	$r_н$, мм	$\bar{s}$	T
1	0,044	0,016	0,20	12,0	0,91
2	0,098	0,028	0,30	12,0	1,60
3	0,210	0,054	0,49	11,9	3,83

Проницаемость этих фильтров значительно меньше проницаемости стальных конструкций с антикоррозионными покрытиями, что предопределяется прежде всего их малой скважностью.

Исследования зависимости отношения скорости движения воды через фильтр к градиенту от скорости показывают, что критическая скорость для стальных фильтров со щелями, ориентированными в вертикальной плоскости, находится в пределах $0{,}01 \leqslant v_{кр} \leqslant 0{,}08$ см/с.

Нижняя граница $v_{кр} = 0{,}01$ см/с характерна для стальных фильтров с небольшой скважностью ($\eta \to 0{,}25$), малой толщиной стенки ($r_2 - r_1 \to 1{,}5$ мм) и небольшой шириной щели ($b_1 \to \to 1{,}0$ мм). Верхний предел $v_{кр} = 0{,}08$ см/с можно использовать при оценке критической скорости для стальных фильтров с высокой скважностью ($\eta \to 0{,}6$), большой толщиной стенки ($r_2 - r_1 \to 10{,}0$ мм), значительной шириной щели ($b_1 \to 20{,}0$ мм).

Для щелевых фильтров из пластмасс линейный закон течения нарушается в области $0{,}008 \leqslant v_{кр} \leqslant 0{,}02$ см/с.

Нижний предел $v_{кр} = 0{,}008$ см/с применим для пластмассовых щелевых фильтров с небольшой шириной щели (b_1 или $h_1 \to \to 0{,}2$), верхний предел $v_{кр} = 0{,}002$ см/с — для фильтров с шириной щели, стремящейся к 2 мм.

Пластмассовые фильтры с горизонтальными фрезерованными щелями. Для расчета проницаемости пластмассовых фильтров с горизонтальными щелевыми отверстиями уравнение (II.28) неприменимо, так как не выполняется условие постоянства скоростей по площади щели. Поэтому были проведены опыты для выяснения влияния размеров щелей на проницаемость фильтров.

Установлено, что при постоянной высоте щели с увеличением ее ширины, а следовательно и скважности, значительно возрастает проницаемость (рис. 69).

При постоянной ширине щели проницаемость значительно увеличивается с ростом высоты щели, особенно в интервале изменения высоты щели 0,5—1 мм (рис. 70). Щелевые фильтры с малой высотой щели ($h_1 \leqslant 0{,}3$ мм) имеют небольшую проницаемость и гидравлически несовершенны. Увеличение скважности за счет приращения высоты щели при $h_1 > 1$ мм не приводит к заметному приращению проницаемости. Область нарушения

линейного режима течения находится в пределах $0{,}008 \leqslant v_{кр} \leqslant 0{,}02$ см/с.

Фильтры с отклонителем гравия. Из рассмотренных выше фильтров с отклонителем гравия исследовались фильтры с мостообразными отверстиями [110] и с мелкой ребристостью [10], также играющей роль конструктивного элемента для исключения прямого наложения водоносных пород на водоприемную поверхность фильтра.

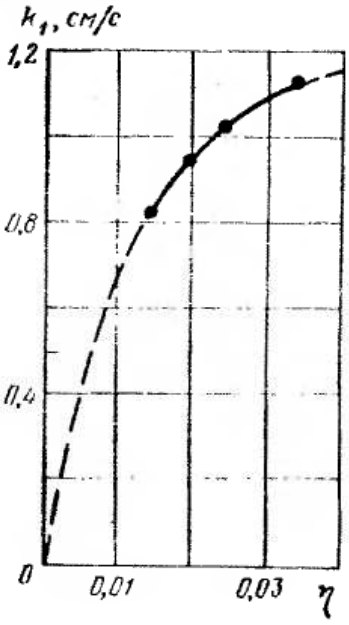


Рис. 69. График изменения водопроницаемости k_1 фильтра из ПВХ с горизонтальными щелями при постоянной высоте щели ($h_1 = 1$ мм) и переменной ее ширине ($17 \leqslant b_1 \leqslant 39$ мм)

Фильтры с мостообразными отверстиями исследовались в широком диапазоне изменения радиусов r_1: от 24,5 до 149 мм. В качестве промышленных образцов использовали

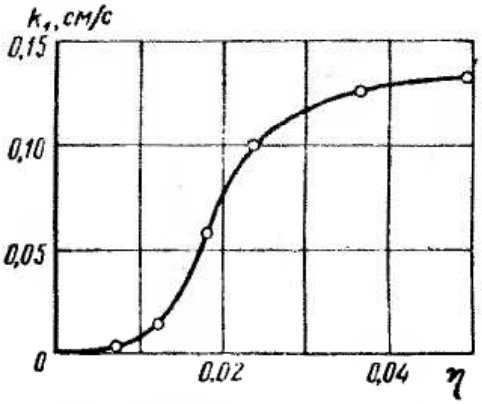


Рис. 70. График изменения водопроницаемости k_1 фильтра из ПВХ с горизонтальными щелями при постоянной ширине щели ($b_1 = 28$ мм) и переменной ее высоте ($0{,}3 \leqslant h_1 \leqslant 2$ мм)

фильтры, выпускаемые фирмой «Нольд». В опытах варьировались размеры отверстий, величина свободного прохода под мостом (высота моста), толщина стенки фильтра. Модель для описания гидравлики фильтров с щелевыми отверстиями требует введения новых показателей, которые учитывают деформацию линий тока, связанную со сложным строением водоприемной поверхности фильтра.

В качестве параметра для описания этих искажений потока вводится критерий Деана [108], с помощью которого в трубной гидравлике учитываются потери напора в прямолинейных трубах

$$\text{Де} = \frac{r_н \bar{v}}{2\nu} \sqrt{\frac{r_н}{R_1}}, \qquad \text{(II.37)}$$

где $r_н$ — гидравлический радиус трубы; $\bar{v}$ — скорость движения воды в трубе, осредненная по ее сечению; ν — коэффициент кинематической вязкости; R_1 — радиус кривизны трубы.

Согласно [108], потери напора Δp в криволинейном сечении трубы выражаются формулой

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2 l}{4 r_н} \varphi (Де). \qquad (II.38)$$

Здесь $\lambda = \overline{4s}/Re$ — коэффициент сопротивления прямолинейного участка трубы; $\overline{s}$ — показатель сопротивления трубы; l — длина трубы; φ (De) — функция от числа Деана.

Для определения φ (Де) можно принять [10]

$$\varphi (Де) = \begin{cases} 1 \text{ для } 0 \leqslant Де < 16 \\ 0{,}37 Де^{0{,}36} \text{ для } 16 \leqslant Де \leqslant 1000. \end{cases} \qquad (II.39)$$

Из уравнения (II.38) по аналогии с щелевыми фильтрами следует формула для расчета проницаемости фильтра с мостообразными отверстиями

$$k_1 = \eta \frac{g}{\gamma} \frac{r_н}{\overline{s} T} \frac{1}{\varphi (Де)} \qquad (II.40)$$

(T — коэффициент сопротивления фильтра).

Опытные работы для оценки сопротивления фильтра (выражаемого коэффициентом фильтрации), а также оптимальных конструктивных элементов мостообразных отверстий проводили при трапецеидальном и прямоугольном профилях мостов. В результате установлено, что при заданной величине бокового отверстия w увеличение ширины щелей b_1 и, следовательно, скважности η_s (по площади щелей) приводит к заметному росту k_1 до тех пор, пока $b_1 \leqslant 2w$. При $b_1 > 2w$ и соответственно $\eta_b > 0{,}1$ приращение скважности практически не сказывается на изменении проницаемости фильтра (рис. 71).

При сохранении постоянной ширины щели b_1 проницаемость фильтра возрастает с увеличением размера бокового отверстия, т. е. с ростом скважности, определяемой площадью боковых отверстий (рис. 72). Увеличение проницаемости фильтров k_1 наблюдается даже при $\eta_s > 0{,}3$. Действующая скважность мостообразных фильтров представляет собой отношение площади боковых отверстий к общей площади поверхности фильтра, т. е. η_s используется при расчетах их проницаемости.

Другие параметры, входящие в уравнение (II.40), определяются следующим образом:

$$r_н = \frac{w h_1}{h_1 + w}. \qquad (II.41)$$

Показатель сопротивления трубы $\overline{s}$ определяется по графику на рис. 66, но по оси абсцисс берется отношение w/h_1. Для оценки коэффициента сопротивления фильтра T используется график на рис. 68, составленный на основе экспериментальных исследо-

ваний. Данные опытов представлены на рис. 65 в виде графика зависимости проницаемости фильтров от их скважности и характеризуют образцы фильтров без антикоррозионных покрытий. Из графиков рис. 65 следует, что проницаемость фильтров с мостообразными отверстиями аппроксимируется в первом приближении линейной функцией

$$k_1 = 19{,}7\eta \qquad \text{(II.42)}$$

и находится в пределах

$$17{,}3\eta \leqslant k_1 \leqslant 22{,}0\eta. \qquad \text{(II.43)}$$

Рассчитанные по уравнению (II.40), гидравлические параметры фильтров с мостообразными отверстиями приведены в табл. 49 для конструкций с нормальными размерами отверстий.

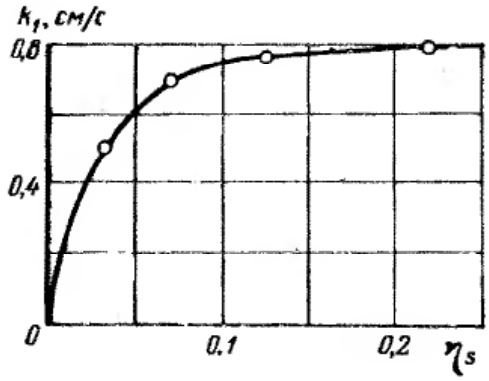


Рис. 71. График зависимости водопроницаемости фильтра k_1 от скважности $\eta_в$ при постоянном размере боковых отверстий и переменной ширине щели

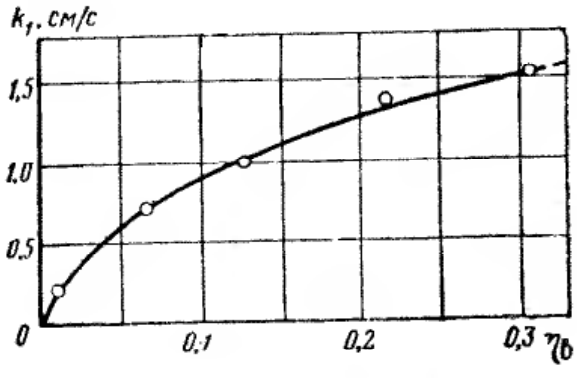


Рис. 72. График зависимости водопроницаемости k_1 фильтра от скважности при постоянной ширине щели и переменной величине бокового отверстия

Исследования фильтров с различными покрытиями: цинковым, рильзановым и битумным (инертол) — и сравнение их с результатами исследований фильтров без покрытий показали, что проницаемость фильтров с покрытием уменьшается менее чем на 10%.

Нарушение линейного режима течения в фильтрах с мостообразными отверстиями наблюдается при скоростях от 0,03 до 0,4 см/с, причем максимальные значения критической скорости соответствуют фильтрам с высокой скважностью.

Щелевые фильтры с ребристой водоприемной поверхностью. По имеющимся представлениям, мелкая ребристость, придаваемая щелевым фильтрам так же, как и металлические «козырьки» в штампованных фильтрах, способствует отклонению гравия, т. е. исключению его прямого наложения на водоприемную поверхность фильтра, и, таким образом, обусловливает лучшие гидравлические характеристики этих конструкций Д. Клотцем

Таблица 49

Расчетные характеристики промышленных фильтров из черной необработанной стали с нормальными отверстиями типа «мост»

η	s'	w	h_1	w/h_1	s	$r_н$	T	$\frac{r_н^2}{sT} \cdot 10^4$, см²	k_1, см/с
0,098	2,5	1,0	18,50	0,054	11,0	0,95	3,30	2,48	1,84
0,153	2,5	1,5	19,25	0,078	10,7	1,39	7,50	2,39	2,78
0,196	2,5	2,0	20,00	0,100	10,5	1,87	13,2	2,39	3,52
0,254	2,5	2,5	20,75	0,121	10,3	2,24	20,7	2,36	4,50
0,090	3,0	1,0	18,50	0,054	11,0	0,95	3,2	2,50	1,74
0,141	3,0	1,5	19,25	0,078	10,7	1,39	7,4	2,44	2,60
0,181	3,0	2,0	20,00	0,100	10,5	1,82	13,0	2,43	3,30
0,236	3,0	2,5	20,75	0,121	10,3	2,24	20,2	2,41	4,28
0,273	3,0	3,0	21,50	0,139	10,2	2,63	27,5	2,47	5,06
0,090	3,5	1,0	18,50	0,054	11,0	0,95	3,1	2,74	1,28
0,181	3,5	2,0	20,00	0,100	10,5	1,82	12,3	2,57	3,49
0,236	3,5	2,5	20,75	0,121	10,3	2,24	19,2	2,54	4,50
0,273	3,5	3,0	21,50	0,139	10,2	2,63	25,8	2,58	5,40
0,084	4,0	1,0	18,50	0,054	11,0	0,95	3,1	2,64	1,70
0,121	4,0	1,5	19,25	0,078	10,7	1,39	7,0	2,58	2,54
0,169	4,0	2,0	20,00	0,100	10,5	1,82	12,6	2,50	3,20
0,220	4,0	2,5	20,75	0,121	10,3	2,24	19,6	2,48	4,11
0,256	4,0	3,0	21,50	0,139	10,2	2,63	26,5	2,56	4,93
0,066	4,0	1,0	21,50	0,048	11,1	0,95	3,2	2,55	1,28
0,096	4,0	1,5	22,25	0,067	10,9	1,42	7,0	2,64	1,91
0,132	4,0	2,0	23,00	0,087	10,6	1,84	12,6	2,54	2,52
0,161	4,0	2,5	23,75	0,105	10,4	2,26	19,6	2,51	3,03
0,199	4,0	3,0	24,50	0,123	10,3	2,67	26,2	2,64	3,95
0,225	4,0	3,5	25,25	0,139	10,2	3,07	36,5	2,54	4,28
0,266	4,0	4,0	26,00	0,154	10,0	3,47	46,8	2,57	5,15
0,062	5,0	1,0	21,50	0,048	11,1	0,95	3,2	2,54	1,20
0,090	5,0	1,5	22,25	0,067	10,9	1,42	7,3	2,54	1,72
0,124	5,0	2,0	23,00	0,087	10,6	1,84	12,1	2,64	2,45
0,152	5,0	2,5	23,75	0,105	10,4	2,26	18,8	2,62	3,03
0,188	5,0	3,0	24,50	0,123	10,3	2,67	26,0	2,66	3,76
0,213	5,0	3,5	25,25	0,139	10,2	3,07	36,1	2,57	4,10
0,257	5,0	4,0	26,00	0,154	10,0	3,47	44,0	2,74	5,21
0,058	6,0	1,0	21,50	0,048	11,1	0,95	2,9	2,81	1,22
0,085	6,0	1,5	22,25	0,067	10,9	1,42	7,0	2,65	1,69
0,117	6,0	2,0	23,00	0,087	10,6	1,84	11,9	2,68	2,36
0,144	6,0	2,5	23,75	0,105	10,4	2,26	18,3	2,69	2,91
0,178	6,0	3,0	24,50	0,123	10,3	2,67	26,3	2,64	3,52
0,203	6,0	3,5	25,25	0,139	10,2	3,07	33,5	2,77	4,21
0,239	6,0	4,0	26,00	0,154	10,0	3,47	33,1	2,74	4,91
0,057	5,0	1,0	25,75	0,039	11,3	0,96	3,1	2,58	1,12
0,089	5,0	1,5	26,63	0,056	11,0	1,42	7,3	2,51	1,68
0,116	5,0	2,0	27,50	0,073	10,8	1,87	13,1	2,48	2,16
0,143	5,0	2,5	28,38	0,088	10,6	2,30	19,8	2,52	2,71
0,177	5,0	3,0	29,25	0,103	10,5	2,72	27,6	2,55	3,40
0,204	5,0	3,5	30,13	0,116	10,4	3,14	36,1	2,62	4,03
0,240	5,0	4,0	31,00	0,129	10,3	3,54	47,6	2,55	4,61
0,055	6,0	1,0	25,75	0,039	11,3	0,96	3,0	2,67	1,22
0,085	6,0	1,5	26,63	0,056	11,0	1,42	7,0	2,62	1,67
0,111	6,0	2,0	27,50	0,073	10,8	1,87	11,9	2,72	2,27

Продолжение табл. 49

η	s'	w	h_1	w/h_1	s	$r_н$	T	$\frac{r_н^2}{ST}\cdot 10^4$, см²	k_1, см/с
0,137	6,0	2,5	28,38	0,088	10,6	2,30	18,9	2,65	2,77
0,170	6,0	3,0	29,25	0,103	10,5	2,72	26,3	2,68	3,42
0,195	6,0	3,5	30,43	0,116	10,4	3,14	35,0	2,71	3,96
0,230	6,0	4,0	31,00	0,129	10,3	3,54	44,1	2,75	4,77
0,058	8,0	1,0	25,75	0,039	11,3	0,96	2,8	2,87	1,09
0,077	8,0	1,5	26,63	0,056	11,0	1,42	6,3	2,90	1,68
0,102	8,0	2,0	27,50	0,073	10,3	1,87	11,1	2,92	2,23
0,126	8,0	2,5	28,38	0,088	10,6	2,30	17,3	2,90	2,73
0,156	8,0	3,0	29,25	0,103	10,5	2,72	24,3	2,90	3,40
0,217	8,0	3,5	30,13	0,116	10,4	3,14	34,3	2,76	4,41
0,180	8,0	4,0	31,00	0,129	10,3	3,54	44,1	2,76	4,73

Примечаний: 1. η—скважность; s'—толщина листа, w—высота отверстия сбоку; h_1—действительная высота щели.
2. Размеры даны в мм.

установлено, что проницаемость пластмассовых фильтров с удлиненными вертикальными щелями и продольными ребрами может оцениваться по формуле (II.28) с определением коэффициентов $\bar{s}$ и T соответственно по графикам на рис. 66 и 68.

Исследования фильтров из ПВХ диаметром от 32 до 168 мм

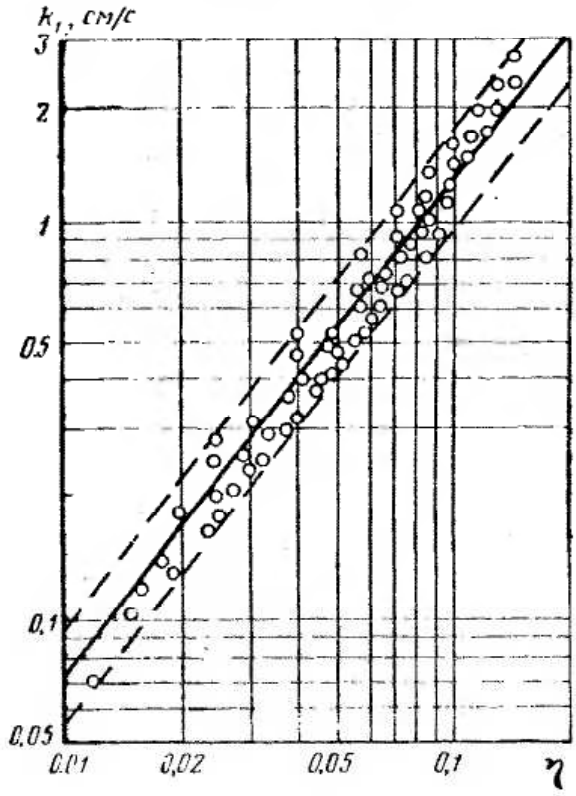


Рис. 73. График зависимости проницаемости k_1 ребристых фильтров с вертикальными щелями от скважности

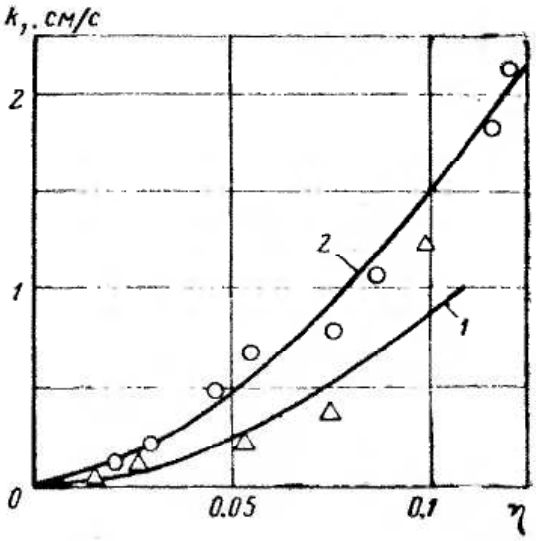


Рис. 74. График зависимости проницаемости k_1 гладких (*1*) и ребристых (*2*) фильтров с вертикальными щелями от скважности

показали, что проницаемость ребристых фильтров при скважности более 0,02—0,03 связывается линейной зависимостью со

скважностью (рис. 73). Сравнение фильтров одинакового диаметра (51 мм) с вертикальными щелями, с ребрами и без них показывает, что проницаемость ребристых фильтров выше (рис. 74).

Аналогичная зависимость прослеживается и при анализе данных исследований фильтров со щелями в горизонтальной плоскости (фильтры SBF—OBO фирмы «Шенебекер»). На рис. 75 приведены графики изменения проницаемости ребристых фильтров, свидетельствующие о большей проницаемости и, следовательно, меньших сопротивлениях ребристых фильтров с горизонтальными щелями.

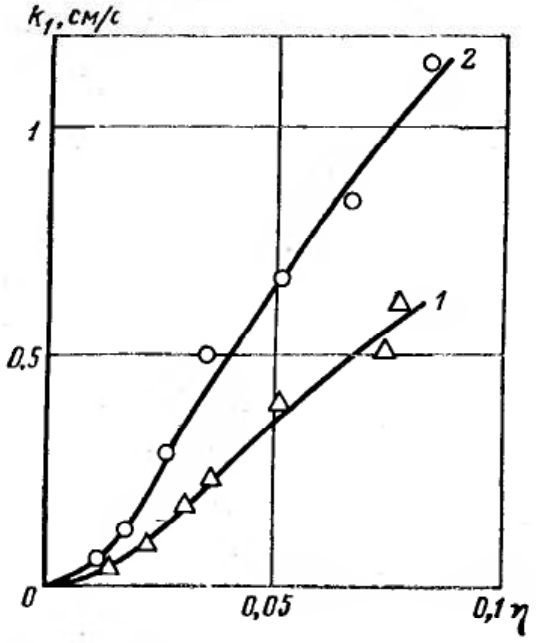


Рис. 75. График зависимости проницаемости k_1 гладких (*1*) и ребристых (*2*) фильтров с горизонтальными щелями от скважности

Следует однако отметить, что величина проницаемости фильтров этого типа невелика и даже при максимальных скважностях не превышает 1,5 см/с.

Фильтры с водоприемной поверхностью из сеток. Гидравлика фильтров с дополнительной водоприемной поверхностью зависит как от особенностей каркаса, так и от типа сетки. Рассмотрим особенности гидравлики сетчатых фильтров с сетками квадратного (рис. 76, *а*), киперного (рис. 76, *б*) и галунного плетения (рис. 76, *в*).

В сетках квадратного и киперного плетения размер проволоки утка равен толщине проволоки основы. В сетках галунного плетения $d_1 > d_2$ (d_1 — толщина проволоки основы, d_2 — толщина проволоки утка) и $w_1 > w_2$ (w_1 и w_2 — размеры отверстий в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Сетчатые фильтры рассматриваются как система из концентрических слоев с различной проницаемостью (фильтр, гравийная обсыпка, водоносный горизонт), причем сетка и каркас считаются единым целым. В соответствии с этим необходимо ввести единые геометрические характеристики сетчатых фильтров, которые учитываются скважностью каркаса и сетки.

Скважность сеток квадратного и киперного плетения определяется по формуле

$$\eta'' = w^2/(w+d)^2, \qquad \text{(II.44)}$$

а сеток галунного плетения из выражения

$$\eta'' = \frac{d_1(w_1+\pi d_1)}{8(w_1+d_1)(w_2+d_2)}. \qquad \text{(II.45)}$$

Суммарная скважность сетчатого фильтра η выражается при известной скважности каркаса η' как произведение скважностей каркаса и сетки

$$\eta = \eta' \eta''. \qquad \text{(II.46)}$$

Экспериментально исследовались сетки из сарана, полиэтилена и меди со скважностью 0,046—0,592. Характерно, что при применении сеток квадратного плетения их влияние на проницаемость фильтра невелико. Если учесть, что в опытах использовались сетки довольно большой скважности при значительной скважности каркаса (перфорированной стальной трубы диаметром 51 мм), то получение линейной зависимости k_1 от η объясняется

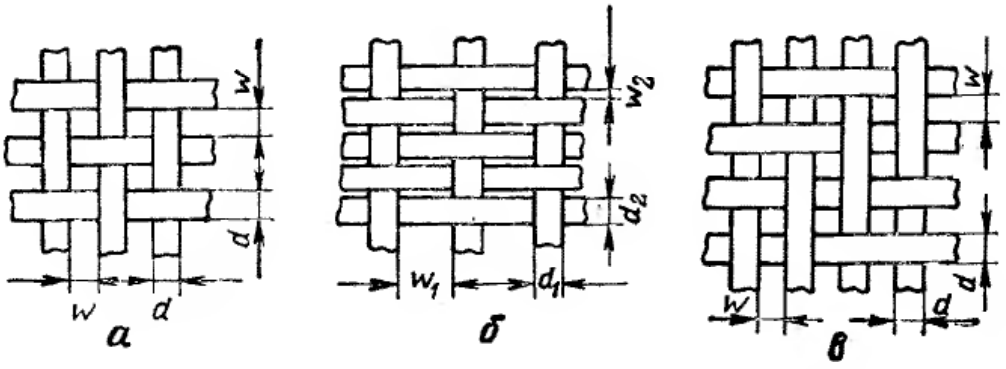


Рис. 76. Схема сеток различного плетения

отсутствием начального участка зависимости проницаемости фильтра от скважности (см. рис. 65).

Проницаемость фильтров с сетками киперного и галунного плетений значительно меньше и не превышает 0,3—0,4 см/с. Если проницаемость фильтров с сетками квадратного плетения аппроксимируется практически одной зависимостью от скважности, то при использовании в качестве водоприемной поверхности сеток галунного и киперного плетений определяющими являются гидравлические потери на сетках. Это позволяет сделать выводы о гидравлически неблагоприятных условиях работы фильтров с плотными сетками.

Фильтры блочного типа. Применительно к условиям работы поглощающих скважин Д. Клотцем [112] были исследованы фильтры блочного типа на основе различных связующих с каркасами, имеющими открытую щелевую перфорацию и мостообразные отверстия (фильтры фирмы «Хагуста»). Проницаемость фильтра с каркасом определяется по формуле

$$k_1 = \frac{k_\Phi k_\text{б} (b_\Phi + b_\text{б})}{b_\Phi k_\text{б} + b_\text{б} k_\Phi}, \qquad \text{(II.47)}$$

где k_Φ и $k_\text{б}$ — проницаемость соответственно каркаса фильтра и блоков; b_Φ и $b_\text{б}$ — толщина стенки соответственно каркаса и блока.

В опытах использовали блоки из сортированного гравия с размером частиц 0,4—0,7; 1—2; 2—3; 3—5 мм. Проницаемость стальных каркасов с открытой перфорацией колебалась в пределах 2,98—4,64 см/с (скважность от 0,323 до 0,430), проницаемость пластмассовых каркасов с горизонтальными щелями колебалась от 0,27 до 0,88 см/с (скважность от 0,053 до 0,212), проницаемость каркасов с мостообразными отверстиями находилась в пределах 1,19—3,08 см/с (скважность от 0,061 до 0,165).

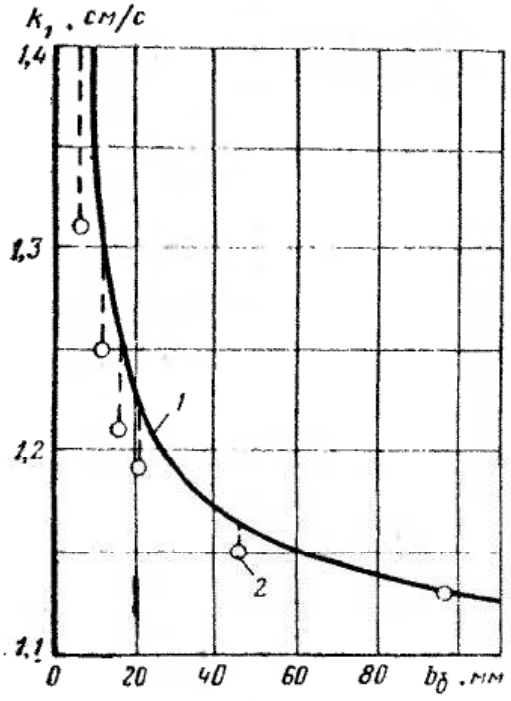


Рис. 77. График зависимости проницаемости k_1 блочного фильтра от толщины блока:

1 — теоретическая кривая, *2* — экспериментальные точки

Проведенными экспериментами доказана возможность использования для оценки проницаемости блочных фильтров с каркасами формулы (II.47), причем наилучшее совпадение отмечается для фильтров с мостообразными отверстиями. Достаточно близкие опытные данные получены при исследованиях зависимости проницаемости блочного фильтра от толщины фильтрующего пористого элемента. На рис. 77 приведен график зависимости k_1 от толщины блока фильтра. При увеличении толщины стенки k_1 становится близкой к проницаемости пористого элемента, а при ее уменьшении сказывается в основном проницаемость каркаса. Осредненная проницаемость k_1 изучаемых конструкций фильтра находилась в пределах 0,3—5,1 см/с.

Исследования позволяют заключить, что наиболее благоприятные гидравлические характеристики имеют фильтры каркасно-проволочного типа, проницаемость которых в несколько раз выше проницаемости щелевых фильтров с открытой перфорацией, отверстия которых имеют отклонитель гравия, и существенно выше проницаемости сетчатых и блочных фильтров. Следует отметить, что каркасно-проволочные конструкции имеют максимальную скважность, которая легко реализуется благодаря особенностям их устройства. Из гидравлических исследований также следует вывод, что увеличение скважности играет более значительную роль, чем усложнение водоприемной поверхности отклонителем гравия, служащим для уменьшения контактных потерь напора.

Максимальные сопротивления имеют фильтры с дополнительной водоприемной поверхностью из сеток и фильтры блочного типа. Количественная характеристика проницаемости фильтров

различных конструкций, приведенная выше, важна для создания промышленных конструкций фильтров и может быть использована при проектировании поглощающих (нагнетательных) скважин и при определении естественной скорости движения грунтовых вод с использованием индикаторов. Соответствие же проницаемости фильтров в работах Д. Клотца и аналогичных исследованиях с учетом контактных потерь напора другими методами требует дополнительной проверки.

§ 13. СОПРОТИВЛЕНИЕ ФИЛЬТРОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В КОНТАКТЕ С ПОРОДОЙ

Конструктивные параметры фильтров существенно изменяются при наложении водоносных пород (естественных или гравийных обсыпок) на их водоприемную поверхность, вследствие чего искажается форма отверстий: происходит заклинивание их полное или частичное, что влечет за собой уменьшение суммарной скважности фильтров.

Оценить характер влияния контактных гидравлических потерь на суммарные потери напора при движении воды в фильтре можно на основе моделирования в грунтовых лотках и натурных условиях.

Сопротивление гравийных фильтров с различными опорными каркасами. Исследования фильтров различной конструкции в контакте с породами и гравийными обсыпками были проведены во ВНИИ ВОДГЕО.

В круглом фильтрационном лотке диаметром 700 мм опытным путем определяли сопротивления $\zeta_{2ф.к}$. Исследования проводили с совершенными по степени вскрытия пласта скважинами ($\zeta_1 = 0$). Линейность течения сохранялась и при максимальных расходах, т. е. $\zeta_{2н.л} = 0$. В этом случае дополнительное безразмерное сопротивление ζ_2 является, очевидно, сопротивлением фильтра.

В лабораторных условиях исследовали фильтры с круглой перфорацией, вертикальными щелями, длина которых равна мощности пласта, щелями ограниченной длины и щелями, ориентированными в горизонтальной плоскости.

Гравийные фильтры моделировались с каркасом диаметром от 20 до 108 мм, размер гравия составлял 1—3; 3—5 и 5—7 мм.

Опытные данные обрабатывались графоаналитически по методике, предложенной в [20]. При изучении гидравлических характеристик фильтров с круглой перфорацией величина скважности задавалась равной 1,6; 2,4; 4,8; 9,6 и 12,8%. Графики изменения сопротивлений фильтров с круглыми отверстиями представлены на рис. 78, *а*. Характер изменения безразмерного показателя гидравлического сопротивления при моделировании оказывается близким к данным В. И. Щурова.

Согласно теоретическим исследованиям (без учета контактных потерь напора), увеличение скважности более 10% не влияет

на приращение удельного дебита или на снижение безразмерного показателя гидравлического сопротивления. Если же проанализировать интенсивность прироста удельного расхода скважины

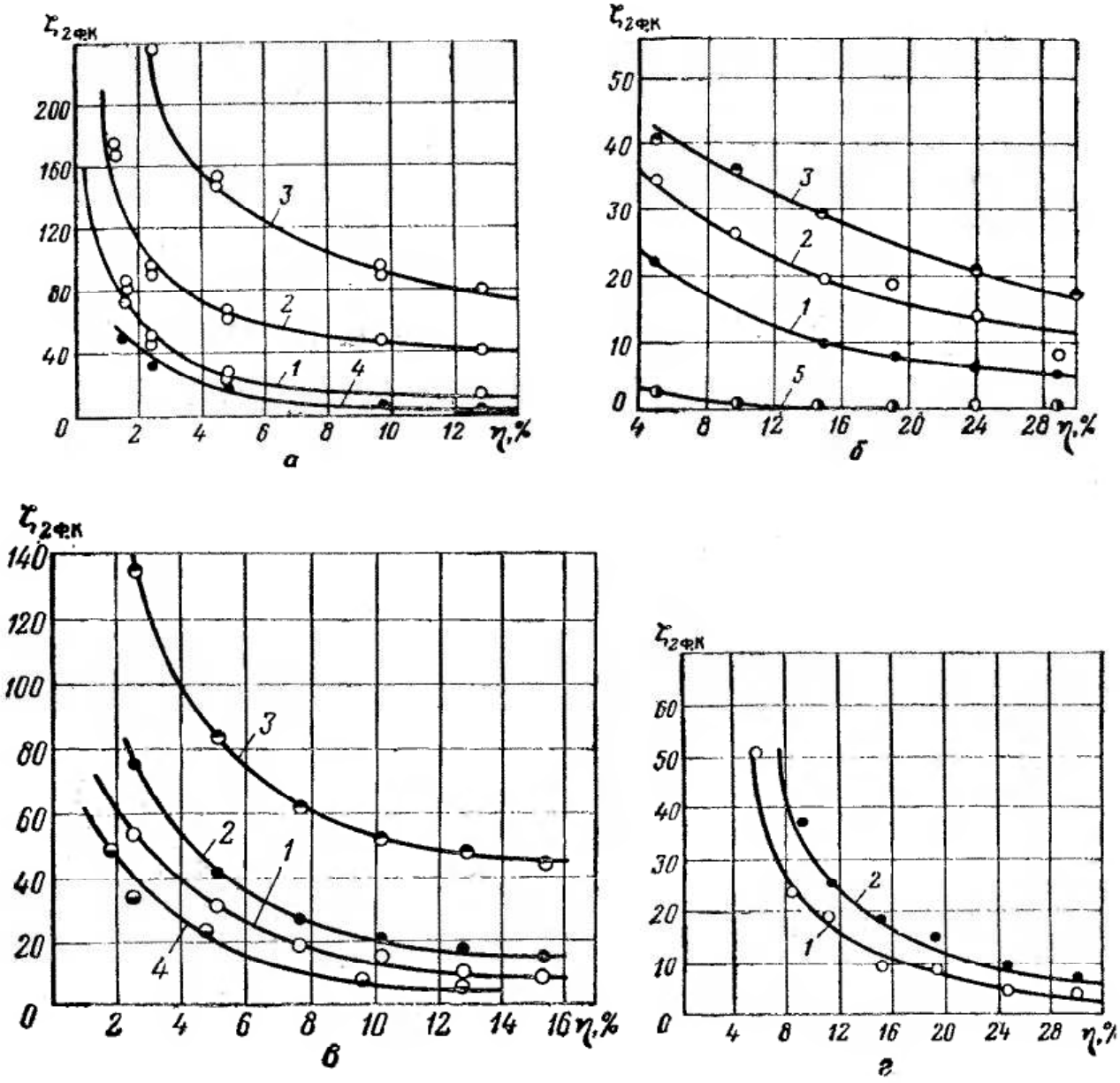


Рис. 78. График зависимости $\zeta_{2ф.к}$ от скважности для фильтров:

а — с круглыми отверстиями; *б* — со щелями по всей мощности пласта; *в* — с вертикальными щелями ограниченной длины; *г* — с горизонтальными щелями; размер гравия: *1* — 1—3 мм; *2* — 3—5 мм; *3* — 5—7 мм; *4* — по данным В. И. Щурова, *5* — теоретическая кривая В. П. Пилатовского

в различных грунтах, то оказывается, что при изменении скважности фильтра от 10 до 15% удельный расход увеличивается на 8—10%. Аналогичные закономерности прослеживаются при варьировании величины скважности фильтров с вертикальными щелями и щелями ограниченной длины (рис. 78, *б*, *в*).

При изучении гидравлических сопротивлений фильтров с горизонтальными щелями моделировались каркасно-стержневые кон-

струкции. Опыты начинались с максимальных скважностей — 30%, а затем уменьшение скважности моделировалось последовательными отключениями отверстий путем замазывания их пластилином. Скважности были приняты равными 30; 24,6; 19,2; 15,1; 11; 8,2 и 5,5%. Причем в фильтрах небольшой скважности сопротивления увеличивались из-за малой степени вскрытия пласта. Графики изменения сопротивлений этих конструкций фильтров приведены на рис. 78, *г*.

Сопоставление фильтров каркасно-проволочного типа с другими конструкциями показывает, что они позволяют получить максимальную скважность по сравнению с щелевыми и перфорированными трубами и большую интенсивность снижения сопротивления с увеличением числа отверстий. При одинаковых скважностях щелевого и каркасно-проволочного фильтров сопротивление последних на 20% меньше (рис. 78, *г*). Эти экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими исследованиями А. Л. Хейна [85] и М. И. Тихова [79].

Рассчитаем коэффициенты фильтрации с учетом контактных потерь, предполагая, что стенку фильтра можно представить в виде элемента пористой среды с толщиной, равной толщине стенки. Это позволяет сопоставить гидравлические характеристики аналогичных конструкций по исследованиям Д. Клотца и института ВОДГЕО. Результаты расчетов коэффициента фильтрации некоторых фильтров с использованием полученных экспериментальным путем значений $\zeta_{2ф.к}$ приведены в табл. 50.

Приведенные данные свидетельствуют о закономерном возрастании коэффициента водопроницаемости фильтра с увеличением скважности. Кроме того, становятся очевидными гидравлические преимущества фильтров с горизонтальными щелевыми отверстиями (фильтры конструкции В. М. Гаврилко, фирм «Джонсон» и «Кук»). Сопоставление сопротивлений фильтров с учетом гидравлических потерь на контакте фильтр — порода (гравийная обсыпка) с результатами экспериментальных исследований Д. Клотца показывает, что коэффициент фильтрации, полученный с применением индикаторов, оказывается значительно большим. Так, при гравийной обсыпке с размером частиц 1—3 мм при $\eta = 32{,}0\%$ коэффициент фильтрации каркасно-проволочных фильтров равен 18,6 и 0,15 см/с соответственно без учета и с учетом контактных гидравлических потерь, при скважности этих же фильтров, равной 3,7%, коэффициенты фильтрации составляют соответственно 0,93 и 0,0108 см/с, т. е. контактные гидравлические потери в гравийных фильтрах приводят к снижению проницаемости в 100 раз и более.

Аналогичная картина прослеживается и при сопоставлении сопротивлений стальных фильтров с вертикальными фрезерованными щелями. При скважности щелевого фильтра 25,3%, по данным Д. Клотца, коэффициент фильтрации составляет 1,96 см/с, а при скважности 26% водопроницаемость такого же фильтра

Таблица 50

Гидравлические характеристики фильтров с контактными потерями напора

Гравий с размером частиц 1—3 мм			Гравий с размером частиц 3—5 мм			Гравий с размером частиц 5—7 мм		
скважность η, %	$\zeta_{2ф.к}$	k_1, см/с	скважность η, %	$\zeta_{2ф.к}$	k_1, см/с	скважность η, %	$\zeta_{2ф.к}$	k_1, см/с
Стержневые фильтры (ширина щели 2 мм)								
3	27,0	0,0149	10	25,0	0,046	12,0	32,0	0,084
4	24,0	0,0168	12	22,5	0,051	14,0	30,0	0,050
5	22,0	0,0183	4	36,0	0,032	6,1	40,0	0,068
8	17,2	0,0233	6	31,5	0,037	8,0	37,5	0,072
10	15,0	0,0266	8	28,0	0,041	9,8	35,0	0,077
18	8,5	0,0462	14	20,5	0,056	16,0	28,0	0,096
24	6,5	0,0596	16	18,5	0,0619	18,0	26,0	0,104
30	5,5	0,0699	18	17,0	0,067	20,0	24,0	0,112
			20	16,0	0,072	24,0	21,0	0,128
			22	14,5	0,076	26,0	19,0	0,141
			24	14,0	0,081	28,0	18,0	0,149
			28	12,0	0,094			
Фильтры с вертикальными щелями ограниченной длины (ширина щели 2 мм)								
5,2	60,0	0,0067	2,7	80	0,015	2,6	135	0,020
5,4	52,5	0,0077	3,0	68	0,017	3,0	121,5	0,022
5,5	50,0	0,0081	3,5	60	0,019	3,5	110	0,025
6,6	35,0	0,0115	4,0	54	0,021	4,0	99,5	0,027
10,0	19,8	0,0203	5,0	44	0,026	6,0	75	0,036
16,0	9,9	0,0398	6,0	37	0,031	7,0	67	0,041
26,0	5,0	0,0764	8,0	27	0,043	9,0	57	0,048
			10,0	20	0,057	11,0	50,5	0,054
			12,0	17	0,067	13,0	48	0,056
			15,0	15	0,076	15,0	46	0,059
Каркасно-проволочные фильтры (ширина щели 2 мм)								
2,7	55,0	0,0074	7,4	50,0	0,023			
4,0	37,5	0,0108	8,0	40,0	0,0289			
8,0	19,5	0,0206	10,0	30,0	0,038			
12,0	10	0,0395	12,0	24	0,048			
14,0	7,0	0,0556	14,0	19,5	0,059			
16,0	5,0	0,0764	16,0	16,7	0,068			
18,0	3,5	0,106	20,0	12,0	0,094			
20,0	2,7	0,134	22,0	10,5	0,108			
22,0	2,5	0,144	24,0	9,0	0,125			
28,0	2,4	0,145	30,0	7,0	0,159			
			32,0	5,5	0,199			

с учетом контактных потерь равна 0,0764 см/с. При относительно малой скважности ($\eta = 5{,}4\%$) эти величины составляют соответственно 0,21 и 0,0077 см/с.

Учитывая небольшую толщину стенки фильтра, которая не превышает 10 мм, гидравлические потери в фильтрах, даже с учетом контактных потерь напора при использовании каркасов со скважностью более 20%, обычно не превышают нескольких сантиметров и могут не учитываться при расчетах скважин. Очевидно, что необходимым условием при этом является применение фильтров-каркасов с высокой скважностью.

Сопротивления сетчатых фильтров. Гранулометрический состав водоносных пород в опытах с сетчатыми фильтрами был следующим: $d_{50} = 0{,}062$; 0,17; 0,25; 0,8; 1,2 мм при максимальных коэффициентах неоднородности 6—8. Водоприемные поверхности выполнялись из сеток № 8/70, 12/90 и 18/130. Полученные значения $\zeta_{2ф.к}$ и k были положены в основу построения графиков $\zeta_{2ф.к}$ для сеток трех типов.

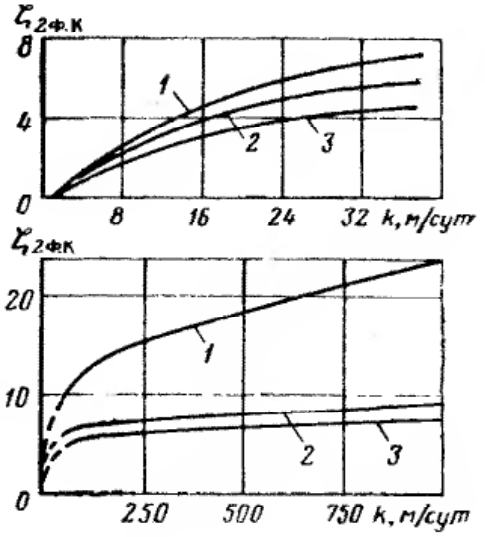


Рис. 79. Графики зависимости показателя сопротивления сетчатого фильтра от коэффициента фильтрации контактирующих пород:

Сетка №: *1* — 18/130; *2* — 12/90; *3* — 8/70

На рис. 79 приведены графики зависимости $\zeta_{2ф.к}$ от коэффициента фильтрации для пород с коэффициентом фильтрации от 4 до 40 м/сут. Аппроксимирование опытных данных производилось логарифмической зависимостью, параметры которой определялись методом наименьших квадратов. По предлагаемым графикам можно определить безразмерные сопротивления сетчатого фильтра на основе трубчатого каркаса со скважностью 12,4% и диаметром отверстий 8 мм при условии сохранения во всей области линейного закона фильтрации.

Область применения этих графиков расширена в результате дополнительных исследований влияния скважности и размера круглых отверстий каркаса на сопротивление фильтра. Закономерность изменения $\zeta_{2ф.к}$ в зависимости от диаметра отверстий при одинаковой скважности $\eta = 12{,}4\%$ была получена в двух сериях опытов с песками при коэффициенте фильтрации 15 и 25 м/сут. Исследовались модели фильтров с отверстиями диаметром 4, 6, 8 и 12 мм, равномерно распределенными по поверхности фильтра. Полученная зависимость $\zeta_{2ф.к} = f(d_0)$ (рис. 80) в обоих случаях указывает на одинаковый темп изменения сопротивления с изменением диаметра отверстий.

Влияние скважности каркаса фильтра на величину $\zeta_{2ф.к}$ изучали на моделях с отверстиями диаметром 8 мм и скважностью

4,4; 8,25; 12,4 и 20%. Выравненные методом наименьших квадратов кривые зависимости $\zeta_{2ф.к} = f(\eta)$ представлены на рис. 81.

Поверочные опыты по определению сопротивлений сетчатых фильтров, проведенные совместно с ВСЕГИНГЕО в Краснодарской геологической экспедиции и Солнечногорской буровой партии, подтвердили справедливость лабораторных проработок. По результатам экспериментальных исследований фильтров с дополнительной сетчатой водоприемной поверхностью можно сделать следующие выводы.

1. Конструкция опорного каркаса сетчатого фильтра существенно влияет на суммарное сопротивление фильтра.

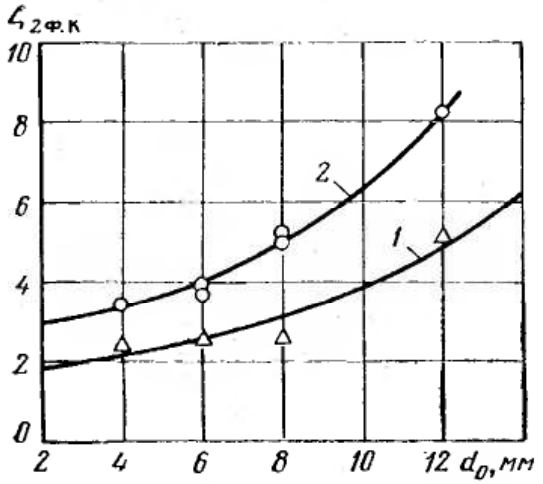


Рис. 80. Графики зависимости показателя сопротивления $\zeta_{2ф.к}$ сетчатого фильтра от диаметра отверстий каркаса при постоянной скважности:

1 — $k_ф$ = 15 м/сут; *2* — $k_ф$ = 25 м/сут

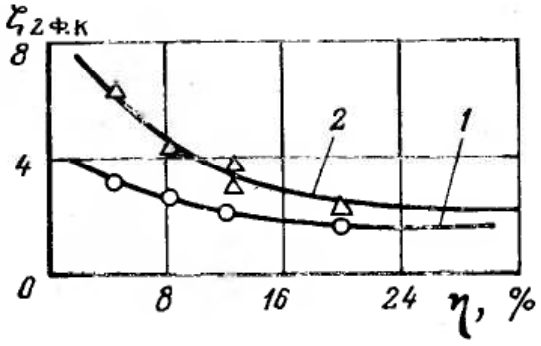


Рис. 81. Графики зависимости показателя сопротивления сетчатого фильтра от скважности (при одинаковом размере отверстий):

1 — $k_ф$ = 15 м/сут; *2* — $k_ф$ = 150 м/сут

2. При увеличении скважности каркаса более 20% сопротивление фильтра уменьшается незначительно.

3. Для фильтров с каркасом из трубы с круглой перфорацией возможно снижение сопротивления за счет уменьшения размера отверстий при некоторой заданной скважности (η = 12,4%). Однако темп снижения сопротивления уменьшается при размере отверстий меньше 4 мм.

4. Применение плотной сетки галунного плетения № 18/130 обусловливает увеличение сопротивления фильтра на 30—50% по сравнению с сетками № 12/90 и 8/70, т. е. существенное значение имеет как тип сетки, так и конструкция каркаса.

Приведенные зависимости и графики для определения сопротивлений различных конструкций фильтров могут быть использованы для оценки потерь напора в фильтрах, расчета дебита скважин с учетом конструкции ее фильтра, определения параметров пластов по данным одиночных откачек, а также при созда-

нии конструкций с оптимальными гидравлическими характеристиками.

Коэффициент фильтрации сетчатых фильтров при разной скважности каркаса в песках с $k_ф = 15$ м/сут изменяется от 0,00048 до 0,00115 м/сут, а в песках с $k_ф = 150$ м/сут — от 0,0033 до 0,0099 см/с. Отметим, что по данным Д. Клотца коэффициент фильтрации фильтров с сетками галунного плетения составляет 0,1—0,4 см/с, т. е. соотношение остается аналогичным соотношению проницаемостей для гравийных фильтров.

Пример. Одиночная скважина, каптирующая напорный водоносный горизонт мощностью 20 м, имеет фильтр длиной 10 м, диаметром 100 мм с сеткой галунного плетения № 8/70 на каркасе из перфорированной трубы диаметром 100 мм с круглыми отверстиями диаметром 8 мм и скважностью 15%. Требуется определить расход скважины при максимально допустимом понижении $s_0 = 10$ м, если коэффициент фильтрации пласта составляет 5 м/сут.

Находим $l/m = 0,5$ (l — длина фильтра; m — мощность пласта); $m/r_c = 400$. При этой длине фильтра $\zeta_1 = 4,8$. По графикам (рис. 78, *б*) находим для фильтра длиной 10 м и $\zeta_{2ф.к} = 8,2$ и окончательно имеем

$$Q = \frac{2\pi k m s_0}{\ln \frac{R}{r_0} + \zeta_1 + \zeta_{2ф.к}} = 148 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

С учетом несовершенства только по степени вскрытия пласта получаем проектный расход 240 м³/сут.

§ 14. СОПРОТИВЛЕНИЕ (ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ) ФИЛЬТРОВ БЛОЧНОГО ТИПА

Водопроницаемость фильтровых блоков характеризуется коэффициентом фильтрации $k_ф^0$, который определяется размером и формой частиц заполнителя; видом вяжущего и его дозировкой для смеси; степенью уплотнения смеси; технологией изготовления блоков (в большей степени это относится к клею БФ-4 и бакелиту).

Опытами Н. Д. Бессонова [17] в радиальном лотке исследованы изменения коэффициента фильтрации блоков в результате механического кольматажа.

Обработка опытных данных по испытанию фильтров блочного типа в условиях их контакта с песками различной водопроницаемости позволила найти следующую зависимость между $k_и$, $k_ф^0$ и k

$$k_и = 0,9 k_ф^0 \left(\frac{k}{k_ф^0}\right)^{0,56} \qquad \text{(II.48)}$$

($k_и$ — расчетный коэффициент фильтрации блока).

На рис. 82 представлены кривые для определения расчетного коэффициента фильтрации фильтров блочного типа в зависимости от $k_ф^0$ и k, построенные по формуле (II.48). Этими кривыми можно пользоваться при оценке величины $k_и$, не прибегая к расчету по формуле.

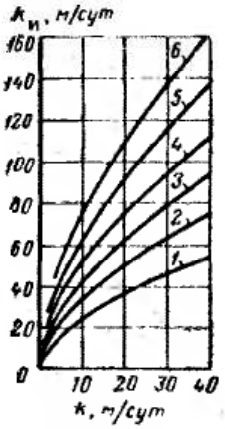


Рис. 82. Кривые для определения расчетного коэффициента фильтрации фильтров блочного типа:

1 — $k_ф^0 = 100$;
2 — $k_ф^0 = 200$;
3 — $k_ф^0 = 300$;
4 — $k_ф^0 = 500$;
5 — $k_ф^0 = 800$;
6 — $k_ф^0 = 1200$

Как видно из рис. 82 и табл. 51, в зависимости от начального коэффициента фильтрации $k_ф^0$ блоков величина $k_и$ в 5—10 раз превышает коэффициент фильтрации песков, что способствует увеличению производительности скважин.

Полученная таким образом возможность определения параметра $k_и$ в формуле (II.48) позволяет рассчитать фильтрационное сопротивление $\zeta_{2\,п}$, оказываемое движению воды фильтром блочного типа, и оценить его влияние на дебит скважины. Сопротивление каркаса учитывается по приведенным выше зависимостям применительно к условиям работы фильтров в контакте с гравийной обсыпкой.

Следует отметить, что зависимости и графики справедливы для условий каптажа однородных водоносных отложений, не содержащих глинистых частиц. Наличие тонкозернистых фракций в каптируемом водоносном пласте предопределяет более интенсивный механический кольматаж блочных фильтров. Поэтому в рассматриваемых условиях применение фильтров блочного типа не рекомендуется.

Таблица 51

Расчетный коэффициент фильтрации блоков в зависимости от коэффициента фильтрации водоносных песков (в м/сут)

Коэффициент фильтрации песка k	Начальный коэффициент фильтрации блоков $k_ф^0$	Расчетный коэффициент фильтрации $k_и$	Коэффициент фильтрации песка k	Начальный коэффициент фильтрации блоков $k_ф^0$	Расчетный коэффициент фильтрации $k_и$
1,5	636	8,8	4,3	770	51,1
1,46	310	17,1	4,5	542	34,3
2,8	531,5	21,8	7,0	321,5	43,5
2,8	661,4	28,1	7,0	776,5	38,5
2,9	256	16,8	9,7	529,5	51,1
3,64	236,3	29,6	9,8	826	49,8
3,7	169	20,7	11,9	690	38,7
3,78	509	16,3			

§ 15. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРОВ

На основе комплексных исследований «внешней» задачи о притоке воды через отверстия фильтра в скважину и «внутренней» задачи о движении воды внутри скважины И. Петерсеном, С. Ровером и М. Альбертсоном [118] было получено, что потери напора в фильтре в зависимости от его конструкции определяются соотношением

$$\frac{\Delta h}{v^2/2g} = 2\frac{\operatorname{ch}\left[\frac{\varkappa L}{D}+1\right]}{\operatorname{ch}\left[\frac{\varkappa L}{D}-1\right]}, \qquad \text{(II.49)}$$

где Δh — потери напора; v — максимальная скорость движения воды в фильтре; $\varkappa$ — постоянная величина, определяемая конструктивными особенностями фильтра; L и D — длина и внутренний диаметр фильтра.

Решение выведенного в [118] уравнения детально исследовалось Д. Ф. Шульгиным и В. А. Васильевым [21], с точки зрения конструирования фильтров, равномерно нагруженных по высоте и характеризующихся близкими по длине потерями напора в них. В указанные расчетные формулы в качестве параметра, определяющего гидравлические сопротивления фильтров, входит показатель $\mu\eta$ (μ — коэффициент расхода, η — скважность фильтра). Величина его может быть, в частности, найдена по данным расходометрии скважины в однородном пласте (а также в лабораторных условиях) с использованием формулы Э. А. Грикевича [43]

$$v_{вх} = v_0 \operatorname{ch}\frac{566\mu\eta l}{D}, \qquad \text{(II.50)}$$

где $v_{вх}$ — входная скорость воды в любом сечении l по высоте фильтра в м/с; v_0 — входная скорость воды в начальном сечении фильтра при $l = 0$ в м/с; D — внутренний диаметр фильтра (скважины) в см.

В лабораторных условиях параметр $\mu\eta$ находят по следующей формуле:

$$\mu\eta = \frac{D}{566l}\operatorname{arcth} 0{,}246\frac{D^2\sqrt{\Delta H'}}{Q}. \qquad \text{(II.51)}$$

Здесь $\Delta H'$ — разность пьезометрических уровней снаружи и внутри фильтра в конечном сечении в м; Q — количество воды, протекающей через фильтр.

Чем больше значения параметра $\mu\eta$, тем меньше абсолютная величина входного сопротивления фильтра.

Э. А. Грикевичем [43] проанализированы результаты лабораторных исследований, проведенных И. Петерсеном, М. Альбертсоном и С. Ровером, и рассчитаны значения μ для некоторых конструкций фильтров заданной скважности. Величины параметра μ этих конструкций приведены в табл. 52 в зависимости от размера частиц гравия, контактирующего с фильтром.

Таблица 52

Коэффициент расхода фильтра с учетом наложения гравия

Тип фильтра	Скважность фильтра, %	Средний диаметр гравия D_{50}, мм								
		20	16	12	10	8	6	4	2	1,4
Штампованный со щелями типа «мост»	3,5	0,82	0,81	0,78	0,75	0,69	0,60	0,48	0,32	0,26
	7,2	0,64	0,62	0,57	0,53	0,48	0,40	0,30	—	—
	11,2	0,56	0,52	0,46	0,41	0,36	0,30	—	—	—
	14,6	0,53	0,48	0,42	0,37	0,32	0,27	—	—	—
Проволочный	18,2	0,51	0,51	0,51	0,50	0,48	0,46	0,41	0,34	0,32
	30,8	0,34	0,34	0,34	0,33	0,32	0,30	0,27	0,23	0,19
Щелевой с выступающими кромками	4,8	0,88	0,84	0,79	0,75	0,68	0,57	—	—	—
Дырчатый с сеткой на поверхности	14,8	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,62	0,48	0,40

Наиболее благоприятными гидравлическими показателями характеризуется проволочный фильтр (в опытах использовались промышленные образцы фирмы «Джонсон»), причем величина μ значительно снижается при уменьшении размера зерен гравийной обсыпки, что еще раз подтверждает определяющую роль контактных потерь напора в прифильтровой зоне скважины.

При турбулентном режиме решение задачи о притоке воды в фильтр скважины было получено М. М. Солимэном [119], которым также была доказана неравномерность нагрузки фильтров скважин, связанная с их конструктивными особенностями. Результаты этих исследований наиболее полно анализировались в монографии Э. А. Грикевича [43].

§ 16. СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДОНОСНЫХ ПОРОД В ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЕ

Проницаемость пород в прифильтровой зоне скважины может существенно уменьшаться в процессе бурения вследствие уплотнения и глинизации пород или увеличиваться в результате создания гравийной обсыпки, суффозионного выноса мелких фракций из пород водоносного пласта, а также при ведении специальных работ по обработке прифильтровых зон (гидравлический разрыв, кислотная обработка и др.).

Составляющая обобщенного сопротивления зоны скважины $\zeta_{2п}$ аналитически может быть выражена через проницаемость пород у фильтра скважины и радиус зоны с измененной проницаемостью $r_и$. В случае скачкообразного изменения проницаемости пород в пласте

$$\zeta_{2п} = \left(\frac{k_п}{k_и} - 1\right) \ln \frac{r_и}{r_с}, \qquad (II.52)$$

где $k_п$ — коэффициент фильтрации водоносного горизонта; $k_и$ — коэффициент фильтрации пород у скважины в зоне радиусом $r_и$. Эта зависимость для $\zeta_{2п}$ получена В. Н. Щелкачевым [96] и позднее Н. Н. Гиринским и Хоукинсом. Как следует из выражения (II.52), $\zeta_{2п} \to 0$, если $k_и \to k_п$ или если $r_и \to r_о$.

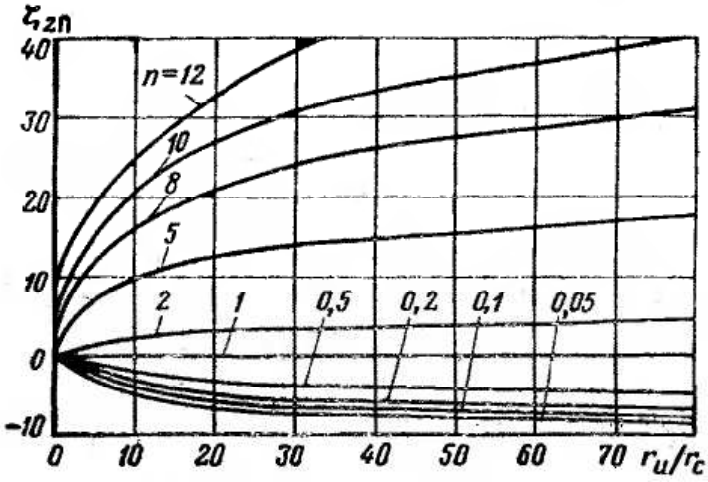


Рис. 83. Графики зависимости $\zeta_{2п}$ от $n = k_п/k_и$ и $r_и/r_с$

Величина $\zeta_{2п}$ будет положительной, если проницаемость $k_п$ в пласте больше проницаемости призабойной зоны, т. е. когда проницаемость призабойной зоны ухудшена. Такие условия часто создаются при бурении скважин с использованием глинистого раствора, при обрушении малопроницаемых пород в интервал установки фильтра, при зарастании прифильтровых зон скважин и т. д.

Если $k_и > k_п$, т. е. проницаемость в прифильтровой зоне улучшена по сравнению с проницаемостью пласта, то $\zeta_{2п}$ будет отрицательной (имеется в виду создание гравийных обсыпок, применение методов повышения проницаемости прифильтровой зоны скважины). Графики рассматриваемой зависимости приведены на рис. 83.

Характерно, что увеличение дебита скважины при увеличении проницаемости прифильтровой зоны по сравнению с первоначальной в радиусе 1 м представляет относительно небольшую величину: при $k_п/k_и = 0{,}1$ величина $Q_и/Q_н$ (где $Q_и$ — расход скважины

с измененной проницаемостью прифильтровой зоны в радиусе 1 м; $Q_н$ — расход скважины с постоянной проницаемостью прифильтровой зоны) увеличивается от 1 до 1,73. При ухудшении же проницаемости прифильтровой зоны в радиусе 1 м при $k_п/k_и = 10$ отношение дебитов изменяется от 1 до 0,23, т. е. дебит скважины по сравнению с природными условиями при том же снижении напора в пласте оказывается заниженным более чем в 4 раза.

Для случая линейного изменения проницаемости прифильтровой зоны скважины Д. Н. Кузьмичевым [54] получено следующее выражение:

$$\zeta_{2н} = \frac{q_0 - q}{q} \ln \frac{R}{r_с}. \qquad (II.53)$$

Величину q можно определить как отношение текущего дебита скважины Q к величине депрессии пластового напора ($q = Q/S_0$), а q_0 является функцией пластовой водопроводимости:

$$q_0 = \frac{2\pi k_п m}{\ln \frac{R}{r_с}}. \qquad (II.54)$$

Причем величину водопроводимости ($k_п m$) следует определять по данным восстановления уровня в центральной или наблюдательной скважине после прекращения откачки или по результатам откачек при стационарном режиме при наличии, по меньшей мере, двух наблюдательных скважин.

Изменение проницаемости по логарифмической зависимости. Рассматривая интенсивность зарастания, можно отметить, что оно в большей степени проявляется вблизи скважины. В этих условиях закономерно аппроксимировать изменение проницаемости прифильтровой зоны с удалением от скважины логарифмической зависимостью

$$k = k_п - \frac{k_п - k_и}{\ln \frac{R}{r_с}} \ln \frac{R}{r}, \qquad (II.55)$$

где $k_п$ — проницаемость пласта, постоянная во времени; $k_и$ — проницаемость пласта на стенке скважины (изменяется во времени и зависит от свойств пласта, воды, режима водоотбора и других факторов); R — радиус влияния скважины; r — текущий радиус.

В этом случае постоянный расход может быть найден по формуле [53]

$$Q = \frac{2\pi k_п m S_0}{\ln \frac{R}{r_с}} \frac{1 - \frac{k_и}{k_п}}{\ln \frac{k_п}{k_и}}, \qquad (II.56)$$

или

$$Q = q_0 S_0 \frac{1-\varphi}{\ln \frac{1}{\varphi}}, \qquad \text{(II.57)}$$

где q_0 — начальный удельный расход скважины; $\varphi = k_н/k_п$; S_0 — снижение напора в пласте.

В формуле (II.57) $q_0 (1 - \varphi)/\ln 1/4$ — текущий удельный расход скважины.

В безразмерных величинах

$$\alpha = \frac{1-\varphi}{\ln \frac{1}{\varphi}} = \frac{Q}{S_0 q_0} \qquad \text{(II.58)}$$

представляет собой текущий безразмерный удельный расход скважины, изменяющийся от единицы до некоторой минимальной величины.

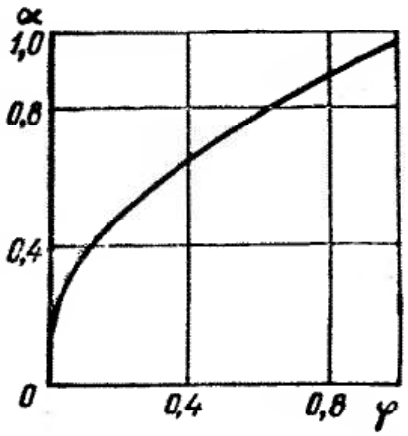


Рис. 84. Зависимость коэффициента продуктивности от коэффициента проницаемости в безразмерных величинах

Определяя безразмерный показатель α в различные периоды времени и сопоставляя его значения, можно проследить изменение величины φ во времени, а следовательно, и изменение проницаемости прифильтровой зоны в процессе эксплуатации. В идентичных гидрогеологических условиях при одинаковых конструкциях скважин и фильтров изменения α и φ должны быть весьма близкими.

Величина α может быть получена расчетным путем на основе данных опробования скважины, а при известной α можно определить $k_и$ по графику (рис. 84), на котором представлена зависимость α от φ.

§ 17. СОПРОТИВЛЕНИЯ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ОТКЛОНЕНИЯМИ ОТ ЛИНЕЙНОГО РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ

Если фильтрация воды не следует полностью закону Дарси, требуется определять дополнительные сопротивления и разрабатывать рекомендации по оптимальному режиму водоотбора. Необходимо отметить, что опробование скважины при различных режимах водоотбора дает, как правило, обобщенную характеристику сопротивления фильтра, зоны пород с измененной проницаемостью вблизи скважины, деформации пород в процессе откачки и отклонений от линейного режима фильтрации $\zeta_{2н.л}$. Однако в первом приближении оценка составляющей $\zeta_{2н.л}$ возможна путем обработки индикаторных кривых.

Как известно, движение воды при отклонении от линейного закона Дарси следует общему закону фильтрации (Прони), который может быть записан в виде

$$i = \frac{v}{k} + \frac{\varkappa}{k} v^2, \tag{II.59}$$

где i — гидравлический градиент; v — скорость фильтрации; k — коэффициент фильтрации среды; $\varkappa$ — показатель турбулентности, определяемый проницаемостью, пористостью и морфометрическими особенностями пористой среды; величина $\varkappa$ не превышает единицы [18].

Двучленному закону фильтрации (II.59) соответствуют следующие уравнения индикаторной кривой:

для скважины в напорном пласте

$$S_0 = AQ + BQ^2; \tag{II.60}$$

для скважины в безнапорном пласте

$$H_e^2 - H_c^2 = A'Q + B'Q^2, \tag{II.61}$$

где A, B, A', B' — параметры, постоянные для данной водозаборной скважины; H_e и H_c — соответственно статический и динамический напоры в скважине.

Постоянство рассматриваемых параметров предполагает отсутствие деформаций в структуре, а следовательно, и в проницаемости пористой среды и неизменность свойств жидкости. Если же имеется деформация пород в прифильтровой зоне в процессе откачки (кольматация, суффозия), то форма индикаторных кривых будет отражать не только турбулизацию потока, но и указанные деформации. Очевидно, параметры вновь сформировавшейся прифильтровой зоны можно определять впоследствии по данным опытных откачек при малых понижениях.

Для обработки индикаторных кривых откачки уравнение (II.60) представляют в виде

$$S_0/Q = A + BQ. \tag{II.62}$$

Величина параметра B выражается тангенсом угла наклона прямой $S_0/Q = f(Q)$ к оси абсцисс.

С целью установления оптимального режима водоотбора для данной конструкции фильтра, при которой могут быть обеспечены минимальные гидравлические потери, предпочтительнее $\zeta_{2н.л}$ определять по результатам опытных и эксплуатационных откачек в условиях данного водозабора или объекта водопонизительных работ.

Важно отметить, что лучшие условия для сохранения линейного режима фильтрации имеются в гравийных фильтрах с мощными контурами обсыпки.

В настоящее время каждая составляющая обобщенного сопротивления $\zeta_{2ф}$, $\zeta_{2п}$, $\zeta_{2н.л}$ может быть найдена аналитически и экспериментально.

§ 18. ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОПЫТНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН

Гидравлические потери в прифильтровых зонах и в фильтрах скважин предопределяют в большинстве случаев достоверность параметров водоносных пластов при опытно-фильтрационных исследованиях, эффективность действия водозаборов подземных вод и вертикальных дренажей. Вскрытие водоносных пластов роторным способом с промывкой глинистым раствором и последующей разглинизацией скважин различными методами, несмотря на высокие скорости проходки, не всегда удовлетворяло требованиям гидрогеологической службы как при опытно-фильтрационных работах, так и при сооружении эксплуатационных скважин на воду.

При несовершенных методах бурения и освоения скважин доля дополнительных потерь напора на каркасе фильтра настолько мала, даже при использовании трубчатых каркасов с сетчатой водоприемной поверхностью, что довольно часто допускалось использование фильтров малой скважности с плотными сетками и фильтров блочного типа. Главным аргументом при этом были данные о близких расходах (удельных дебитах) скважин, оборудованных различными фильтрами.

Внедрение в практику бурения скважин на воду методов вскрытия водоносных пластов ударным способом, роторным способом с прямой и обратной промывками чистой водой, установка фильтров гидроподмывом, разработка эффективных методов освоения скважин предъявляют повышенные требования к подбору каркаса фильтра, состава гравийной обсыпки. В ряде случаев применение несовершенных конструкций фильтров не вуалируется существенно большими сопротивлениями прифильтровых зон скважин, а определяет их производительность.

Детальные исследования, обосновывающие справедливость этих положений, были проведены ВНИИ ВОДГЕО на участках вертикальных дренажей Горьковской ГЭС. Здесь опытными скважинами каптированы аллювиальные пески мощностью 18—20 м в пределах выдержанного в разрезе слоя среднезернистых песков. Все опытные скважины пробурены ударным способом; конечный диаметр их 305 мм, расположены они на расстоянии 25 м друг от друга и оборудованы фильтрами равной длины (4 м). Опытные скважины, самоизливающиеся в магистральный канал, опробовали

Таблица 53

Данные об удельных дебитах скважин и сопротивлениях фильтров на различных опытных участках в начальный период работы скважин

№ скважины	Конструкция фильтра	Удельный дебит, л/с	Сопротивление ζ_0	Примечание
	I опытный участок			
2	Гравийный с водоприемной поверхностью из штампованного листа со щелями в вертикальной плоскости	3,23	0,73	
11		3,2	0,73	
3	Гравийный кожуховый с кожухом из штампованного листа	3,41	0,44	
7		3,66	0,44	
4	Гравитационный конструкции МГМИ со щелями в горизонтальной плоскости с гравийной обсыпкой	4,30	0,31	
5		4,35	0,35	
6	Гравийный каркасно-стержневой со щелями в горизонтальной плоскости	4,5	0,16	
10		3,6	0,29	
1	Блочный на клее БФ-4 из гравия диаметром 2—3 мм на трубчатом каркасе	2,65	1,02	
12	Блочный на клее БФ-4 из гравия диаметром 1—2 мм на стержневом каркасе	1,9	5,75	
8	Керамический на стержневом каркасе	1,84	2,76	
9		2,36	2,36	
	II опытный участок			
1б	Гравийный с опорным каркасом из полиэтиленовых труб и винипластовой сеткой	2,72	—	Скважины сооружены без затрубных пьезометров
2б	Гравийный с опорным каркасом из стеклопластиковых труб и винипластовой сеткой	2,4	—	
3б	Гравийный с щелевым каркасом из литого капрона	2,68	—	
4б	Гравийный каркасно-стержневой с проволочной обмоткой	2,22	—	
5б	Гравийный каркасно-стержневой с проволочной обмоткой	3,41	—	
	III опытный участок			
1щ	Мягкопоролоновый	2,65	1,56	Величина сопротивления взята по данным опытной откачки на первой ступени понижения уровня (минимальная величина сопротивления)
2щ		3,62	0,41	
3щ	Жесткопоролоновый	1,95	4,77	
4щ		0,83	16,5	
9щ		1,75	5,39	
5щ	Керамический бескаркасный диаметром 168 мм	2,61	1,05	
8щ	Керамический бескаркасный диаметром 230 мм	2,35	5,25	
7щ	Тарельчатый	1,75	1,39	
6щ	Пористобетонный диаметром 160 мм	1,17	6,1	

при режиме самоизлива и опытными откачками. Данные об удельных дебитах и сопротивлениях скважин приведены в табл. 53.

Максимальные удельные дебиты и минимальные сопротивления имеют гравийные фильтры со стержневыми каркасами и проволочной обмоткой, а также фильтры из сборных кольцевых элементов конструкции МГМИ. Промежуточными характеристиками обладают фильтры из штампованных материалов в кожуховой и гравийно-обсыпной модификации, а также фильтры со щелевой и круглой перфорацией и гравийной обсыпкой. Значительно выше сопротивления и меньше удельные дебиты скважин, оборудованных фильтрами блочного типа, и ряда опытных конструкций, разработанных во ВСЕГИНГЕО.

Идентичность условий бурения и освоения скважин на Горьковском стационаре, а также практическая неизменность фильтрационных свойств водоносных пород на этом участке позволяют считать приведенные данные вполне представительными. Кроме того, они хорошо согласуются с результатами лабораторных гидравлических исследований различными методами, приводящими к тому же соотношению проницаемостей разных конструкций фильтров-каркасов.

Сопоставим данные указанных опытных работ с результатами массового обследования водозаборных и дренажных скважин в различных гидрогеологических условиях, а также с результатами экспериментов на Каменском вертикальном дренаже. В расчет сопротивления скважин и фильтров брались только показания затрубных пьезометров и наблюдательных скважин при установившемся водоотборе. Краткая гидрогеологическая характеристика водоносных пород, удельные дебиты и сопротивления скважин, а также результаты их статистической обработки сведены в табл. 54.

Удовлетворительные обобщенные характеристики фильтров и прифильтровых зон скважин наблюдаются только при ударном и роторном бурении с обратной промывкой чистой водой. Сопротивления гравийных фильтров в этих условиях весьма устойчивы, близки к нулевым, а на ряде участков являются отрицательными, что свидетельствует об улучшении фильтрационных характеристик скважин в сравнении с пластовыми. Можно утверждать, что применение гравийных фильтров с каркасом из штампованных материалов, со стержневым каркасом с проволочной обмоткой или из сборных кольцевых элементов позволяет получить устойчивые значения показателя гидравлического сопротивления скважин в пределах от 0,5 до $-0{,}5$, что существенно упрощает обработку данных опытно-фильтрационных исследований и обеспечивает близкие к оптимальным условия эксплуатации водозаборов и вертикальных дренажей.

Наметившаяся в 60-х годах тенденция к разработке легко собираемых в полевых условиях фильтров, существенно упрощающих

Участок работ	Водоносный горизонт			Способ бурения и освоения скважин
	геологическая характеристика	режим	коэффициент фильтрации или коэффициент водопроницаемости	
1	2	3	4	5
Вертикальный дренаж Горьковской ГЭС	Аллювиальные пески пойменной террасы Волги	Безнапорный	$k = 35 \div 40$ м/сут	Ударный, прокачка эрлифтом
				Ударный, прокачка эрлифтом
Вертикальные дренажи г. Каменка-Днепровская и орошаемого массива «Каменский под»	Пески четвертичного возраста	С локальным напором	$k = 20 \div 30$ м/сут, $km = 400 \div 600$ м²/сут	Роторный с обратной промывкой (без замены естественного раствора), прокачка эрлифтом
Вертикальные дренажи г. Каменка-Днепровская и орошаемого массива «Каменский под»	Пески четвертичного возраста	То же	$k = 20 \div 30$ м/сут, $km = 400 \div 600$ м²/сут	Роторный с обратной промывкой чистой водой с заменой промывочной жидкости
Вертикальный дренаж г. Каменка-Днепровская	Пески четвертичного возраста	То же	$k = 20 \div 30$ м/сут, $km = 400 \div 600$ м²/сут	Роторный с обратной промывкой чистой водой
				Ударный
				Роторный с глинистой промывкой. Разглинизация затрубной промывкой
Водозабор «Балтэверс» г. Рига	Пески — отложения Балтийского моря	Безнапорный	$k = 30 \div 50$ м/сут	Ударно-канатный

Таблица 54

при различных способах бурения и освоения

Фильтр			Средний удельный дебит на 1 м понижения уровня, л/с	Данные о сопротивлениях скважин			
тип	диаметр, мм	тип сетки		n (число определений)	$\zeta_{2ф}$	$\zeta_{2ф.\ ср}$	$\frac{\sigma}{v}$
6	7	8	9	10	11	12	13
Гравийный с трубчатым и стержневым каркасом, с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки и штампованного листа	168	Фильтр-каркас МГМИ	3,5	11	0,43		0,4 / 88,3
Блочного типа из пористой керамики, на клее БФ, из пористого бетона	240/170		1,93	11	4,75		0,42 / 87,8
Гравийный каркасно-стержневой с проволочной обмоткой	168		4,6	13	0,59		1,204 / 75,6
Гравийный каркасно-стержневой с проволочной обмоткой	168		5,8	13	—0,19		0,128 / 67,37
Гравийный, каркасно-стержневой	168		5,8	23		—0,46	0,4 / 86,95
Гравийный, каркасно-стержневой	168		4,2	8	—0,64	—0,74	—
То же	168		1,8	14	4,8	—0,48	0,43 / 68,0
Пористокерамический на трубчатом каркасе (после 3—7 лет работы)	170/240		1,97	35	17,07	—	7,37 / 43,18

Участок работ	Водоносный горизонт			Способ бурения и освоения скважин
	геологическая характеристика	режим	коэффициент фильтрации или коэффициент водопроницаемости	
1	2	3	4	5
Шемиловский полигон ВСЕГИНГЕО	Пески четвертичного возраста, мелко- и среднезернистые		$k = 8 \div 10$ м/сут	Роторный с глинистой промывкой

Примечание. σ — среднее квадратическое отклонение; v — коэффициент

производство работ (фильтров блочного типа из пористой керамики, из гравия на клее БФ, из пористого бетона, мягко- и жесткопоролоновых, тарельчатых, ФКО и др.), как свидетельствуют данные табл. 54, не оправдала возлагавшуюся надежду упрощения производства работ при сохранении качества полученной информации. При применении рассматриваемых конструкций крайне неустойчивы значения удельных дебитов и сопротивлений, что делает нежелательным их использование в практике опытно-фильтрационных работ, а большие значения сопротивлений практически исключают возможность развития этого направления конструирования фильтров для эксплуатационных скважин.

Анализ материалов опробования более чем 200 скважин в различных гидрогеологических условиях в начальный момент после их сооружения и в процессе эксплуатации показывает, что сопротивление скважин существенно увеличивается во времени в связи с кольматажом, проявляющимся с разной степенью интенсивности при оборудовании скважин фильтрами различных конструкций. Качественный и количественный прогноз этих процессов является специальной задачей, определяющей конструирование фильтров водозаборных скважин.

Продолжение табл. 54

Фильтр			Средний удельный дебит на 1 м понижения уровня, л/с	Данные о сопротивлениях скважин			
тип	диаметр, мм	тип сетки		n (число определений)	$\zeta_{2ф}$	$\zeta_{2ф.\,ср}$	$\frac{\sigma}{v}$
6	7	8	9	10	11	12	13
Гравийный с чугунным щелевым каркасом (после 20—30 лет работы)	168		3,84	9	6	—	2,49 40,03
Гравийно-клеевой (после 7—10 лет работы)	170/240		2,52	8	10,65	—	9,1 85,52
Фильтры ФКО (опытные скважины)	168			5	20,6	—	—

вариации.

§ 19. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВ И СКВАЖИН

Наряду с рассмотрением традиционных гидрогеологических способов исследований большое значение приобретают экспресс-методы оценки состояния призабойных зон скважин и возможности его улучшения.

Исследования фильтров скважин с применением подводного фотографирования и телевидения, как правило, не могут дать однозначного ответа о степени закольматированности фильтров, а тем более прифильтровых зон скважин. Визуальные способы обследования внутренней поверхности фильтров оказываются эффективными при выявлении устойчивости антикоррозионных покрытий [113], а регулярное фотографирование или телевизионный осмотр позволяют установить интенсивность отложения кольматанта на фильтре [106]. Однако такое исследование может лишь послужить основой для постановки гидродинамических опытных работ по оценке сопротивлений скважин и их изменения в процессе эксплуатации.

Показателями гидравлического сопротивления скважины могут являться обобщенное сопротивление фильтра и прифильтровой

зоны скважины, приведенный диаметр или коэффициент фильтрации зоны прилежащих к фильтру пород. Все эти показатели обобщенно характеризуют дополнительные гидравлические сопротивления призабойной зоны и эквивалентны друг другу. Однако при сравнении эффективности работ по бурению скважин и оборудованию их фильтрами в различных гидрогеологических условиях более предпочтительно применение универсального показателя обобщенного гидравлического сопротивления (показателя скин-эффекта).

Оценка показателя обобщенного сопротивления скважин по понижению уровня в затрубном пьезометре

Наиболее надежные значения показателя обобщенного сопротивления фильтра и прифильтровой зоны скважины могут быть получены при наличии затрубной скважины, расположенной на расстоянии 0,5—1 м от возмущающей скважины. При таком расположении наблюдательной скважины (затрубного пьезометра) можно учесть потери напора, обусловленные наличием фильтра и связанные с изменением проницаемости водоносных пород в процессе бурения и эксплуатации скважин.

Приближенная (заниженная) величина показателя обобщенного сопротивления может быть получена с использованием пьезометров, устанавливаемых одновременно с фильтром эксплуатационной скважины. При этом во всех случаях предпочтительнее затрубный пьезометр устанавливать на максимально возможном удалении от стенок фильтра, например, привязывая к направляющим фонарям. Очевидно, что в данном случае можно получить лишь величину $\zeta_{2ф}$, которая также будет ниже обобщенного сопротивления прифильтровой зоны.

При сооружении опытных скважин, служащих для оценки эффективности той или иной конструкции фильтра или способа бурения, необходимо иметь затрубный пьезометр, который устанавливают на направляющих фонарях, и наблюдательную скважину на расстоянии не более 1 м от наружной стенки фильтра возмущающей скважины.

Поскольку вблизи скважины поток радиальный, в этих условиях справедлива формула Дюпюи. Коэффициент фильтрации пород в прифильтровой зоне скважины может быть рассчитан по имеющимся данным о расходе и уровнях в пьезометре и скважине

$$k_п = \frac{Q \ln \frac{r_п}{r_с}}{2\pi m (S_0 - S_п)}. \qquad (II.63)$$

Здесь $k_п$ — коэффициент фильтрации пород во фрагменте пьезометр — скважина, который характеризует и сопротивление фильтра; Q — откачиваемый расход; $r_п$ — расстояние от оси скважины до пьезометра; $r_с$ — внутренний радиус фильтра; m — мощ-

ность пласта; S_0 — понижение уровня в скважине; $S_п$ — понижение уровня в пьезометре.

При известном коэффициенте фильтрации пород в прифильтровой зоне скважины может быть рассчитан показатель обобщенного сопротивления фильтра и прифильтровой зоны, если предположить, что проницаемость постоянна во всем рассматриваемом фрагменте скважина — пьезометр

$$\zeta = \left(\frac{k}{k_п} - 1\right) \ln \frac{r_п}{r_с} \qquad (II.64)$$

(k — коэффициент фильтрации пласта).

Аналогично могут быть рассчитаны коэффициент фильтрации и показатель обобщенного сопротивления прифильтровой зоны скважины во фрагменте затрубный пьезометр — наблюдательная скважина.

Если опытная или эксплуатационная скважина является несовершенной по степени вскрытия пласта, величина ζ_2 должна рассчитываться с учетом различий в проявлении этого несовершенства для центральной скважины и пьезометра (наблюдательной скважины) по формуле

$$\zeta_2 = \frac{2{,}73km\,(S_0 - S_п)}{Q} - \left[\lg \frac{r_п}{r_с} + 0{,}435\,(\zeta_1' - \zeta_1'')\right], \qquad (II.65)$$

где ζ_1' и ζ_1'' — показатели сопротивлений, обусловленные несовершенством по степени вскрытия пласта для скважин и пьезометра.

Пример расчета. Скв. 44 водозабора «Балтэзерс» Риги оборудована пористо-керамическим фильтром на трубчатом перфорированном каркасе внутренним диаметром 0,16 м. На расстоянии 0,225 м от оси скважины установлен затрубный пьезометр. Из скважины проведена откачка до стабилизации уровней в ней и пьезометре и получены при Q = 8,25 л/с разность напоров $(S_0 - S_п) = 1{,}45$ м.

При длине фильтра скважины 16,3 м и расположении его в середине пласта мощностью 28 м получены значения $\zeta_1' = 2{,}8$ и $\zeta_1'' = 2{,}2$. По формуле (II.65) рассчитано значение проницаемости в фрагменте скважина — пьезометр $k_п = 4{,}9$ м/сут и по формуле (II.65) — $\zeta_2 = 5{,}4$, т. е. в рассматриваемом случае основные гидравлические потери приходятся на прифильтровую зону скважины.

Оценка обобщенного сопротивления скважин по опытным и эксплуатационным откачкам

Для обоснованной оценки величины ζ_2 необходимо проводить откачки при наличии не менее двух наблюдательных скважин. Аналитически по наблюдательным скважинам, для которых $\zeta = 0$, можно рассчитать

$$km = \frac{Q}{2\pi\,(S_i - S_{i+1})}\,(N_i - N_{i+1}) \qquad (II.66)$$

и затем

$$\zeta = \frac{2\pi km\,(S_0 - S_i)}{Q} - (N_0 - N_i). \qquad \text{(II.67)}$$

При кустовых откачках и большом числе наблюдательных скважин для полного учета всех опытных данных и вывода средних значений km и ζ целесообразно использовать графоаналитический прием расчета. Для этого разности величин сопротивлений по всем парам скважин $\Delta N_{0,i} = N_0 - N_i$, $\Delta N_{0,i+1} = N_0 - N_{i+1}$, $\Delta N_{i,i+1} = N_i - N_{i+1}$ и т. д. откладывают по оси абсцисс, а разности понижений уровня $\Delta S_{0,i} = S_0 - S_i$, $\Delta S_{0,i+1} = S_0 - S_{i+1}$, $\Delta S_{i,i+1} = S_i - S_{i+1}$ — по оси ординат. При таком построении (рис. 85) в соответствии с уравнением (II.66) опытные точки должны размещаться на прямых линиях, одна из которых, построенная только по данным наблюдательных скважин с уклоном B, исходит из начала координат, а вторая, построенная с использованием данных по парам скважин (центральная — наблюдательная с тем же уклоном), отсекает начальную ординату A.

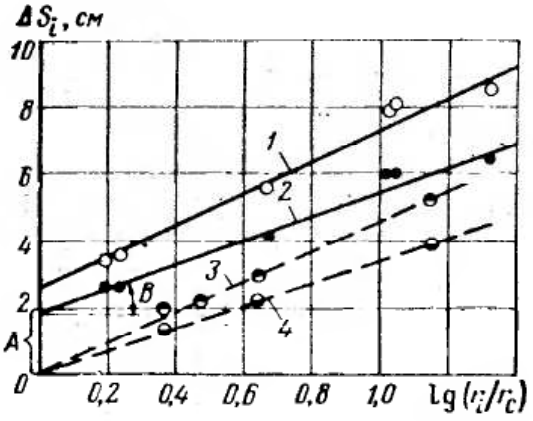


Рис. 85. Графоаналитический расчет величин водопроводимости и сопротивления скважин по кустовым откачкам:

1, 2 — зависимости для разности понижений в центральной и наблюдательных скважинах; *3, 4* — то же, для наблюдательных скважин

По указанным параметрам определяются km и ζ_2

$$km = \frac{Q}{2\pi B}; \qquad \text{(II.68)}$$

$$\zeta_2 = \frac{A}{B}.$$

Величина ζ_2 была рассчитана по одному из водозаборов в долине р. Дон [20]. Абсолютные значения ζ_2 в некоторых случаях достигают 5—8 м и более. Соответствующие этим величинам дополнительные понижения уровня составляют 35—69% общего понижения в скважине. Подобная обработка данных опытных откачек выполнена еще по ряду объектов, причем во всех случаях дополнительные сопротивления оказались настолько значительными, что их нельзя не учитывать при прогнозах производительности водозаборных скважин.

При определении обобщенного сопротивления фильтра и прифильтровой зоны скважины, находящейся во взаимодействии с другими скважинами, можно использовать имеющиеся решения для соответствующих граничных условий на контуре пласта и водозабора. Так, для скважин Горьковского стационара эти рас-

четы были сделаны по формуле, характеризующей приток к линейному ряду скважин, расположенному вблизи реки

$$H'_{л} - H_{с} = \frac{Q_{с}}{T}(f_{к} + 0{,}11). \qquad (II.69)$$

Здесь $H'_{л}$ — отметка кривой депрессии в точке между скважинами, где скорость фильтрации $v = 0$, $H'_{л}$ определялась по данным измерений в процессе работы скважин при самоизливе; $H_{с}$ — уровень воды в скважине; $Q_{с}$ — расход скважины; T — водопроводимость пласта;

$$f_{к} = 0{,}366 \lg \frac{\sigma}{\pi d_{пр}}, \qquad (II.70)$$

где σ — расстояние между скважинами; $d_{пр}$ — приведенный диаметр опытной скважины.

При известных параметрах уравнения (II.69) можно определить $f_{к}$, а затем вычислить величину приведенного диаметра скважины по выражению (II.70).

Величина ζ_2 рассчитывается по формуле

$$\zeta_2 = \lg d_{с} - \lg d_{пр}. \qquad (II.71)$$

В безнапорном пласте разность понижений уровней в скважине и пьезометре включает величину разрыва уровня («скачка») Δh, обусловленную деформациями линий тока в связи с нелинейным характером свободной поверхности подземных вод. Величину Δh необходимо вычесть из разности понижений уровней, определив ее по формуле В. М. Шестакова [96]

$$\Delta h = \left[\left(0{,}73 \lg \frac{\sqrt{Q_0}}{r_{с}} - 0{,}51\right) + \Delta h_{с}^2\right]^{0{,}5} - h_{с}, \qquad (II.72)$$

$$Q_0 = \frac{Q}{k_{п}},$$

где $h_{с}$ — высота уровня воды в скважине.

Оценка обобщенного сопротивления скважин по восстановлению (понижению) уровня

Разновидностью рассмотренного метода является определение безразмерного показателя обобщенного сопротивления прифильтровой зоны (показателя скин-эффекта) путем анализа кривых снижения — восстановления уровня.

Теоретической основой использования данных опробования скважин при неустановившемся режиме является решение задачи о фильтрации в пласте с кольцевой неоднородностью. Причем внутренняя зона, в центре которой располагается скважина, имеет диаметр $2R$, а внешняя, граничащая с ней, простирается

на значительное расстояние (теоретически до бесконечности). Эта задача впервые исследовалась В. Н. Щелкачевым [95, 96].

Приближенное решение В. Н. Щелкачева представляется в виде:

$$S_1 = \frac{Q}{2\pi (km)_1}\left[\ln \frac{1{,}5\sqrt{a_2 t}}{r} + \ln\left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{\varepsilon}-1}\right] \qquad \text{(II.73)}$$

при $(r_c \leqslant r \leqslant R)$,

$$S_2 = \frac{Q}{2\pi (km)_2} \ln \frac{1{,}5\sqrt{a_2 t}}{r} \qquad \text{(II.74)}$$

при $(R \leqslant r \leqslant \infty)$.

Здесь S_1 и S_2 — понижения уровней в зонах 1 (внутренней) и 2 (внешней) при постоянном дебите скважины Q, $(km)_1$ и $(km)_2$ — водопроводимости этих зон; a_2 — коэффициент пьезопроводности внешней зоны; r — радиус-вектор точек, в которых определяется понижение уровня.

Формулы (II.73) и (II.74) применимы при длительной откачке. По ним можно определять водопроводимость внешней зоны пласта $(km)_2$, а при наличии одной наблюдательной скважины — и водопроводимость внутренней зоны $(km)_1$. При известной величине $(km)_1$ можно оценить сопротивление прифильтровой зоны скважины.

Более строгое решение этой задачи получено Г. И. Баренблатом и В. А. Максимовым [15] и установлено, что при больших $R/\sqrt{at}$ (т. е. при больших радиусах призабойной зоны или малых t) функция напора выражается соотношением

$$H(t) = \frac{Q}{4\pi (km)_1} \ln t - \frac{Q}{2\pi (km)_1} \ln \frac{\gamma r_c}{2\sqrt{a_1}} \qquad \text{(II.75)}$$

($\ln \gamma = 0{,}9771$), соответствующим параметрам призабойной зоны.

Следует заметить, что в рассмотренных Г. И. Баренблатом и В. А. Максимовым численных примерах зависимость (II.75) оказывается справедливой для очень коротких промежутков времени и выходит на асимптоту, соответствующую параметрам внешней зоны через очень малые значения t. Это свидетельствует о больших чисто технических трудностях как снятия, так и обработки начальных графиков прослеживания уровня в возмущающей скважине. Расчеты показывают, что при наличии призабойной зоны радиусом 2 м с проницаемостью вчетверо меньшей проницаемости всего пласта, начиная с $t = 100$ с, кривая $S = f(\ln t)$ представляет собой асимптоту, наклон которой соответствует проницаемости внешней зоны.

Очевидно, что даже в таких неблагоприятных условиях получить кривую прослеживания, характеризующую прифильтровую зону, очень трудно. Но этот метод может быть использован при анализе данных опробования пласта с незначительными коэффициентами фильтрации водоносных пород и ухудшенной проницаемостью прифильтровой зоны. Если результаты обработки дают кривую $S = f(\ln t)$, обращенную вогнутостью вниз, можно утверждать, что вокруг скважины имеется существенная (по величине или по степени загрязненности) прифильтровая зона. Определение приведенного радиуса скважины позволяет рассчитать проницаемость прифильтровой зоны в некотором заданном радиусе.

Таким образом, анализ графиков понижения — восстановления уровня, обычно проводимый при оценке параметров водоносных пластов (коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности), также может быть использован для определения показателя обобщенного сопротивления прифильтровой зоны по отрезку, отсекаемому на оси ординат). Очевидно, что определение ζ_2 возможно либо при известном коэффициенте пьезопроводности, либо при наличии графика прослеживания хотя бы по одной наблюдательной скважине.

Методика оценки ζ_2 в этом случае аналогична способу его определения по данным опытных и эксплуатационных откачек, однако гидравлическое сопротивление пласта является переменным во времени

$$N = 2{,}25at/r_c^2.$$

При значительных размерах зоны пласта с измененной проницаемостью у фильтра скважины или небольшом коэффициенте фильтрации параметры внутренней зоны можно рассчитать, как в случае однородного пласта, по начальному участку изменения уровня подземных вод.

Величину ζ_2 определяли по начальному участку графиков восстановления уровня при исследовании работы скважин, оборудованных бескаркасными керамическими фильтрами в Краснодарском крае. Восстановление уровня в центральных скважинах фиксировалось пневматическим уровнемером [39].

В результате опытов получено, что ζ_2 в скв. 216 г и 218 г составляла соответственно 1,8 и 1,93, а коэффициент фильтрации керамических блоков равнялся 0,368 и 0,130 м/сут. Отметим, что по данным откачек при установившемся режиме фильтрации при известных параметрах пластов получены коэффициенты фильтрации керамических блоков соответственно 0,42 и 0,130 м/сут.

Следовательно, возможность оценки величины ζ_2 как по начальному участку графика восстановления уровня, так и по участку, соответствующему параметрам внешней зоны пласта, является достаточно обоснованной.

Оценка параметров фильтров по данным расходометрии[1]

Исследовать сопротивления фильтров скважин можно на основе скважинной расходометрии. Используя решения для распределения входных скоростей по длине фильтра скважины при относительно больших их величинах [43] имеем

$$v_{вх} = v_0 \operatorname{ch} \frac{566 \mu\eta L}{D}. \qquad (II.76)$$

Здесь v_0 — входная скорость в нижней части фильтра; $\mu\eta$ — параметр, определяемый конструктивными особенностями фильтров (μ — коэффициент сжатия струи; η — скважность фильтра); L — длина фильтра; D — диаметр фильтра.

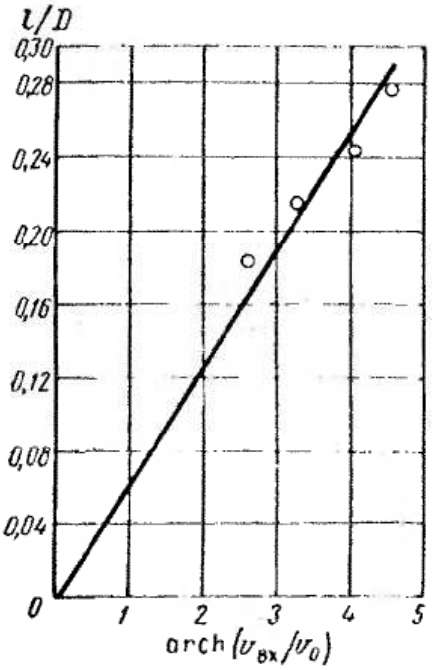


Рис. 86. График для определения параметра $\mu\eta$ фильтра по данным расходометрии скважин

Исходя из уравнения (II.76), можно определить параметр $566\ \mu\eta = \varepsilon$

$$\operatorname{arch} \frac{v_{вх}}{v_0} = 566 \frac{\mu\eta}{D} L. \qquad (II.77)$$

Выражение (II.77) — уравнение прямой в координатах L/D; arch v/v_0, проходящей через начало координат, угловой коэффициент которой равен ε.

Поскольку

$$\operatorname{ch} x = (e^x + e^{-x})/2,$$

при относительно больших значениях x величиной e^{-x} можно пренебречь по сравнению с величиной e^x. Тогда получим

$$v = v_0 \frac{e^{566 \frac{\mu\eta L}{D}}}{2}. \qquad (II.78)$$

Уравнение (II.78) можно переписать в виде

$$2v/v_0 = e^{\varepsilon \frac{L}{D}}. \qquad (II.79)$$

После логарифмирования выражение (II.79) представляется в виде

$$\ln 2v/v_0 = \varepsilon L/D. \qquad (II.80)$$

Формула (II.80) — уравнение прямой в координатах L/D; $\ln 2v/v_0$ с угловым коэффициентом ε.

[1] Рассматривается только применительно к однородным пластам.

Таким образом, при зондировании скважин в однородных пластах можно оценить величину ε и, следовательно, определить их эффективность.

Пример расчета. Скважина каптирует водоносный горизонт в среднезернистых песках с базальным слоем из гравийно-галечных отложений и оборудована пористо-керамическим фильтром на трубчатом каркасе диаметром 170/240 мм. Расходограмма скважины получена прибором с фотоэлектрической регистрацией импульсов оборотов крыльчатки при шаге опробования 0,5 м. Интегральная кривая расходометрии продифференцирована и построена зависимость $\operatorname{arch} v_{вх}/v_0 - L/D$ (рис. 86). График этой зависимости представляет собой прямую линию, по уклону которой определяется $\varepsilon = 0{,}135$ и $\mu\eta = 2{,}4 \cdot 10^{-4}$, т. е. гидравлические характеристики фильтра весьма неблагоприятны.

Оценка параметров скважин по результатам экспресс-налива

Опробование скважин методом экспресс-налива основывается на наблюдении за уровнем в скважине после кратковременного изменения напора в водоносном горизонте, вызванного наливом в скважину воды либо откачкой ее из скважины, либо спуском под уровень воды в скважине емкости, которая вытесняет некоторый объем жидкости.

Изменение уровня в результате экспресс-налива можно регистрировать емкостным датчиком уровня [100] или цепочкой последовательно соединенных резисторов, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга [8].

Поскольку возмущение при экспресс-наливе в общем случае сказывается в небольшой зоне пласта, прилегающей к скважине, величина водопроводимости, полученная в результате экспресс-налива, характеризует гидравлические параметры фильтра и прифильтровой зоны. Применение экспресс-налива для оценки параметров скважин особенно важно в условиях эксплуатирующихся водозаборов и вертикальных дренажей, когда взаимодействие скважин существенно осложняет интерпретацию данных опытных откачек.

Полученная кривая восстановления уровня является основой для вычисления коэффициента водопроводимости или коэффициента фильтрации пород. Для интерпретации кривой изменения уровня в результате кратковременного возмущения скважины целесообразно использовать результаты точного решения, полученного Б. С. Шержуковым и М. И. Гамаюновым [92]. Согласно этому решению, в совершенных скважинах понижение уровня в любой момент после начала опыта может быть определено по следующей зависимости:

$$S = S_0 R(f_0, \mu'), \qquad \text{(II.81)}$$

где S_0 — понижение уровня в скважине при мгновенной откачке или повышении уровня при наливе; $R(f_0, \mu')$ — функция, зависящая от параметра Фурье $f_0 = at/r_c^2$; a — коэффициент пьезо-

проводности; t — время; r_c — радиус скважины; μ' — коэффициент водоотдачи.

Решение уравнения (II.81) получено на основе исходного дифференциального уравнения Фурье при следующих краевых условиях:

$$t=0,\ 0<r<r_0,\ S=S_0$$

$$r_0<r<\infty,\ S=0$$

$$t>0,\ r=r_0\ \pi r^2\frac{\partial S}{\partial t}=2\pi kmr\frac{\partial s}{\partial r}. \qquad \text{(II.82)}$$

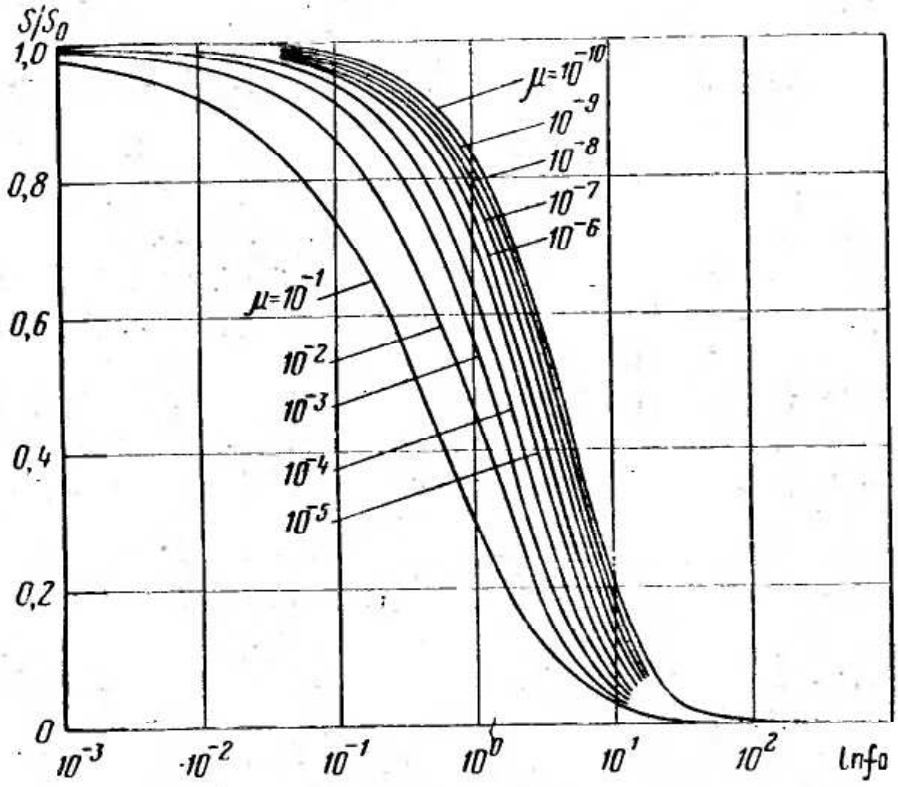


Рис. 87. Эталонные кривые для расчета параметров скважин и пластов по данным экспресс-налива

Результат решения при указанных условиях представлен в виде формулы (II.81), причем функция R (fo, μ') выражена интегралом с бесконечными пределами:

$$R(\text{fo},\ \mu')=\frac{8\mu'}{\pi^2}\int_0^\infty \frac{e^{-\alpha^2 \text{fo}}}{[\alpha I_0(\alpha)-2\mu' I_1(\alpha)]^2+[\alpha Y(\alpha)-2\mu' Y_1(\alpha)]^2}\frac{d\alpha}{\alpha}, \qquad \text{(II.83)}$$

где I_0, I_1, Y_0 и Y_1 — символы функции Бесселя первого и второго рода от действительного аргумента нулевого и первого порядка.

Выражение (II.83) подробно табулировано в работе [100]. Значения табулированной функции R (fo, μ') приведены в полулогарифмическом масштабе на рис. 87.

Для определения параметров опробуемого водоносного горизонта с помощью эталонных кривых $S/S_0 \div f\,[R\,(\mathrm{fo}, \mu')]$, приведенных на рис. 87, следует фактические данные понижения уровня отложить на графике в координатах $S/S_0 \div \ln t$ и полученную таким образом кривую совместить с одной из кривых $R\,(\mathrm{fo}, \mu')$ от ln fo. По совпадающим кривым находится величина водоотдачи μ'. При этом ось абсцисс оказывается смещенной при $kmt/r_c^2 = 1{,}0$ на величину t^0.

Отсюда водопроводимость рассчитывается по формуле

$$km = 1{,}0r_c^2/t^0. \qquad \text{(II.84)}$$

Пример исследований. Опытные исследования были проведены в скважинах, оборудованных фильтрами в рыхлых отложениях, на стационаре ВСЕГИНГЕО, в поселке Щемилово. В разрезе здесь развиты переслаивающиеся флювиогляциальные пески различного гранулометрического состава. С поверхности на песчаных отложениях залегает слой супеси мощностью 1—2 м. Подстилаются пески верхнеюрскими глинами, залегающими на

Таблица 55

Сопоставление значений водопроводимости, полученных путем экспресс-налива и опробованием опытными откачками

№ скважины	Водопроводимость, м²/сут				Отклонение				Пробная откачка (опытный налив), м²/сут
	Экспресс-налив	Опытная откачка		Пробная откачка или опытный налив	Опытная откачка				
		по центральной и наблюдательной скважинам	по наблюдательным скважинам		по центральной и наблюдательной скважинам		по наблюдательным скважинам		
					м²/сут	%	м²/сут	%	
Полигон ВСЕГИНГЕО в Щемилово									
607	112	114	190		—2,0	—1,8	—78,0	—41,1	
612	103	111	176		—8,0	—7,2	—73,0	—41,4	
613	125	108	161		+17,0	+15,7	—36,0	—22,3	
647	29,8	18,1	75,8		11,7	64,7	—46,0	—60,7	
651	54,6	30,4	45,3		24,2	79,7	19,3	+20,5	
653	38,9	18,1	75,8		20,8	115,0	—36,9	—48,7	
Тетюхинское месторождение									
506а	9,74			10,5					—0,76
538	40,2			39,0					+1,20
574	7,5			8,8					—1,30
Язовское месторождение									
86ц	0,92			1,06					—0,14

глубине 27—28 м. Вся толща песчаных флювиогляциальных отложений представляет собой единый безнапорный горизонт грунтовых вод с уровнем воды на глубине 2,5—3,5 м. Мощность безнапорного водоносного горизонта 24—26 м.

Экспресс-наливом на Щемиловском полигоне были исследованы скважины, оборудованные фильтрами различных типов: тарельчатым, жесткопоролоновым, фильтром с коническими отверстиями различных размеров.

Водопроводимость, определенная по результатам экспресс-налива, приведена в табл. 55.

При известной мощности водоносного пласта можно оценить коэффициент фильтрации призабойной зоны в радиусе, в пределах которого сказывалось возмущение, обусловленное экспресс-наливом. При опробовании скважин Щемиловского стационара размер зоны возмущения не превышал 1,5 м.

Коэффициент фильтрации этой зоны и показатели сопротивления фильтров и прифильтровых зон приведены в табл. 56.

Таблица 56

Показатели сопротивлений фильтров и прифильтровых зон скважин Щемиловского стационара по кустовым откачкам и экспресс-наливу

№ скважины	Конструкция фильтра	Радиус фильтра r_0, м	Коэффициент фильтрации, м/сут		Показатель сопротивления скважины ζ_2	
			пласта по данным кустовых откачек	призабойной зоны по экспресс-наливу	по кустовым откачкам	по экспресс-наливу
607	Тарельчатый	0,084	8,2	4,8	2,9	2,1
613	Жесткопоролоновый	0,084	11,5	5,4	3,15	3,2
647	Фильтр с коническими отверстиями	0,063	4,1	1,3	9,4	6,9
651	То же	0,063	2,5	1,4	3,4	2,6

Сопротивления, полученные по данным кустовых откачек и экспресс-налива, очень близки, и некоторое расхождение объясняется условностью задания величины радиуса возмущенной зоны. Но в любом случае при экспресс-наливе можно регулировать величину возмущения и, следовательно, определять проницаемость пласта в пределах этой зоны.

При оценке сопротивлений фильтров и прифильтровых зон скважин по данным экспресс-налива следует учитывать, что при значительной их величине опытная кривая обычно совпадает с эталонной, соответствующей меньшему значению водоотдачи, чем коэффициент водоотдачи пласта. Величина водоотдачи $\mu'_э$, полученная по эталонной кривой, связана с фактической водоотдачей пласта μ'_0 и показателем сопротивления скважины следующим соотношением:

$$\mu'_э = \mu'_0 e^{-\zeta}.$$

Следовательно, при известных $\mu'_э$ и μ'_0 можно легко определить сопротивление скважины непосредственно методом эталонных кривых.

По аналогичной методике могут быть обработаны опытные данные, полученные при опробовании предварительно герметизированных скважин с использованием подкачки газа. При этом необходимо учитывать, чтобы давление, создаваемое компрессором или передаваемое от баллона (ресивера) со сжатым воздухом, не превышало высоты столба воды над фильтром, и время выдержки этого давления в скважине было не менее 0,5 ч.

Имеется положительный опыт оценки сопротивлений фильтров и прифильтровых зон дренажных скважин по данным режимных наблюдений при переменном уровне в нижнем бьефе водохранилища. Очевидно, что при известных параметрах водоносных пород, каптируемых опытной скважиной, ее сопротивление можно определить по изменению барометрического давления и соответствующим колебаниям уровня воды в этой скважине.

ГЛАВА III

КОЛЬМАТАЖ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН СКВАЖИН

Эффективность работы фильтров водозаборных и дренажных скважин значительно зависит от кольматационно-суффозионных процессов на контактах каркас фильтра — порода, гравийная обсыпка — порода и каркас фильтра — гравийная обсыпка. При подборе фильтров без учета особенностей формирования естественного фильтра (сводообразования) в указанных контактных зонах возможно проявление механического кольматажа, который приводит к увеличению гидравлических потерь в прифильтровой зоне скважины и на самом каркасе фильтра. В ходе эксплуатации скважин в большинстве случаев наблюдается снижение их производительности, обусловленное отложением в отверстиях фильтров, порах гравийной обсыпки и водоносных породах осадков химического и биологического происхождения. Сущность этих процессов необходимо знать как для разработки методов подбора и расчета фильтров, так и для формулирования рекомендаций по поддержанию стабильного дебита скважин во времени за счет применения комплекса профилактических мер и ремонтных работ.

§ 20. МЕХАНИЧЕСКИЙ КОЛЬМАТАЖ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН СКВАЖИН И МЕРЫ ПО ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ

Кольматаж контактной зоны между каркасом фильтра и гравийной обсыпкой (водоносной породой) вызывается главным образом заклиниванием отверстий и наложением частиц гравия (песка) на водоприемную поверхность фильтра. Как указывалось ранее (см. гл. II), минимальная величина коэффициента расхода фильтра при $d_{25}/b = 1$ (d_{25} — диаметр частиц гравия или песка, соответствующий 25%-ному содержанию его в пробе, b — диаметр круглого отверстия или ширина щели). Следовательно, соотношение размеров гравия (песка) и щели не должно быть равно 1.

При отборе воды из рыхлых песчаных отложений необходимо стремиться к созданию естественных фильтров на контакте каркаса фильтра с породой, либо на контакте гравийной обсыпки с породой. Естественные фильтры должны формироваться при непременном пескование скважин, так как только при этих условиях наблюдается сортировка пород по диаметрам фракций и отмывка мелкозернистых частиц, снижающих фильтрационные свойства пород в прифильтровой области. Повышенные пористость и проницаемость естественного фильтра благоприятно сказываются на производительности скважины и на сроке ее службы.

Учитывая указанные условия формирования фильтров, можно избежать механического кольматажа самого каркаса. Важным является учет возможности кольматационных явлений и при устройстве рыхлой гравийной обсыпки с тем, чтобы не допустить дополнительных потерь напора на контакте гравия с породами водоносного пласта и заиления самой обсыпки. При этом следует учитывать, что соотношение между размерами частиц рыхлых водоносных пород и гравия или песка имеет оптимальную величину, которая зависит от кольматажа и пескования скважины.

Пескование, т. е. вымыв и вынос в скважину частиц песка из водоносного пласта, называется также механической суффозией.

В результате исследований установлены две категории условий возникновения механической суффозии [34]:

необходимые геометрические условия, определяемые соотношением между частицами фильтра и песка, защищаемого от выноса;

достаточные гидромеханические условия в поровых каналах на контакте фильтра с водоносной породой, определяемые градиентами и входными скоростями фильтрации.

Если частицы песка не проникают сквозь поры гравийной обсыпки, т. е. по геометрическим условиям механическая суффозия невозможна, то любые большие градиенты и скорости фильтрации не могут вызвать пескования скважин. Явление выпора при этом исключается, так как частицы обсыпки опираются на каркас или каркасный слой фильтра, поэтому они могут воспринимать воздействие фильтрующейся воды как одна целая статически жесткая система.

Геометрический критерий суффозии, как правило, определяется отношением D/d между диаметрами частиц, составляющих обсыпку D и водоносный пласт d. Исключение составляет только предложение В. Н. Кондратьева [1], который опытным путем установил, что размер передвигающихся в гравийном слое песчаных частиц соизмерим с гидравлическим эквивалентом порового пространства гравийного фильтра d_0

$$d_0 = 0{,}214\eta_к d_{50}, \qquad \text{(III.1)}$$

где $\eta_к$ — параметр неоднородности и плотности, определяемый по специально разработанной методике; d_{50} — диаметр частиц, содержание которых вместе с более мелкими фракциями в обсыпке составляет 50%.

Принимая $\eta_к = 1$, нетрудно убедиться, что гидравлический эквивалент пор d_0 представляет собой величину, равноценную среднему диаметру каналов обсыпки d_0^*.

---

* Проведенный Слихтером анализ модели фиктивного грунта, сложенного из шаров одного размера D, показывает, что диаметр пор однородного грунта $d_0 = 0{,}21D$, т. е. $D/\overline{d_0} \approx 5$.

Рекомендации по отношению размеров частиц, которые определяют геометрические условия механической суффозии, можно разделить на две группы.

Первая группа объединяет зависимости, которые основаны на соизмеримости размера защищаемых от выноса частиц d со средним диаметром поровых каналов обсыпки $d \approx d_0$, или требования о недопущении проникновения песчаных частиц в фильтр, т. е. предотвращения кольматируемости фильтра [31, 34] $d > \overline{d}_0$, что соответствует соотношению между величинами D и d без учета сводообразования

$$D/d \leqslant 4 \div 5. \qquad \text{(III.2)}$$

Этим отношением рекомендуется пользоваться при подборе гравия для второго и следующих слоев обсыпки.

Вторая группа включает рекомендации, полученные с учетом сводообразования [31, 34]. Соотношения между диаметром внешнего слоя обсыпки D и диаметром зерен d, которые предполагается удержать от выноса в водоносном пласте, находятся в пределах

$$D/d = 8 \div 12. \qquad \text{(III.3)}$$

§ 21. ХИМИЧЕСКИЙ КОЛЬМАТАЖ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН СКВАЖИН И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ МЕРЫ ПО ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ

При проектировании и строительстве временных водопонизительных и постоянных дренажных систем не придается большого значения влиянию химического состава подземных вод на успешность работы скважин и дренажей. Однако опыт эксплуатации этих сооружений показывает, что их производительность и дренирующая способность существенно снижаются во времени вследствие зарастания фильтров и прифильтровых зон скважин гидратом окиси железа, карбонатом кальция и силикатными образованиями.

Анализами состава осадков, отлагающихся на фильтре, в гравийной обсыпке, водоподъемных трубах [34], а также по результатам вскрытий фильтров водопонизительных скважин на больших глубинах [36] установлено, что в составе осадков преобладают соединения $Fe(OH)_3$, $CaCO_3$, $Mn(OH)_2$, $Mn(OH)_4$, $SiO_2 \cdot nH_2O$ и механические примеси — тонкие глинистые и песчаные частицы. Осадки образуются в результате нарушения химического равновесия в пласте, связанного с действием в нем гидродинамического возмущения. Нарушение химического равновесия обусловливается смещением наиболее динамичного газового равновесия, выражающегося в гидролизе бикарбоната железа, окислении закисного железа до трехвалентной формы и избыточном образовании карбонат-ионов с одновременным увеличением pH при удалении свободной углекислоты.

В прифильтровой зоне в условиях контакта подземных вод с атмосферным воздухом, парциальное давление углекислоты в котором ничтожно мало, и понижения давления происходит десорбция свободной углекислоты из подземных вод. Параллельно в подземных водах, обычно обедненных кислородом, наблюдается его поглощение из воздуха, в результате чего Fe^{2+} окисляется до Fe^{3+} с образованием $Fe(OH)_3$, основного кольматирующего соединения.

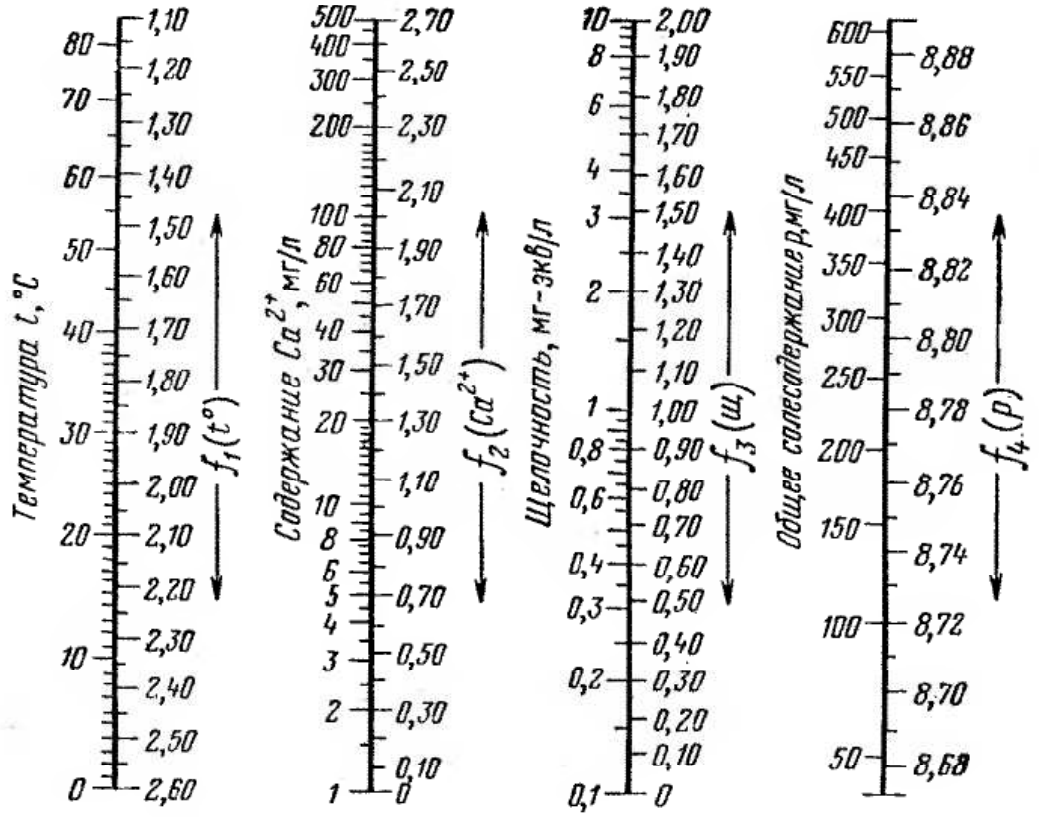


Рис. 88. Номограмма для определения равновесной концентрации водородных ионов

Аналогично образуются отложения трудно растворимой гидроокиси марганца в порах и на фильтре. Избыток карбонат-ионов при диссоциации HCO_3^- связывается катионами кальция, всегда присутствующими в водоносных пластах, каптируемых при водоснабжении и водопонижении.

Таким образом, процесс химической кольматации призабойных зон скважин при заборе гидрокарбонатно-кальциевых вод контролируется содержанием соединений железа, марганца, двуокиси кремния и их стабильностью.[1]

Для определения возможности течения реакции разложения бикарбонатов железа и выпадения карбоната кальция необходим расчет стабильности подземных вод в естественном состоянии.

---

[1] Процесс кольматации здесь рассматривается вне зависимости от конструкции фильтра, который предполагается выполненным из антикоррозионного материала.

Наиболее удобно на основе данных химического анализа воды рассчитывать величины pH_s [13], отвечающие равновесному состоянию в растворе углекислых соединений. Если фактическая величина pH данной воды ниже pH_s, это является результатом избытка в растворе CO_2 над равновесной концентрацией. Такие воды способны растворять карбонатные образования. При значениях pH данной воды выше pH_s содержание CO_2 в ней меньше равновесной концентрации и она способна выделять из раствора осадок карбоната кальция. Величина pH_s может быть определена из следующей зависимости [13]:

$$pH_s = pK_2 + pS_{CaCO_3} - \lg(Ca^{2+}) - \lg(Щ) + 2{,}5\sqrt{\mu} + 7{,}6, \quad (III.4)$$

где $pK_2 = -\lg K_2$; K_2 — константа второй ступени диссоциации угольной кислоты; $pS_{CaCO_3} = -\lg S_{CaCO_3}$; S_{CaCO_3} — произведение растворимости $CaCO_3$; (Ca^{2+}) — концентрация катиона кальция в мг/л; Щ — щелочность в мг-экв/л; μ — ионная сила раствора.

Для расчета pH_s И. Э. Апельциным [13] составлена номограмма (рис. 88), в котором равновесная концентрация водородных ионов определяется как функция температуры, содержания кальция, величины щелочности и общего солесодержания.

$$pH_s = f_1(t) - f_2(Ca^{2+}) - f_3(Щ) + f_4(p). \quad (III.5)$$

Показателем стабильности воды и способности к выделению осадков является индекс насыщения, равный разности между фактически измеренной величиной pH и pH_s

$$I = pH - pH_s. \quad (III.6)$$

Большой объем исследований по изучению устойчивости карбонатных систем был проведен Ризнером, который определял возможность выделения карбоната кальция в системах оборотного водоснабжения при различных соотношениях pH равновесного насыщения и действительной величиной pH подземных вод

$$Ri = 2pH_s - pH. \quad (III.7)$$

Экспериментами установлено, что при $Ri < 7{,}0$ воды всегда склонны к выделению кольматирующих образований.

Выделение CO_2 в прифильтровой зоне приводит к повышению pH, при этом наиболее интенсифицируется гидролиз бикарбоната железа и увеличивается скорость окисления закисного железа. При $pH = 7 \div 8$ скорость окисления железа соизмерима со скоростью течения воды в прифильтровых зонах скважин. При более глубоком удалении свободной углекислоты разложение бикарбонатов приводит не только к образованию $Fe(OH)_3$, но и к выпадению из раствора карбонатов кальция и магния.

В связи с тем, что в железосодержащих водах разложение $Fe(HCO_3)_2$ неизбежно, важно определить устойчивость образующихся соединений железа. Коллоидные растворы гидрозакиси

и гидроокиси железа образуются, если содержание в воде ионов Fe^{2+}, Fe^{3+} и OH превышает концентрации, отвечающие произведениям растворимости $Fe(OH)_2$ и $Fe(OH)_3$. Определяя pH равновесного насыщения гидрозакисью или гидроокисью при данных температурах и концентрациях Fe^{2+} и Fe^{3+}, можно путем сопоставления этой величины с pH рассматриваемой воды судить о форме, в которой железосодержащие соединения мигрируют в подземных водах.

Если pH воды выше pH равновесного насыщения, то это свидетельствует о том, что концентрация OH-ионов в воде превышает концентрацию, соответствующую произведению растворимости. В этом случае часть содержащегося в воде железа находится в форме коллоида или суспензии. Если же измеренная величина pH меньше pH равновесного насыщения, то железо в воде присутствует в ионной форме.

Согласно И. Э. Апельцину [13], pH равновесного насыщения гидрозакисью железа можно выразить уравнением

$$pH_s^1 = pK_w - \frac{1}{2} pS_{Fe(OH)_2} - \frac{1}{2} \lg (Fe^{2+}) - \sqrt{\mu} + 2{,}37. \quad (III.8)$$

Здесь $pK_w = -\lg K_w$; K_w — ионное произведение воды (константа, зависящая от температуры воды); $S_{Fe(OH)_2}$ — произведение растворимости $Fe(OH)_2$; $-\lg S_{Fe(OH)_2} = pS_{Fe(OH)_2}$; Fe^{2+} — концентрация закисного железа в мг/л.

Величину pH равновесного насыщения гидроокисью железа получаем в виде

$$pH_s' = pK_w - \frac{1}{3} pS_{Fe(OH)_3} - \frac{1}{3} \lg (Fe^{3+}) + 1{,}5\sqrt{\mu} + 1{,}58, \quad (III.9)$$

где $S_{Fe(OH)_3}$ — произведение растворимости гидроокиси железа; Fe^{3+} — концентрация железа в окисной форме в мг/л.

Подсчитанные таким образом значения pH равновесного насыщения железом показывают, что при концентрациях закисного железа в пределах 20 мг/л, $pH_s' = 8{,}1 \div 8{,}5$, т. е. практически во всех природных водах закисное железо мигрирует в ионном виде. Это косвенно указывает на то, что кольматаж фильтров и прифильтровых зон гидрозакисью железа маловероятен.

При концентрации Fe^{3+} до 20 мг/л подобные расчеты дают $pH_s'' = 2{,}8 \div 3{,}3$, и поэтому почти во всех водах, встречающихся в природе, pH которых колеблется в пределах 6—8, трехвалентное железо будет в форме коллоида или преимущественно даже в виде суспензии, поскольку коагуляция коллоидальной гидроокиси железа в зависимости от солевого состава воды происходит при $pH = 6 \div 7$. Процесс зарастания фильтров соединениями железа будет идти только в окислительной обстановке при наличии в водах кислорода, необходимого для перевода иона железа в трехвалентную форму. Аэрация же подземных вод наиболее

интенсивно происходит в непосредственной близости от скважины. Кроме того, в отдельных случаях окисление закисного железа осуществляется за счет кислорода, содержащегося в незначительных концентрациях в воде, при интенсивном перемешивании, вызванном турбулизацией потока в гравийной обсыпке и фильтре.

Для качественного прогноза кольматажа представляется рациональным разделить подземные воды в соответствии с их способностью к выделению закупоривающих отложений на следующие типы.

1. Агрессивные подземные воды, не содержащие железа с отрицательным индексом насыщения карбонатом кальция, в которых процессы зарастания при отсутствии аэрации или даже при наличии некоторого подсоса воздуха в прифильтровую зону развиваются очень медленно и их можно не принимать во внимание.

2. Железосодержащие воды с положительным индексом насыщения, в которых, как правило, нет растворенного кислорода, и стабильные воды при полной изоляции водной поверхности от атмосферного воздуха (самоизливающиеся скважины) характеризуются медленным течением процесса зарастания при интенсивном водоотборе.

3. Железосодержащие воды с положительным индексом насыщения ($pH_s'' > 0$) и стабильные воды при всех способах водоотбора, способные к интенсивному выделению кольматирующих соединений.

4. Воды, не содержащие железа с высоким положительным значением индекса насыщения. В этом случае в прифильтровых зонах скважин и дренажей отлагается карбонат кальция.

5. Воды, содержащие кремнекислоту в виде коллоида. В прифильтровой зоне скважины создаются условия, благоприятные для ее коагуляции, в результате чего образуются коагели взаимного осаждения кремнекислоты с гидроокисью железа.

Предлагаемая методика прогноза зарастания фильтров и прифильтровых зон водозаборных скважин в процессе эксплуатации не требует специальных анализов и может быть легко применена при проектировании крупных водозаборных и водопонизительных систем. Однако следует отметить, что практически во всех случаях при эксплуатации скважин в районе их действия формируется новый гидродинамический режим (изменяются условия питания, сказывается перетекание из других водоносных горизонтов), в результате чего изменяются гидрохимические условия.

Поскольку при отборе больших количеств воды обычно увеличивается содержание железа и общая жесткость, процесс кольматации прослеживается более интенсивно. Ниже приводится пример такого прогноза и прослеживается изменение гидравлических показателей скважин в различных гидрогеологических условиях.

Пример. Скважины Горьковского стационара по испытанию различных конструкций фильтров имеют одинаковую глубину 14 м и пробурены на водоносный горизонт в четвертичных отложениях первой надпойменной террасы

реки Волги в нижнем бьефе Горьковской ГЭС. Водоносный горизонт представлен в верхней части мелко- и среднезернистыми песками мощностью 4—5 м, в нижней части — крупнозернистыми песками с галькой и гравием коренных пород. Скважины оборудованы фильтрами диаметром 168 мм и длиной 4 м, установленными в нижней части разреза, работают самоизливом. В региональном плане питание водоносного горизонта осуществляется за счет фильтрации воды из водохранилища. В зоне дренирования скважин и магистрального коллектора находятся болота. Воды характеризуются повышенными концентрациями железа, сероводорода (10—12 мг/л), значительной окисляемостью (табл. 57).

Таблица 57

Данные о химическом составе подземных вод на Горьковском стационаре

№ скважины	Температура t, °С	pH	Свободная CO_2, мг/л	$Fe_{общ}/Fe^{3+}$, мг/л	Анионы					
					HCO_3^-		Cl^-		SO_4^{2-}	
					мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л
1	6	6,5	110	6/0,7	177	2,9	5,3	0,15	5	0,1
6	6	6,55	63	6/1,7	134	2,2	5,3	0,15	5	0,1

Продолжение табл. 57

Катионы						Жесткость, мг-экв/л		Сухой остаток, мг/л
Ca^{2+}		Mg^{2+}		$K^+ — Na^+$		общая	карбонатная	
мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л			
38	1,9	13,5	1,1	3,45	0,15	3	2,9	140
28	1,4	9,7	0,8	5,75	0,25	2,2	2,2	128

Все это характерные признаки восстановительных сульфатредуцированных вод. Были рассчитаны стабильность воды и индекс насыщения по Ланжелье с использованием номограмм И. Э. Апельцина. Данные расчетов сведены в табл. 58.

Таблица 58

Данные по расчету индекса насыщения

№ скважины	f_1 (t)	f_2 (Ca^{2+})	f_3 (Щ)	f_4 (Р)	pH_s	pH	I
1	2,45	1,60	1,47	8,74	8,12	6,50	—1,57
6	2,45	1,45	1,34	8,73	8,39	6,55	—1,84

Отсутствие возможности аэрации и растворенного кислорода в подземных водах, отрицательный индекс насыщения указывают на то, что процессы зарастания в этих условиях вследствие выпадения из раствора гидроокиси железа и карбонатов кальция и магния маловероятны.

Однако в рассматриваемом случае сказалось смещение газового равновесия, обусловленное существенным расхождением растворимости сероводорода при различной величине pH воды. Поскольку поток к вертикальному дренажу формируется со стороны водохранилища и дренируемой территории в нижнем бьефе, изменение физико-химических условий на линии дренажа привело к увеличению pH и, следовательно, десорбции из воды H_2S и образованию гидросульфидных ионов и S^{2-}. При избытке ионов S^{2-} в фильтре и прифильтровой зоне фиксируются отложения FeS, кольматирующие отверстия фильтра и поры гравийной обсыпки.

Детальные исследования химического кольматажа скважин на вертикальных дренажах Каховского и Кременчугского водохранилищ на Днепре, дренажах Волжской ГЭС им. В. И. Ленина, Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, Цимлянского гидроузла, водозаборов в городах Риги, Воронеже, Курске, Черкассах и других показывают, что практически во всех случаях наблюдается кольматация фильтров и прифильтровых зон скважин. Возможно отложение карбонатов и при среднегодовых отрицательных значениях индекса насыщения подземных вод углекислотой, что связано с сезонным изменением этого показателя.

Интерес представляет форма нахождения в осадке соединений железа как для определения весового количества осадков, так и для правильного выбора реагента при восстановлении производительности скважин.

В процессе диагенеза осадков во времени гидроокись железа должна превратиться в обезвоженный гематит, растворимость которого реагентами меньше растворимости $Fe(OH)_3$. В равновесии с гематитом поле устойчивости $FeCO_3$ значительно уменьшается.

Для оценки влияния различных факторов на интенсивность процессов химического кольматажа, а также формирования минерального состава железистых осадков в скважинах Каменского вертикального дренажа в Приднепровье и водозаборных скважинах в Курске были проведены специальные исследования, включающие анализ химического состава осадков и подземных вод, а также режимов эксплуатации скважин. В обоих случаях скважинами отбираются подземные воды гидрокарбонатного типа, приуроченные к аллювиальным отложениям. На участке вертикального дренажа скважины эксплуатируются при эрлифтном водоотборе, на Курском водозаборе в качестве водоподъемного оборудования используются погружные насосы.

При химическом анализе пробы воды отбирали из скважин с помощью специального батометра, в крышку которого вмонти-

рованы электроды для измерения Eh и pH. Эти величины замеряли переносным pH-милливольтметром ППМ-03М1. Химический анализ воды проводился на местах отбора проб.

Исследованиями установлено, что на обоих участках в подземных водах наблюдаются явно восстановительные условия. Это позволяет сделать вывод о том, что в естественных условиях железистые осадки не должны выпадать, кольматаж фильтров и прифильтровых зон определяется особенностями гидродинамического и гидрохимического режимов подземных вод в непосредственной близости от скважины и внутри нее. Так, эрлифтный водозабор из скважин вертикального дренажа максимально способствует аэрации откачиваемой воды и смещению равновесия соединений железа. При демонтаже воздушных труб в некоторых скважинах наблюдается практически полное зарастание водоподъемных труб осадками, отложение которых не локализуется только в водоподъемных трубах, а наблюдается также и в прифильтровых зонах скважин.

Для исследования влияния эрлифтного водоподъемного оборудования на интенсивность процесса кольматажа в скважинах отбирали пробы воды на выходе из водоподъемной колонны и результаты анализов сопоставляли с данными анализа глубинных проб при неработающих скважинах. Как видно из табл. 59, при эрлифтном водоотборе значительная часть железа, находящаяся в закисной форме в пластовых условиях, окисляется и осаждается в водоподъемных трубах.

Таблица 59

Характеристика окислительно-восстановительного состояния воды в скважинах Каменского дренажа

Характеристика воды	Скв. 181		Скв. 183		Скв. 184		Скв. 163		Скв. 159	
	глубина 16 м	на изливе	глубина 16 м	на изливе	глубина 16 м	на изливе	глубина 16 м	на изливе	глубина 16 м	на изливе
Fe^{2+}, мг/л	0,23	0	0,26	0,02	0,82	0	2,2	1,39	2,14	1,68
$Fe_{общ}$, мг/л	0,41	0	0,46	0,14	1,12	0,12	14,2	2,8	3,24	2,0
Eh	+90	+130	+80	+120	+50	+90	+60	+90	+50	+100
pH	7,5	7,7	7,4	7,7	7,5	7,6	7,4	7,7	7,4	7,6

На водозаборных скважинах в Курске при отборе вод погружными насосами также наблюдается образование железистых осадков, но с меньшей интенсивностью.

Для оценки устойчивости соединений железа в подземных водах при работе скважин были рассчитаны равновесные концентрации ионов Fe^{2+} по отношению к $Fe(OH)_3$ и $FeCO_3$. Результаты

расчетов приведены в табл. 60, из которой следует, что практически во всех пробах наблюдается некоторое перенасыщение воды железом по отношению к его равновесным значениям. Следовательно, в процессе эксплуатации скважин будет образовываться гидроокись $Fe(OH)_3$, осаждающаяся в прифильтровых зонах и фильтрах. Карбонат железа образуется в скважинах, помеченных знаком +. Расчетами установлено, что $FeCO_3$ практически всегда устойчив при равновесии с $Fe(OH)_3$.

Таблица 60

Соотношения фактических и теоретических показателей насыщения подземных вод $Fe(OH)_3$ и $FeCO_3$ на Курском водозаборе

№ скважины	$\lg a_{HCO_3^-}$	$\lg a_{Fe^{2+}}$	$\lg a_{Fe^{2+}}$	pH		Образование $FeCO_3$
	по анализу		расчетная	измеренная	расчетная	
7	—2,44	—4,84	—4,79	6,9	6,95	
8	—2,39	—4,46	—4,84	6,9	6,52	+
9	—2,39	—4,85	—4,84	6,9	6,91	
10	—2,38	—4,38	—4,76	6,8	6,33	+
11	—2,42	—4,97	—4,71	6,8	7,06	
12	—2,47	—5,20	—5,08	7,2	7,34	
13а	—2,44	—4,60	—4,79	6,9	6,71	+
14а	—2,46	—4,90	—4,77	6,9	7,03	
15а	—2,40	—4,66	—4,83	6,9	6,73	+
17	—2,42	—5,07	—4,71	6,8	7,14	
18	—2,45	—4,8	—4,68	6,8	6,92	
19а	—2,40	—4,95	—4,73	6,8	7,02	
20	—2,46	—4,67	—4,77	6,9	6,8	+
21	—2,45	—4,46	—4,78	6,9	6,58	+

Таким образом, процессы химического кольматажа в скважинах обоих участков контролируются отложением железистых осадков в виде $FeCO_3$ и $Fe(OH)_3$.

Поскольку активность ионов железа в отбираемых водах определяется растворимостью соединений, образующихся в процессе эксплуатации скважин, а также щелочно-кислыми и окислительно-восстановительными условиями, то по данным химического анализа воды и измеренным значениям Eh и pH можно установить равновесные формы нахождения железа.

Реакция между ионами окисного железа Fe^{3+} и гидроокисью записывается в виде [102]:

$$Fe(OH)_3 + 3H^+ \rightleftarrows Fe^{3+} + 3H_2O \qquad \text{(III.10)}$$

$$Eh = 0{,}771 - 0{,}177\,(pH - 1{,}61) - 0{,}0592 \lg a_{Fe^{2+}}. \qquad \text{(III.11)}$$

Аналогичное уравнение можно записать и для реакции между ионами трехвалентного железа Fe^{3+} и окисью железа (гематитом) [1]

$$Fe_2O_3 + 6H^+ \rightleftarrows 2Fe^{2+} + 3H_2O \qquad (III.12)$$

$$Eh = 0{,}771 - 0{,}177\,(pH + 0{,}24) - 0{,}0592 \lg a_{Fe^{2+}}. \qquad (III.13)$$

Из сопоставления уравнений (III.11) и (III.13) следует, что ионы трехвалентного железа находятся в равновесии с гидро-

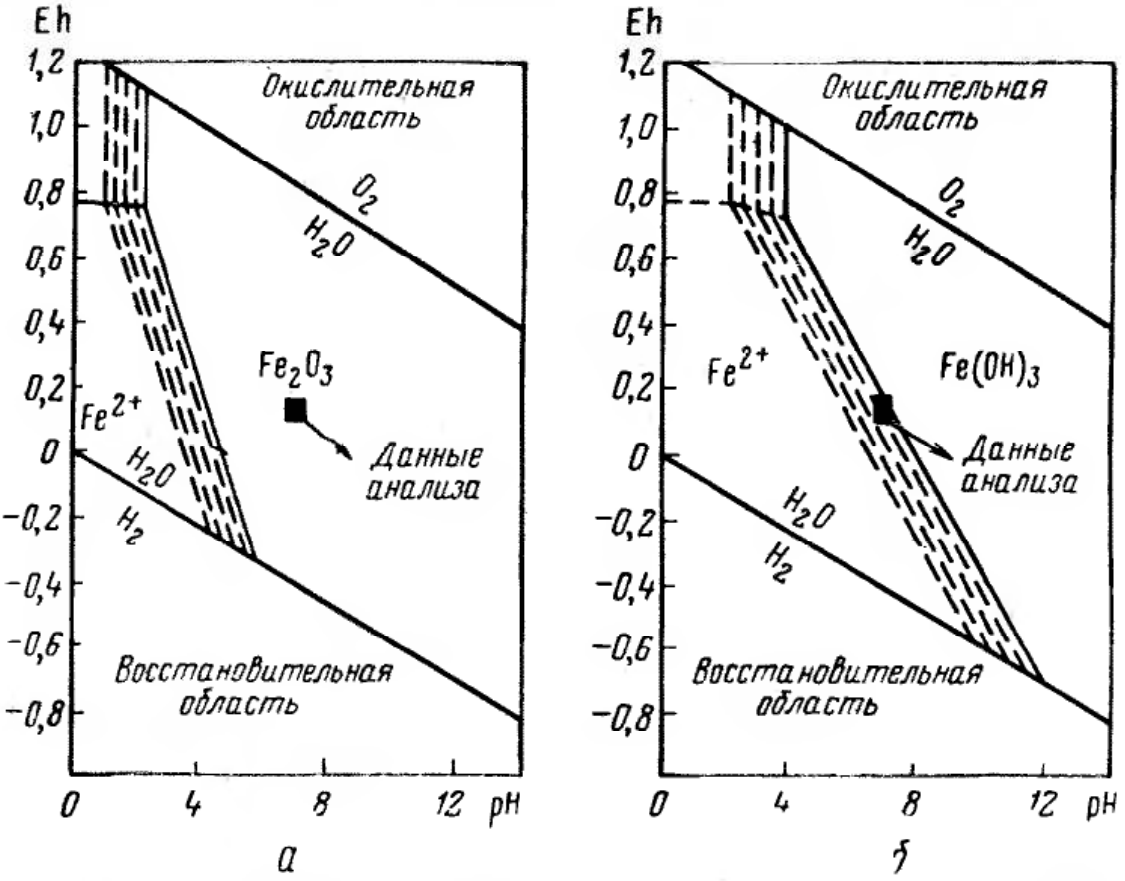


Рис. 89. Диаграмма устойчивости железа в подземных водах на Каменском вертикальном дренаже:
а — в равновесии с Fe_2O_3; *б* — в равновесии с $Fe(OH)_3$

окисью железа при более высоких значениях окислительно-восстановительного потенциала, чем с окисью железа. Следовательно, и концентрация их в подземных водах при одинаковых условиях будет значительно меньше при равновесии с Fe_2O_3, чем при равновесии с $Fe(OH)_3$.

Расчетами по формулам (III.11) и (III.13) установлено, что концентрация ионов Fe^{3+} в подземных водах соответствует растворимости гидроокиси (т. е. ионы Fe^{3+} находятся в равновесии с $Fe(OH)_3$, а концентрация ионов Fe^{2+} лимитируется условиями его окисления до $Fe(OH)_3$. На рис. 89, *а* приведена диаграмма устойчивости ионов Fe^{3+} в подземных водах на участке вертикального дренажа в равновесии с окисью железа Fe_2O_3, а на рис. 89, *б* — диаграмма устойчивости ионов Fe^{3+} с гидроокисью

железа. На обе диаграммы нанесены опытные точки. Полученные данные свидетельствуют о том, что ионы трехвалентного железа находятся в равновесии с $Fe(OH)_3$.

Аналогичные расчеты были проведены и на участке водозаборных скважин в Курске. На рис. 90 иллюстрируется хорошая корреляция между рассчитанными по уравнению (III.11) и определенными анализом концентрациями, выраженными через логарифмы активности ионов Fe^{2+}.

Из приведенных данных следует, что железистые осадки, образующиеся в призабойных зонах, на фильтрах и в водоподъемных трубах, представлены карбонатом и гидроокисью железа. Таким образом, при назначении методов регенерации скважин и определении количества реагента следует исходить из того, что кольматант фильтров и прифильтровых зон скважин береговых дренажей представлен гидроокислами железа. Это позволит унифицировать методику восстановления производительности скважин [41] с использованием солянокислотных обработок или обработок с применением полифосфатов.

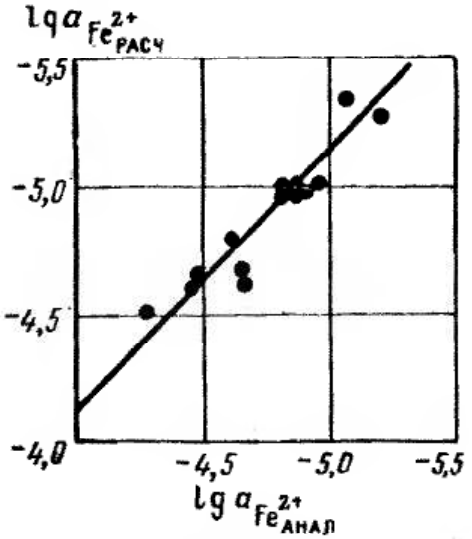


Рис. 90. Диаграмма устойчивости соединений железа для водозабора в Курске

Профилактические мероприятия, позволяющие несколько снизить интенсивность процессов химического кольматажа, следует предусматривать как при конструировании скважин, так и в процессе их работы.

При эксплуатации скважин в водоносных горизонтах с подземными водами, склонными к выделению кольматирующих образований, следует избегать неравномерного режима эксплуатации, в результате которого происходит аэрация подземных вод, надежно герметизировать устья скважин, исключать использование эрлифтных водоподъемников, проверять работу обратных клапанов погружных насосов с тем, чтобы предотвратить поступление аэрированных вод в интервал установки фильтра. Предложения о стабилизации и обезжелезивании подземных вод до подхода их к водозаборным сооружениям, заключающиеся в подаче в специальные скважины воздуха, вряд ли могут быть признаны целесообразными, так как в этом случае возможно региональное снижение водопроницаемости пород и не только из-за кольматажа гидроокислами железа, но и вследствие воздушного кольматажа.

В общем случае следует отметить, что профилактические мероприятия не исключают химического кольматажа фильтров и прифильтровых зон скважин и при наличии этих процессов необходимо предусматривать регулярную регенерацию скважин на основе прогноза снижения их производительности.

§ 22. БИОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЬМАТАЖ СКВАЖИН

Процессы химического кольматажа, происходящие в прифильтровых зонах скважин, интенсифицируются биологической деятельностью. Основной причиной этого являются железо и марганцевые бактерии, которые в нескольких видах присутствуют во всех водоносных породах и подземных водах и в результате жизнедеятельности осаждают железо и марганец из подземных вод. Все организмы, способные осаждать эти компоненты из подземных вод, можно разбить на четыре основные группы [52, 88].

Первую группу составляют железо и марганцевые бактерии, способные использовать энергию окисления закисных соединений Fe и Mn по уравнению

$$4Fe(HCO_3)_2 + 6H_2O + O_2 \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 4H_2CO_3 + $$

$$+ 4CO_2 + 58\,000 \text{ кал};$$

$$4MnCO_3 + O_2 \longrightarrow 2MnO + 2CO_2 + 76\,000 \text{ кал}.$$

Сюда относятся Leptothrix ochracea, Gallionella, Siderococcus и другие железобактерии автотрофного образа жизни. Длина отдельных разновидностей нитчатых железобактерий (Leptothrix ochracea) достигает 1 см. Они могут прикрепляться к субстрату и вести плавающий образ жизни, по существу, производя хемосинтез.

Ко второй группе относится ряд гетеротрофных организмов, покрытых слизистой оболочкой, которая может адсорбировать из раствора окисные или закисные соединения, пропитывать их гидратом окиси Fe или Mn. Энергия, выделяющаяся при окислении этих соединений, организмами не используется. Сюда относится ряд нитчатых бактерий из рода Cladothrix.

К третьей группе могут быть отнесены организмы, которые способны использовать органические соединения гуматов железа. Типичный представитель этой группы Siderocapsa treubii. Эти бактерии, используя для своего питания органическую часть гуминового комплекса, осаждают освобождающееся железо на своей поверхности.

К четвертой группе относятся представители высшей водной растительности и нитчатых водорослей, например Conferva. Во время интенсивного фотосинтеза они используют углекислоту бикарбонатов, железа, кальция и марганца. При этом сильно подщелачивается окружающая среда и из раствора выделяются марганец и железо в виде гидратов окиси.

Железобактерии характеризуются следующими физиологическими особенностями: способностью оказывать каталитическое действие на процесс перевода закиси железа в окись, интенсивным выделением огромного количества гидрата окиси железа, основного продукта их окислительной работы. Они обычно не нуждаются в органических питательных веществах, присутствие

которых в больших количествах угнетающе действует на их развитие. Все они предпочитают низкую температуру, свет не играет особой роли в жизнедеятельности железобактерий: они лучше размножаются в темноте. Существование железобактерий связано с наличием в воде растворенных закисных соединений. Наиболее благоприятная для развития железобактерий слабо-кислая реакция, но они могут развиваться при почти нейтральной реакции.

Все указанные условия характерны для состава подземных вод первых от поверхности земли водоносных горизонтов, приуроченных обычно к аллювиальным, флювиогляциальным и пролювиальным отложениям и в максимальной степени используемых для водоснабжения и предотвращения подтопления городских и промышленных территорий дренажными сооружениями.

Нахождение железо- и марганцевых бактерий в горизонтальном дренаже детально изучено З. Я. Хруцкой [88]. Экспериментальными исследованиями заиления горизонтального дренажа в пойме р. Яхромы Московской области установлено, что железистые осадки, являющиеся основной причиной выхода дренажа из строя, представлены продуктами жизнедеятельности железобактерий. Причем в составе осадков присутствуют следующие виды железобактерий: Leptothrix trichogens, Leptothrix ochracea, Gallionella flrruqwinea, Leptothrix crassa.

При работе скважин вертикального дренажа в зоне подпора Каховского дренажа (Каменский, Знаменский, Никопольский вертикальные дренажи), скважин вертикального дренажа на Горьковской ГЭС в фильтрах и водоподъемных трубах обнаружены продукты жизнедеятельности железо- и марганцевых бактерий, в основном Siderocapsa и Sideromonas. Вертикальные дренажи в обоих случаях каптируют аллювиальные водоносные отложения Днепра и Волги.

Интенсивный биологический кольматаж был зафиксирован на водозаборах Курска, каптирующих аллювиально-сеноман-альбские пески в пойме р. Сейм. Здесь на одном из водозаборов хозяйственно-питьевых вод вследствие кольматажа железистыми отложениями скважины выходят из строя в течение 2—3 лет. На другом водозаборе для промышленных целей, состоящем из 14 скважин глубиной 60 м, за 3—4 года эксплуатации толщина слоя коллоидной гидроокиси железа на дне водосборного резервуара достигает 20—25 м [55]. При этом отмечено, что железистые образования формируются непосредственно в водозаборных скважинах.

Железобактерии и продукты их жизнедеятельности были обнаружены на фильтрах и водоподъемных трубах водозабора Риги «Балтэзерс» и во многих других случаях. Так, в Венгрии на водозаборе г. Мишкольц [115] были исследованы причины снижения производительности скважин диаметром 1200 мм. Расход воды, отбираемый из скважины, в течение 5 лет снизился с 48 до 3 м³/ч. При опытных работах вскрывали фильтр и гравийную обсыпку

шахтой размером 3×3 м с отбором проб водоносных пород и кольматанта и последующим их химическим и микробиологическим анализом. Данные анализа 52 проб, отобранных на различных высотах и расстоянии от фильтра, показали, что большая часть кольматанта представлена гидроокисью железа.

В большинстве проб обнаружено значительное скопление железо- и марганцевых бактерий, а также продуктов их жизнедеятельности. Наиболее распространены Gallionella, Leptothrix и Sphoerotikus. Исследования показали, что в водоносных породах и подземных водах содержатся автотрофные и гетеротрофные бактерии железа. В ходе этих работ невозможно было оценить значение каждого из факторов, определяющих кольматаж скважин (биологического и химического), но отмечено, что зона кольматажа имеет неправильные очертания и продукты деятельности железобактерий прослеживаются на значительном удалении от скважин.

Наиболее детальные исследования условий развития железо- и марганцевых бактерий в скважинах были проведены в ФРГ, где актуальность этой проблемы связана с тем, что более 50% общего отбора подземных вод для различных целей осуществляется береговыми водозаборами и водозаборами с системами искусственного пополнения запасов подземных вод. Так как важно определить оптимальные условия развития железобактерий и прогноз биохимического кольматажа скважин, существенный интерес представляют результаты полевых экспериментальных исследований береговых и инфильтрационных водозаборов подземных вод.

В процессе биологических исследований в водозаборные и наблюдательные скважины в различных гидрогеологических условиях устанавливали предметные стекла в интервалах фильтра.

Большинство бактериологических анализов производилось на месте отбора пробы воды и извлечения предметного стекла. Кроме того, часть проб фиксировали формалином, и анализы делали в лабораторных условиях. Количественные исследования интенсивности биологической деятельности были затруднены вследствие кристаллизации продуктов жизнедеятельности бактерий и отложения связных конгломератовидных образований.

Параллельно с изучением бактериологической активности контроль интенсивности накопления кольматирующих отложений производился путем подводного фотографирования труб и фильтров, исследованием химического состава подземных вод. По отобранным пробам определяли электропроводность воды, pH, окисляемость, концентрацию свободных и связанных CO_2, O_2, Ca, Mg, Cl, SO_4, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn. В некоторых пробах оценивали содержание NH_4, NO_2, NO_3.

Полевые исследования проводили на шести водозаборах, где был зафиксирован кольматаж скважин: в Берлине (водозабор Юнгфернхайде), Ханау, Хюнксе, Крефельде, Мангейме (водозабор Кэффератль), Менхенгладбахе, а также на двух водозаборах,

Данные о конструкциях сква

Наименование водозабора или вертикального дренажа	№ скважины	Глубина скважины, м	Диаметр скважины, мм	Тип фильтра
Каменский на Каховском водохранилище (СССР)	183	30,0	700	Каркасно-стержневой с проволочной обмоткой
Знаменский на Каховском водохранилище (СССР)	38	32,0	700	То же
Курский (СССР)	18	40,0	600	Проволочный на трубчатом каркасе
«Балтэзерс» (Рига, СССР)	92	42,0	378	Гравийно-клеевой на трубчатом каркасе
	1	46,0	1000	Щелевой керамический
Ханау (ФРГ)	2	50,0	1000	То же
Хюнксе (ФРГ)	5	17,0	1000	Щелевой стальной с пластмассовым покрытием
Крефельд (ФРГ)	6	17,0	1000	То же
	1а	36,0	1500	Щелевой керамический
Мангейм (ФРГ)	2а	37,0	1500	То же
	18	34,45	1600	»
Менхенгладбах (ФРГ)	24	35,80	1600	»
	4	26,0	1800	»
Хальтерн (ФРГ)	5	29,5	1800	»
	8	41,0	1700/1100	»
Нордхорн (ФРГ)	10	41,0	1700/1100	»
	29	38,56	1200	Щелевой медный
Мишкольц (Венгрия)	6	11,0	1200	Сетчатый на трубчатом каркасе

Таблица 61

жин и видах железобактерий

Тип гравийной обсыпки	Длина фильтра, м	Диаметр фильтра, мм	Содержание Fe^{2+}, мг/л	Виды обнаруженных в воде и осадках железо- и марганцевых бактерий
Однослойная	9,0	190	0,26	Siderococcus Siderocapsa
»	9,0	190	1,5	То же
»	14,0	305	1,4	Leptothrix ochracea, Siderococcus
Без обсыпки	14,5	168/240	0,5	Siderocapsa, G. ferruquinea
Двухслойная	10,0	400	4,8	Siderocapsa, G. ferruquinea
»	10,0	400	6,0	G. ferruquinea, G. minor. Siderococcus
»	2,5	500	1,26	Siderococcus, G. ferruquinea, Leptothrix ochracea
»	2,75	500	3,0	То же
Трехслойная	11,0	400	2,75—7,3	Siderococcus, Siderocapsa, G. ferruquinea, Leptothrix ochracea, G. minor, L. trichogens.
»	11,0	400	2,0—10,0	То же
Двухслойная	17,0	600	—	Siderococcus, Siderocapsa, Leptothrix ochracea, L. ferruquinea.
»	20,0	600	—	Те же виды и Naumaniella minor
Трехслойная	12,0	500	4,3	Siderococcus, Siderocapsa, G. ferruquinea, Leptothr ochracea.
»	15,0	500	2,2	Те же виды и L. trichogenes
Ярусная: трех- и двухслойная	22,0	400	0,45	Siderocapsa, Siderococcus, G. ferruquinea, L. ochracca.
То же	22,0	400	0,45	То же
Двухслойная	17,0	200	6,3	Siderococcus, Siderocapsa, Leptothrix
»	3,5	300	0,59—3,50	Gallionella, Leptothrix Sphaeroticus

где не было отмечено кольматажа скважин: в Хальтерне и Нордхорне.

В каждом случае опытные работы были поставлены на двух скважинах с одинаковыми конструкциями фильтров. Опытные скважины находились в эксплуатации короткие промежутки времени. Бактериальный состав определили до пуска их в эксплуатацию и в процессе водоотбора. Данные о разновидностях железо- и марганцевых бактерий приведены в табл. 61.

Несмотря на разнообразие гидрогеологических условий и химического состава подземных вод, в кольматирующих фильтры образованиях присутствуют весьма близкие виды железо- и марганцевых бактерий. В скважинах, характеризующихся благоприятными гидравлическими параметрами и имеющих производительность менее 90 м³/ч, отмечается интенсивный кольматаж, зафиксированный путем гидрогеологического опробования и фотографирования внутренней поверхности фильтров и обсадных труб.

Для практических целей важно знать необходимые условия развития железобактерий с тем, чтобы иметь возможность прогнозировать биологический кольматаж скважин и назначать специфические в этом случае способы их регенерации. В соответствии с исследованиями [106, 115], для развития железо- и марганцевых бактерий величина pH должна находиться в пределах 5,4—7,2. Содержание Fe^{2+} в воде не должно быть меньше 1,6 мг/л и не превышать 10—12 мг/л, так как при концентрации закисного железа более 14 мг/л рост бактерий невозможен. Подземная вода должна содержать углекислоту.

В исследованных скважинах величины pH и концентрации Fe^{2+} находились в пределах области наиболее благоприятного развития бактерий. Только в Хальтерне не была достигнута нижняя граница содержания Fe^{2+}. Однако и здесь обнаружены некоторые виды бактерий в небольших количествах.

Железо- и марганцевые бактерии — аэробы. О нижней предельной концентрации кислорода, необходимой для их существования, сведений не имеется. Исключение составляет Leptothrix crassa, которая развивается при большом содержании кислорода вблизи поверхности воды.

В изученных скважинах бактерии появлялись при концентрации кислорода 5 мг/л. Такое содержание не является самым низким, так как в подземных водах всегда присутствуют сульфаты и нитраты, которые при разложении их сульфатредуцирующими и денитрифицирующими бактериями освобождают кислород [106]. Такие явления прослеживались на вертикальном дренаже Горьковской ГЭС, где практически в подземных водах сульфаты были полностью восстановлены и, несмотря на большое содержание Fe^{2+} и сероводорода, железобактерии интенсивно развивались.

Ранее указывалось на зависимость интенсивности развития железобактерий от величины окислительно-восстановительного потенциала (Eh).

В табл. 62 приведены данные о величинах Eh на различных опытных участках и описание интенсивности кольматажа, полученные на основе осмотра фильтров, водоподъемных труб и подводного фотографирования. Характерно, что во всех случаях, где регистрируется положительная величина Eh, максимально развиваются железо- и марганцевые бактерии. В этих же случаях отмечается максимальная концентрация продуктов жизнедеятельности бактерий — гидроокиси железа. Отрицательная величина Eh зафиксирована в скв. 29 в Нордхорне. Здесь обнаружены некоторые виды железобактерий (табл. 62). Однако отложения гидроокиси железа практически отсутствуют.

Таблица 62

Характеристика кольматажа скважин в зависимости от окислительно-восстановительных условий

Название водозабора или дренажа	№ скважины	Окислительно-восстановительный потенциал, Eh, мВ	rH	pH	Характеристика кольматажа
Каменский на Каховском водохранилище	183	+80	17,56	7,4	Интенсивное отложение кольматанта
Знаменский на Каховском водохранилище	38	+50	16,12	7,2	То же
Курский	18	+150	18,78	6,8	»
«Балтэзерс»	92	+40	15,78	7,2	Кольматаж средней интенсивности
Маннгейм-Кэффератль	18	+89	18,11	7,55	Интенсивное отложение кольматанта
	24	+114	19,06	7,6	То же
Ханау	2	+109	17,39	6,85	»
	1	+139	18,10	6,7	»
Нордхорн	29	—91	10,42	6,75	Чистый фильтр
Хюнксе	5	+64	16,37	7,1	Отложения средней интенсивности
	6	+99	17,75	7,2	То же
Менхенгладбах	4	+204	20,1	6,6	Интенсивное отложение кольматанта
	5	+230	21,18	6,7	То же
Крефельд	1а	+74	16,70	7,1	»
	2а	+100	17,38	7,0	»

Контрольные исследования влияния отрицательной величины Eh на кольматаж скважин были проведены с использованием подводного фотографирования на водозаборах Белитцхоф и Юнгфернхайде [106]. За исключением двух случаев (табл. 63), скв. Е-1-8 на водозаборе Юнгфернхайде и скв. 21 в Белитцхофе,

Таблица 63

Характеристика кольматажа скважин на водозаборе Белитцхоф и Юнгфернхайде

Наименование водозабора	№ скважины	Окислительно-восстановительный потенциал, Eh, мВ	rH	pH	Год ввода скважин в эксплуатацию	Год фотографирования	Состояние скважины
Белитцхоф	22	—36	13,64	7,43	1955	1961	Нет отложений железистых соединений
	21	+4	14,99	7,43	1955	1961	
	20	—36	13,58	7,4	1955	1961	
	19	—36	13,56	7,39	1955	1961	
	18	—40	13,54	7,45	1955	1961	
	17	—26	13,88	7,38	1954	1964	
	16	—26	13,94	7,41	1954	1964	
	15	—36	13,66	7,44	1954	1964	
	14	—41	13,51	7,45	1954	1964	
	13	—31	13,73	7,39	1954	1964	Начало кольматажа
	12	—6	14,52	7,36	1954	1964	
	11	0	14,92	7,46	1954	1964	Нет кольматажа
	10	—31	13,77	7,41			
Юнгфернхайде	1	+19	15,5	7,43	1962	1963	Отложения железа
	2	+64	17,00	7,42	1962	1963	То же
	E-11-1	—51	13,25	7,49	1960	1963	Нет отложений
	E-11-6	—11	13,94	7,16	1960	1964	То же
	E-1-1	—21	14,19	7,45			»
	E-1-2	—22	14,44	7,41	1956	1963	»
	E-1-8	+19	15,34	7,35	1957	1963	»
	E-1-9	+49	16,43	7,39	1958	1963	Отложения железа
	E-1-10	+194	21,20	7,32	1958	1963	То же
	E-1-11	+169	20,36	7,32	1958	1963	»
	E-1-12	0	14,72	7,36	1958	1963	»
Ваболю	1	+123	19,4	7,6	1965	1966	»

в которых при положительных значениях Eh в течение 6—11 лет эксплуатации отложения гидроокиси железа практически отсутствуют, показатель Eh свидетельствует о возможности биологического кольматажа.

Как показало фотографирование, в течение 5—6 лет эксплуатации фильтров в скважинах с отрицательными значениями Eh не обнаружено отложений железа (исключение составляют скв. 12 и 13 водозабора Белитцхоф). Предельные значения Eh, при которых прекращается развитие железо- и марганцевых бактерий, близко к —10 мВ. Однако неопределенной остается область ± 20 мВ, что значительно больше возможной ошибки в определении Eh, равной ± 5 мВ. Критерием, определяющим более точно возможность развития железо- и марганцевых бактерий, является

показатель давления недиссоциированных водородных ионов в воде, связывающий Eh и pH,

$$rH = \frac{Eh}{0{,}029} + 2pH. \qquad (III.14)$$

Это соотношение справедливо при Eh = 5 ÷ 25. Все приведенные в табл. 62 и 63 значения rH находятся в этом диапазоне. Если проанализировать параметры химического состава подземных вод (табл. 62 и 63) можно отметить, что в скважинах, в которых кольматаж не проявляется, величина rH меньше, чем в кольматируемых. Величина rH, ниже которой железобактерии не развиваются, равна 14,5. Отклонения зафиксированы по четырем из приведенных скважин, но они не превышают ±0,8 rH, так что разброс может приниматься равным ±1 rH. Важно отметить, что скважины, в которых проявляется биологический кольматаж, характеризуются более высокими значениями rH (табл. 62).

В общем случае для массового развития железо- и марганцевых бактерий необходимо выполнение следующих условий.

1. Наличие железо- и марганцевых бактерий.

2. Наличие Fe^{2+} или Mn^{2+} в подземных водах. Минимальная концентрация, равная 1,6 мг/л, может быть принята в расчет только для условий застойной воды. В проточной воде железобактерии развиваются и при меньшей концентрации железа.

3. Окислительно-восстановительные условия должны характеризоваться величинами Eh $>$ —10 мВ ± 20 мВ, а rH $\geqslant$ 14,5 ± ± 1. Процесс развития бактерий интенсифицируется с увеличением скорости фильтрации, так как в этом случае увеличивается интенсивность поступления питания (Fe^{2+}, Mn^{2+}) к бактериям.

Тенденция подземных вод к биологическому кольматажу скважин может быть определена на основе комплексных биологических и химических исследований.

Для биологических исследований в скважинах при опытно-фильтрационных работах необходимо устанавливать предметные стекла и выдерживать их там в течение четырех недель. После этого стекла извлекают и анализируют под микроскопом. Параллельно проводят химические анализы подземных вод. На основе обобщения результатов бактериологических и химических анализов подземных вод может быть сделан вывод о возможности биологического кольматажа фильтров и прифильтровых зон скважин.

При получении сведений о возможности развития железобактерий в фильтре и прифильтровой зоне скважин следует предусматривать профилактические мероприятия по поддержанию их стабильной работы. Наиболее просто осуществлять периодическое хлорирование скважин с остаточной концентрацией хлора 5—7 мг/л [55]. При этом возможно хлорирование скважин путем подачи воды с хлором из напорного водовода (при снятом обратном клапане погружного насоса). После введения раствора хлорной извести в скважину целесообразно включить насос на 30—

50 с и затем отключить его с тем, чтобы обработался не только фильтр, но и прифильтровая зона скважины. Однако периодичность хлорирования фильтров скважин для подавления деятельности железо- и марганцевых бактерий необходимо устанавливать конкретно для каждого объекта работ. По имеющимся данным хлорирование целесообразно осуществлять 1 раз в 3—4 мес.

Более устойчивый эффект на длительные периоды времени обеспечивает установка в фильтре специального источника гамма-лучей [120]. В качестве такого источника опробовано применение радиоактивного кобальта и цезия, помещенных в герметично закрытом излучателе. Защитное действие гамма-облучения против биологического кольматажа скважин обеспечивается при интенсивности излучения 100 рад/ч.

§ 23. ХАРАКТЕР ЗАРАСТАНИЯ ФИЛЬТРОВ И РАЗМЕР ЗОН ИХ КОЛЬМАТАЦИИ

Из химического анализа осадков, взятых с фильтров буровых скважин, которые эксплуатируют пресные воды, следует, что в их составе в основном находятся одни и те же соединения. Количественное соотношение соединений и время образования определяют структуру, механическую прочность и растворимость осадков под действием различных химических реагентов.

На практике в большинстве случаев состав осадков, отлагающихся в водозаборных скважинах, определяется по пробам, отбираемым с водоподъемного оборудования либо с фильтров. Совершенно очевидно, что при таком отборе проб состав осадков и их структура в гравийных обсыпках и породах, примыкающих к фильтрам, остаются недостаточно выясненными.

Исследованиями установлено, что в процессе эксплуатации осадки отлагаются на следующих конструктивных элементах фильтра: на внутренней поверхности, в проходных отверстиях каркасов, в пространстве между каркасом и водоприемными поверхностями (сетчатыми и проволочными), на внешней поверхности в гравийной обсыпке и породах, находящихся в непосредственном контакте с фильтром или гравийной обсыпкой.

При химическом анализе кольматанта необходимо учитывать, что, помимо осадков, выпадающих из воды в процессе фильтрации на фильтрах, изготовленных из простых высокоуглеродистых сталей (ст. 3, ст. 5), образуется гидроокись железа вследствие коррозионного разрушения каркасов трубчатых, стержневых, а также щелевых из просечного листа, которые не имеют надежного защитного покрытия.

В табл. 64 приведен химический состав осадков, отобранных из фильтров буровых скважин, эксплуатирующих воды гидрокарбонатно-кальциевого типа. Из данных видно, что основную массу осадков составляет гидроокись железа.

Таблица 64

Химический состав осадков на фильтрах водозаборных скважин (в %)

Место отбора проб и номер скважины	Влажность	Нерастворимый остаток	Полуторные окислы	Окись железа Fe_2O_3	Окись алюминия Al_2O_3	Окись кальция CaO	Окись магния MgO	Сульфаты SO_4
Саратовская ГЭС, водопонизительная скв. 33 в котловане шлюзов (осадок с сетчатого фильтра)	8,33	55,99	31,48	29,68	1,80	0,52	0,12	0,38
Горьковская ГЭС, водопонизительная скв. 128 (осадок с фильтра)	3,96	37,00	37,95	35,57	2,38	0,28	0,12	2,38
Киевская ГЭС, водопонизительная скв. 20	18,02	25,35	58,22	47,44	10,78	0,66	0,03	0,09
Волжская ГЭС, водопонизительные скважины котлована	13,73	23,8	63,47	52,04	11,43	2,71	0,43	0,46
Водозабор Дзержинска, скв. 5	19,67	27,97	55,42	45,94	9,48	0,26	0,09	0,05
Водозабор Воронежа, осадок с сетчатого фильтра скважины	2,29	60,00	26,00	24,48	1,52	3,27	0,31	1,81
Водозабор «Балтэзерс» Риги, скв. 23	7,31	1,54	82,40	80,64	11,76	0,40	0,06	0,75
Замоскворецкий вертикальный дренаж, скв. 10	0,99	88,25	7,71	6,22	1,49	0,75	0,12	0,08

Рассмотрим зарастание фильтров осадками на примерах, взятых из практики буровых работ.

На рис. 91 показан сетчатый фильтр, извлеченный из скважины, которая эксплуатирует аллювиальные воды Волго-Окского водораздела в районе г. Дзержинска Горьковской области. Фильтр простоял в скважине около 8 лет, и в конце этого срока скважина оказалась практически безводной. Осадки на внутренней поверхности фильтра полностью закрыли проходные отверстия трубчатого каркаса, и поэтому без очистки фильтра механическими средствами нельзя судить ни о форме отверстий, ни о состоянии самого каркаса.

На рис. 92 представлен участок фильтра, простоявшего в скважине около 3 лет. С поверхности фильтра сетка снята. Часть проходных отверстий очищена от осадка. Зарастание отверстий, как видно из рисунка, начинается с накопления осадков на глухих участках трубы. Рыхлая губчатая структура этих отложений способствует наращиванию хлопьеобразных частиц гидроокиси железа, кремнекислоты и других отложений по периметру

проходных отверстий, вследствие чего постепенно сокращается их размер.

При устройстве фильтров на трубчатых каркасах с водоприемной поверхностью из сеток, штампованного листа или проволочных спиралей для лучшего дренирования устанавливают подкладочную проволоку (стальную, медную, винипластовую, из резинового шнура) толщиной 3—5 мм, разобщающую водоприемную поверхность и опорный каркас.

При извлечении фильтров и снятии водоприемных поверхностей установлено, что все пространство между отверстиями опорного каркаса заполнено осадками, преимущественно гидроокислами железа, которые образуются вследствие выпадания их из воды и коррозионного разрушения каркасов. На рис. 93 представлены образцы фильтров, у которых опорный каркас состоял из стальной и чугунной труб. На обеих иллюстрациях часть проходных отверстий очищена от осадка. Аналогичная картина наблюдается и у фильтров с трубчатыми каркасами и водоприемной поверхностью из проволоки нержавеющей стали.



Рис. 91. Отложение осадков на внутренней поверхности сетчатого фильтра



Рис. 92. Зарастание проходных отверстий опорного каркаса сетчатого фильтра

При осмотре фильтров, извлеченных из скважин после продолжительной эксплуатации, установлено, что в фильтрах с двумя водоприемными поверхностями наблюдается большее накопление химических осадков. В конструкциях без дополнительной водоприемной поверхности осадков выпадает меньше и, следовательно, такие фильтры предпочтительнее.

Следующий элемент фильтра, на котором выпадают осадки, — внешняя поверхность. При установке фильтров с водоприемной поверхностью из сетки и наложении частиц породы, в частности песка, наблюдается резкое сокращение скважности за счет механи-

ческого заклинивания проходных отверстий на сетке, дополняемого выпадением осадков из воды. По этим причинам, даже при относительно небольшой толщине зоны кольматации, измеряемой несколькими миллиметрами, резко возрастают входные сопроти-

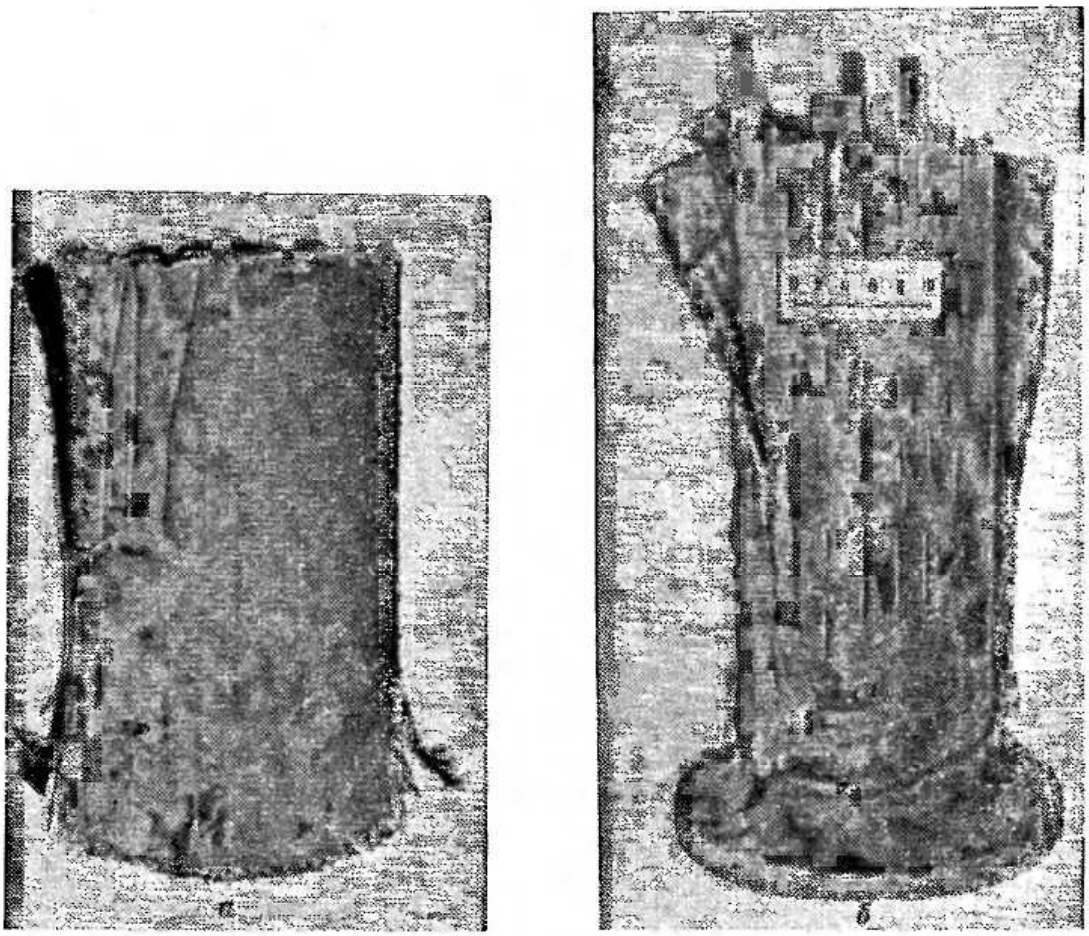


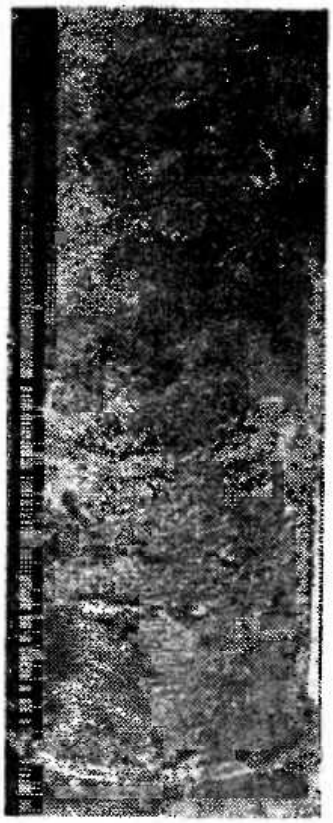
Рис. 93. Отложение осадков под сеткой:
а — на опорном каркасе из стальной трубы, *б* — на щелевом каркасе из чугунных труб

вления, в результате чего снижается водоприемная способность фильтров.

На рис. 94 показаны сетчатые фильтры, извлеченные из водозаборных скважин в Дзержинске спустя 3 года после начала эксплуатации и из скважин Замоскворецкого дренажа после 15 лет эксплуатации.

В практике работ по замене фильтров после продолжительной эксплуатации было обнаружено, что стволы скважин после извлечения фильтров не обрушаются и глубина их с незакрепленными стенками не изменяется. Это наблюдалось в районах, где подземные воды содержат в большом количестве железо. Такие наблюдения позволили прийти к выводу, что в процессе эксплуатации происходит отложение солей и кольматация не только фильтров, но и прилегающих к ним пород.

Безуспешная замена фильтров в стволах старых скважин при повторном бурении подробно была рассмотрена в [34]. Эта работа позволила прийти к выводу, что в ряде районов новые скважины следует закладывать на некотором расстоянии от старых, чтобы избежать попадания в зону закольматированных пород.



В настоящее время в технике еще не разработаны методы, позволяющие определять размеры зон кольматации водоносных пород за пределами фильтров. По этим причинам единственным способом установления зоны кольматации вокруг фильтров являются горные выработки. Производство таких работ сопряжено с большими техническими трудностями и в гидрогеологической литературе приведены ограниченные сведения по строению прифильтровых зон, вскрытых горными выработками.

В процессе изучения причин снижения дебита скважин, эксплуатирующих подземные воды из аллювиальных отложений долины Волги в районе строительства Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС, впервые

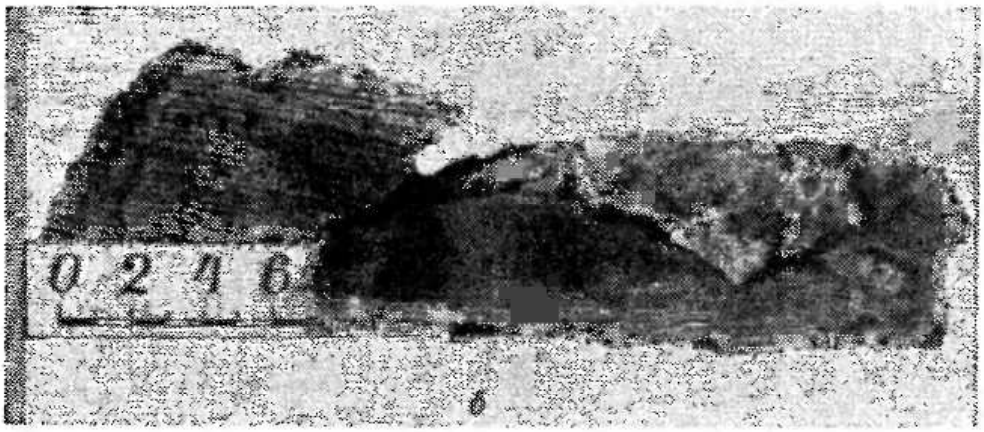


Рис. 94. Отложение осадков на внешней поверхности сетчатого фильтра:
а — через 3 года эксплуатации, *б* — через 15 лет эксплуатации

представилась возможность наблюдать развитие зон цементации на участке глубокого водопонижения [34].

При разборке перемычки, отделяющей котлован ГЭС от водосливной плотины, в 1957—1958 гг., а также в теле низовой перемычки перед затоплением котлованов было обнажено несколько

скважин. В процессе эксплуатации водопонизительных скважин было замечено обрастание осадками (в основном гидроокисью железа) водоприемных решеток насосов, валов и напорных труб насосов АТН в короткие сроки (5—6 мес). Естественно, что осадки не могли откладываться только на водоподъемных устройствах; они образовывались как на фильтрах, так и в зоне, прилегающей к ним.

Вода этих аллювиальных отложений гидрокарбонатно-кальциевого типа со следующими компонентами: сухой остаток 350 мг/л;

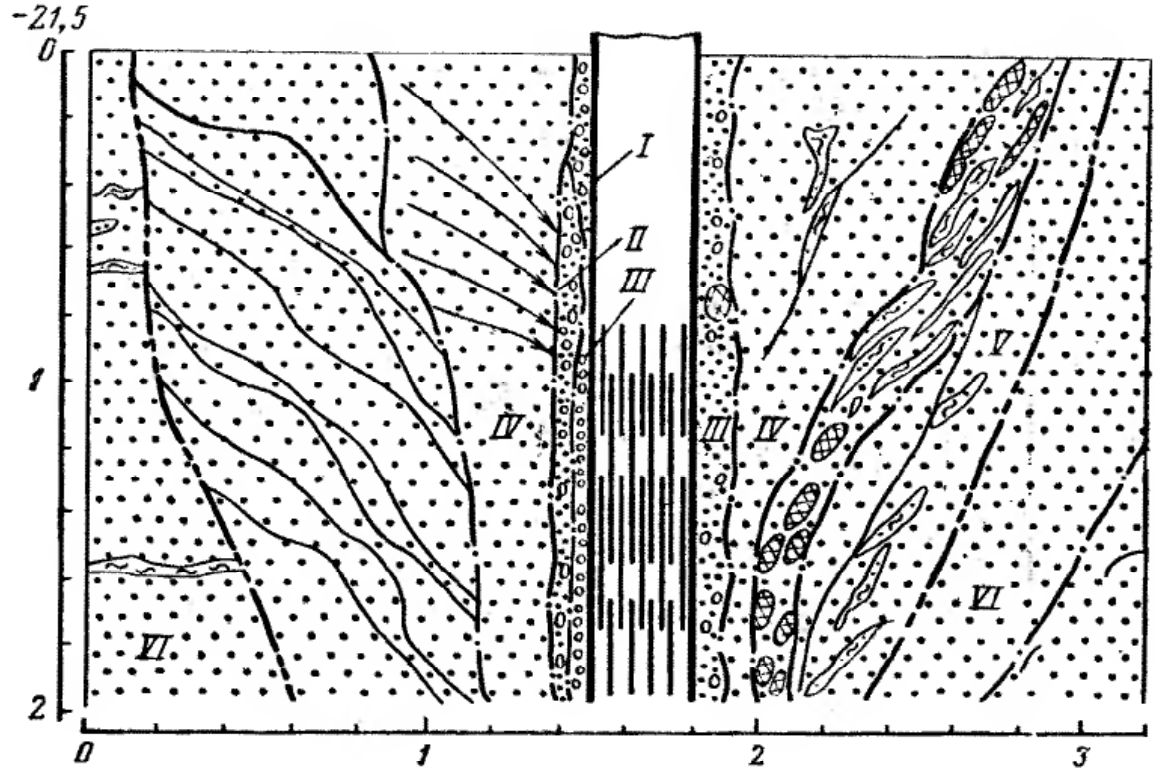


Рис. 95. Зона отложений осадков в породе в верхней части дренажной скв. 295 (по К. А. Бобкову):

I, II, III, IV — зоны отложений железа по степени прочности и ожелезнению; *V* — пески с нарушенной структурой; *VI* — пески в натурном залегании

pH = 7 ÷ 7,2; Fe = 5 ÷ 10 мг/л; CO_2 = 10 ÷ 35 мг/л; Cl = = 30 мг/л. В момент откачки вода прозрачная; в последующие 1—2 ч стояния на воздухе опалесцирует и через 1 сут на дно сосуда выпадает бурый осадок гидроокиси железа.

На участке раздельной перемычки в скв. 295 и 291 (пробуренных на глубину 25 м и оборудованных фильтрами длиной 10 м) фильтры были вскрыты шурфами в верхней рабочей части на высоту около 2 м. Как следует из зарисовок гидрогеолога К. А. Бобкова, зона цементации захватывает здесь внутреннюю и внешнюю поверхности фильтров, гравийные обсыпки и породы в радиусе до 1 м от скважины (рис. 95). По мере заглубления фильтра в породы на участках, где режим эксплуатации более постоянный, без обнажения рабочей части фильтра мощность зоны цементации

уменьшается и в некоторых скважинах достигает 15—20 см. При горизонтальных срезах породы вокруг фильтров в строении зон цементации можно заметить асимметричность, которая объясняется условиями водопритока.

Так как при работе водопонизительных скважин имеется большой приток со стороны Волги, мощность отложений с этой стороны наибольшая. В этих случаях в поперечном разрезе, перпендикулярном к оси скважины, зона цементации представляется в плане в виде эллипса, большая полуось которого имеет направление, совпадающее с движением потока со стороны верхнего бьефа.

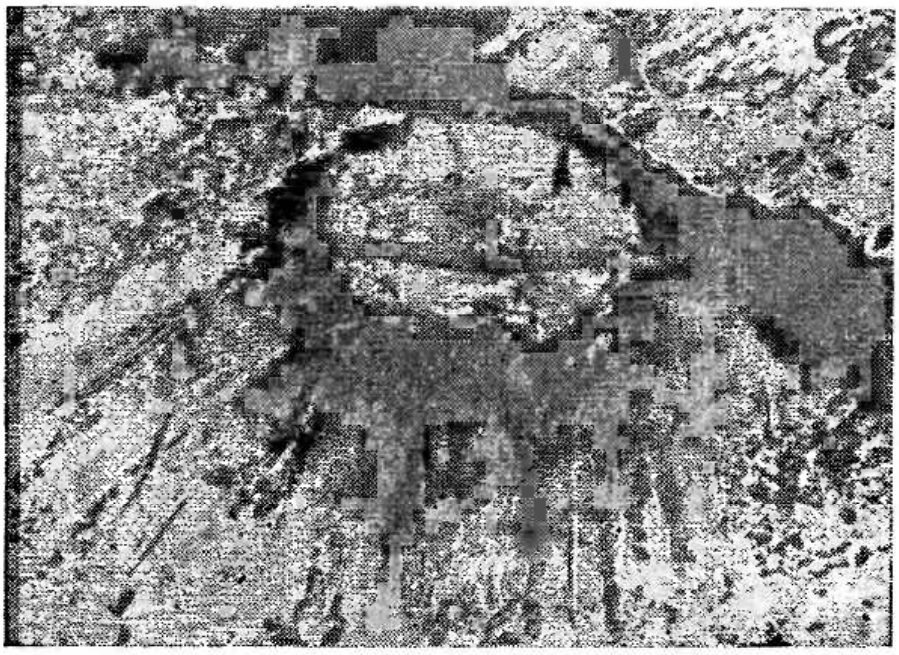


Рис. 96. Строение зоны сцементированных отложений скв. 75 в породе на глубине 25 м (в плане)

За контуром эллипса целостность зоны цементации исчезает, здесь наблюдается цементация пород, совпадающая с радиальным движением потока (рис. 96). Природа лучевой цементации пока недостаточно выяснена, но можно предположить, что она возникает или в результате неравномерного зарастания фильтра во времени (когда на его поверхности остаются участки с большей водопропускной способностью), или вследствие наличия отдельных линз песков с большей водопропускной способностью, в которых отлагается и большее количество осадков.

Вскрытие скважин горными выработками показало, что зона солевых накоплений наблюдается на глухих соединительных участках фильтров и на надфильтровых трубах. Здесь гидроокись железа, образующаяся на поверхности стальных труб, проникает в породы или обсыпки на глубину 2—3 см и как бы цементирует их с породами. Этим, в частности, объясняется тот факт, что при извлечении колонны труб и фильтров, простоявших в скважинах

в течение нескольких лет, требуется применять домкраты и вибраторы с усилиями 100—300 тс. Однако в практике известны случаи, что и при этих усилиях трубы не извлекаются и происходит их обрыв.

Из сказанного выше вытекает, что в работающих скважинах зона отложения солей разрастается и к продуктам разрушения металлической колонны прибавляются солевые осадки, выпадающие из природных вод. Следовательно, величина зоны цементации является переменной и зависит от количества отбираемой воды, условий водопритока и времени.

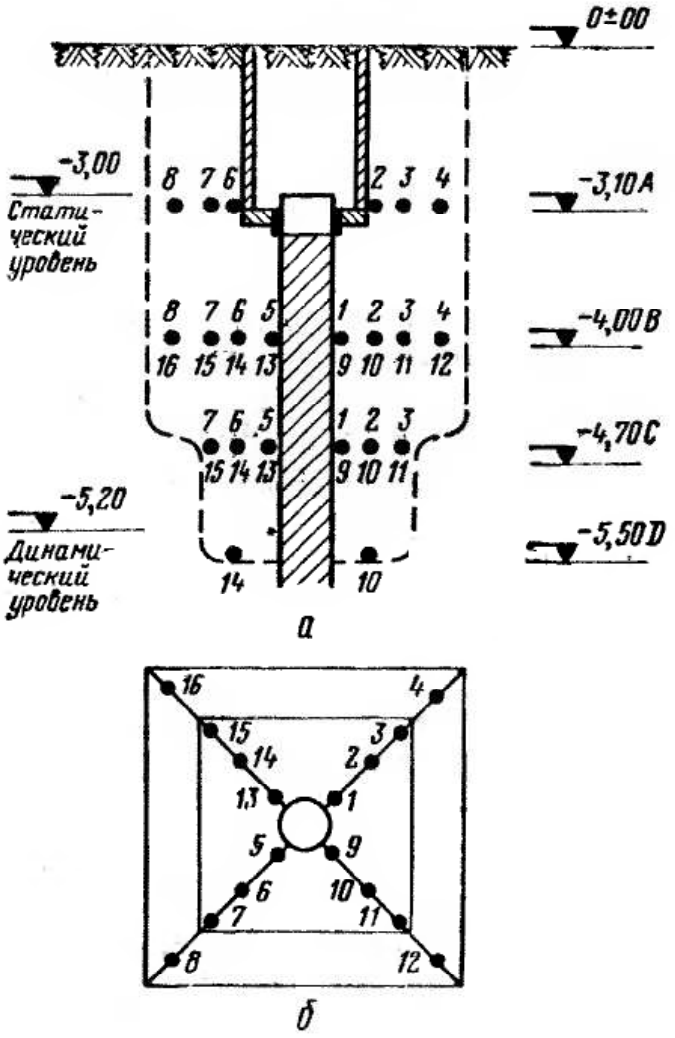


Рис. 97. Схема вскрытия фильтра шахтной выработкой для определения химического состава отложений:
а — разрез, *б* — план

Таблица 65

Химический состав осадков, отобранных по высоте фильтра

Состав осадков	Средние значения состава осадков по глубине							
	A		*B*		*C*			*D*
	г	%	г	%	г	%	г	%
Fe_2O_3	8,65	55,2	8,82	53,8	10,11	59,2	6,55	52,8
Al_2O_3	4,98	31,8	5,31	34,2	5,00	29,1	3,58	29,2
CaO	1,85	11,8	2,11	12,85	1,65	9,6	2,09	16,9
Нерастворимый остаток	0,2	1,22	0,17	1,06	0,36	2,1	0,14	1,13
Общая масса образца	15,68	—	16,41	—	17,12	—	12,36	—

В [115] описан случай вскрытия фильтра эксплуатационной скважины, проработавшей несколько лет при сифонном водоотборе. В начальный период эксплуатации дебит составлял

800 л/мин, а в период исследований снизился до 50 л/мин. Вскрытие скважины на глубину 5,5 м осуществлялось шахтой размером 3 × 3 м. По мере углубления шахты отбирали пробы на химический анализ.

Схема вскрытия скважины показана на рис. 97, а данные о составе кольматанта приведены в табл. 65.

Из таблицы следует, что в осадках преобладают соединения железа и их состав по высоте существенно не изменяется.

Опыт эксплуатации скважин показывает, что зоны цементации образуются также и в скважинах, забирающих воду из напорных водоносных горизонтов, когда снижение уровня воды сравнительно мало по отношению к общему столбу воды в скважине. Фильтры таких скважин не вскрывали, но есть основания предполагать, что и здесь будут сохраняться общие закономерности, установленные для закупорки фильтров в безнапорных водах (за исключением влияния фактора аэрации в зоне депрессионных поверхностей).

Следует также предположить, что при перекрытии фильтром слоистой толщи водовмещающих пород наибольшее количество осадков будет отлагаться в породах большей крупности и, следовательно, наибольшей водопроводимости. Таким образом, фильтры необходимо устанавливать в скважины, в которых после извлечения старых фильтров грунт разрушен, разрыхлен и удален в пределах предполагаемой установки фильтра.

§ 24. ПРОГНОЗ КОЛЬМАТАЖА СКВАЖИН И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СРОКОВ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ

Многолетний опыт эксплуатации водозаборов подземных вод из систем скважин и вертикальных дренажей показывает, что дебит их существенно уменьшается во времени в связи с развитием кольматажа фильтров и призабойных зон. Поэтому необходимо прогнозировать интенсивность этого процесса, чтобы проектировать профилактические методы восстановления производительности водозаборов или перебуривание скважин.

Результаты исследования строения призабойных зон и фильтров скважин, находящихся в эксплуатации [36], а также характеристика основных физико-химических процессов, определяющих течение и интенсивность химического кольматажа [1, 2], позволяют заключить, что в общем случае процесс оказывается зависящим от многочисленных факторов: химического состава подземных вод, химического и гранулометрического состава водоносных пород (гравийных обсыпок), наличия железобактерий и водорослей, конструкции водоприемной части скважины, ее производительности, коагуляции коллоидных растворов и различных видов сорбции растворенных в воде солей, типа водоподъемного оборудования, режима эксплуатации и др.

Такое многообразие факторов не может быть учтено при аналитическом решении задачи об интенсивности процесса химического кольматажа в различных гидрогеологических условиях. Поэтому более предпочтительным является анализ кольматажа. На основе данных о химическом составе подземных вод и развитии железобактерий и водорослей следует прогнозировать возможность кольматажа [1], а затем интенсивность процесса рассматривать путем анализа изменения гидравлических характеристик фильтров и прифильтровых зон, которые закономерно предположить идентичными.

Накопление кольматирующих веществ приводит к снижению скважности фильтров и пористости пород (гравийной обсыпки) в прифильтровой зоне. Следовательно, изменение сопротивления фильтра и прифильтровой зоны может быть объяснено на основе гидравлических исследований фильтров. Действительно, при скважности фильтра $> 20\%$ приращение суммарной площади отверстий несущественно влияет на повышение расхода скважины, причем зависимость изменения сопротивления фильтра с увеличением скважности описывается экспоненциальной или показательной функцией с отрицательным показателем степени.

Изменение проницаемости пород в прифильтровой зоне скважины и радиуса зоны с уменьшенной проницаемостью имеет аналогичное влияние на производительность скважины.

Процесс кольматажа фильтров и прифильтровых зон скважин, представляющий собой постепенное и в разной степени интенсивное отложение кольматирующих соединений, характеризуется уменьшением скважности фильтра и пористости пород в прифильтровой зоне, а также коэффициента фильтрации. Следовательно, теоретически характер изменения гидравлического сопротивления может быть выявлен на основе анализа влияния скважности фильтра и изменения проницаемости пород на приток к скважине.

§ 25. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТЫХ СРЕД ОТ НАСЫЩЕННОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КОЛЬМАТАНТОМ

В общем случае имеется однозначная зависимость между степенью насыщения порового пространства кольматантом и изменением проницаемости пористых сред. Поскольку оказывается удобным решение задачи о характере изменения насыщенности порового пространства во времени, для разработки рекомендаций по прогнозу работы скважин в условиях кольматажа необходимо совместно решить уравнения, описывающие закономерности изменения насыщенности пористых сред во времени, и уравнения, связывающие насыщенность порового пространства и его проницаемость.

Известно, что рост гидравлического сопротивления в начальной стадии (когда кольматирующие частицы осаждаются в чистом фильтре) очень незначителен и процесс фильтрации может

считаться стационарным. На этой стадии фильтрации структурные изменения пористой среды невелики и их влияние можно не учитывать. По мере отложения осадка в порах зернистой среды наблюдается заметное увеличение гидравлического сопротивления.

Так как эти структурные изменения (деформации пористой среды) вызываются отложением осадка в порах и на поверхности зерен, изменение фильтрационных свойств пористой среды должно определяться количеством солей, которое отложится в порах.

Обычно степень кольматации характеризуют насыщенностью порового пространства осадком

$$a = \frac{(n_0 - n)}{n_0}, \qquad \text{(III.15)}$$

где n_0 — начальная пористость среды; n — текущая пористость.

В свою очередь, проницаемость связана с изменением пористости. Имеется ряд экспериментальных и теоретических зависимостей, устанавливающих связь величины проницаемости со степенью насыщения порового пространства кольматантом. Теоретические соотношения получены на основе построения условно заданной геометрической структуры пористой среды. Сопоставим эти соотношения с экспериментальными для выбора наиболее характерной закономерности изменения проницаемости пористой среды от ее насыщенности.

Таблица 66

Теоретические зависимости проницаемости пористой среды от ее насыщенности

Тип модели	$k/k_0 = f_0(n_0, n)$	$k/k_0 = f(n_0, a)$
Капиллярная	$\left(\frac{n}{n_0}\right)^2$	$(1-a)^2$
Из сферических пор	$\left(\frac{n}{n_0}\right)^{5/3}$	$(1-a)^{5/3}$
Из пор, образуемых системой стержней	$\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \left(\frac{1-n_0}{1-n}\right)^{1/2}$	$(1-a)^3 \left(\frac{1-n_0}{1-n_0(1-a)}\right)^{1/2}$
Из пор, образуемых сферическими зернами	$\left(\frac{n}{n_0}\right)\left(\frac{1-n_0}{1-n}\right)^{2/3}$	$(1-a)^3 \left(\frac{1-n_0}{1-n_0(1-a)}\right)^{2/3}$

В табл. 66 приведены основные теоретические зависимости проницаемости от a [50], которые получены с использованием фундаментального уравнения Козени — Кармана [56],

$$k/k_0 = (w_0/w)^2 (m/m_0), \qquad \text{(III.16)}$$

где k_0 и k — начальная и текущая проницаемости среды; w_0 и w — начальная и текущая площади поверхности зерен.

Таким образом, отношение проницаемостей в любом сечении определяется как функция начальной пористости и насыщенности порового пространства.

Среди экспериментальных зависимостей наиболее известны формулы Ю. М. Шехтмана [94]

$$k/k_0 = (1 - \sqrt{a})^3 \qquad \text{(III.17)}$$

и В. Мацкрле

$$k/k_0 = (1 - a). \qquad \text{(III.18)}$$

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования были проведены Д. М. Минцем [61], который, пренебрегая в формуле (III.16) изменением поверхности зерен, получил зависимость для соотношения проницаемости в следующем виде:

$$k/k_0 = (n/n_0)^3. \qquad \text{(III.19)}$$

С учетом уравнения (III.16) зависимость (III.19) записывается в виде

$$k/k_0 = (1 - a)^3. \qquad \text{(III.20)}$$

Выражение (III.20) хорошо согласуется с теоретическими формулами и неоднократно подтверждалось экспериментально [62].

До настоящего времени еще не разработана методика непосредственного определения насыщенности без нарушения структуры, поэтому и полученные зависимости дают сильно разнящиеся результаты (рис. 98).

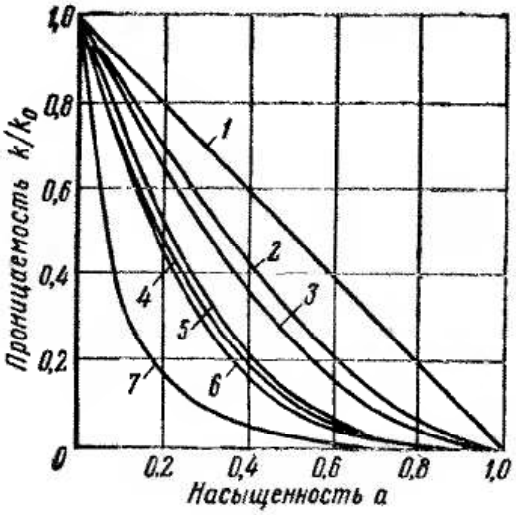


Рис. 98. Графики изменения проницаемости пористых сред от насыщенности порового пространства кольматантом:

1 — по Мацкрле; *2* — по Стейну и Кемпу; *3* — по Леклеру и Герцигу; *4* — по Минцу; *5* — по Леклеру и Герцигу; *6* — по Маруду; *7* — по Шехтману

Учитывая, что Д. М. Минцем [62] применена наиболее совершенная методика оценки степени насыщенности порового пространства, формулу (III.20) можно считать наиболее правомерной и ее предпочтительнее использовать при расчетах изменения проницаемости зернистых материалов в процессе кольматажа.

Следовательно, при установленной связи проницаемости пористой среды с насыщенностью ее порового пространства кольматантом возможна оценка степени закольматированности фильтра скважины и определение необходимого количества реагента для восстановления ее производительности. Однако при определении рациональных межремонтных сроков также важно получение критериев, позволяющих оценить необходимость восстановительных работ. Наиболее просто анализ изменения производительности скважин во времени и определение межремонтного периода на данном водозаборе или дренаже выполняется на основе гидравлических исследований.

§ 26. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ КОЛЬМАТАЖА СКВАЖИН

При гидравлическом прогнозе изменения производительности скважин эффективным является анализ графиков изменения удельных дебитов скважин (при неизменных граничных условиях на контуре пласта и водозабора) либо проницаемости фильтра и прифильтровой зоны.

Для анализа изменения удельного дебита скважин Н. Д. Бессоновым предложено аппроксимировать опытные данные экспоненциальной функцией времени [34]

$$q_t = q_0 e^{-\beta t}, \qquad \text{(III.21)}$$

где q_t — удельный дебит скважины в рассматриваемый момент времени t; q_0 — начальный удельный дебит скважины; β — коэффициент «старения» скважины.

Исследования ВНИИ ВОДГЕО показывают, что опытные данные аппроксимируются экспоненциальной функцией не сразу после включения скважин в работу, а имеется некоторый период запаздывания в наступлении этой зависимости во времени. Это связано с охарактеризованными выше закономерностями влияния проницаемости призабойной зоны скважины (сопротивления фильтра) на приток к ней.

Для получения параметра, характеризующего интенсивность старения скважин, опытные данные целесообразно аппроксимировать графиком зависимости

$$q_t/q_0 = e^{-\beta t}.$$

При обработке данных об изменении удельных дебитов можно использовать следующий прием:

1) построить графики зависимости q_t/q_0 и определить время сохранения удельного дебита скважин практически постоянным;

2) аппроксимировать экспоненциальной функцией опытные данные по удельным дебитам скважин после перегиба и определить параметр β.

Таким образом, в качестве критериев сравнения интенсивности изменения сопротивлений фильтров и прифильтровых зон скважин может рассматриваться β и время запаздывания, определенное графически по опытным данным в координатах $\ln q_t/q_0 \div t$. Кроме того, критерием необходимости восстановления производительности скважин является время запаздывания.

Детальные исследования были проведены ВНИИ ВОДГЕО на Горьковском стационаре, где изучалась работа различных конструкций фильтров. Графики изменения $\ln q_t/q_0$ от t приведены на рис. 99 (где q_{tn} соответствует удельному дебиту скважины в точке перегиба). С использованием этих графиков и аналогичного анализа по другим опытным участкам рассчитаны параметры кольматажа скважин, представленные в табл. 67. Опытные данные свидетельствуют о существенно отличных параметрах кольматажа

скважин в идентичных гидрогеологических условиях и при одинаковом производстве работ по бурению и освоению скважин.

Таблица 67

Данные по параметрам кольматажа скважин Горьковского стационара

Номер опытного участка	№ скважины	Кострукция фильтра	Время запаздывания t_n^*	q_0	Коэффициент старения $-\beta \cdot 10^{-2}$
I опытный участок	2	Гравийный с водоприемной поверхностью из штампованного листа	9,5	3,23	4,0
	11		7,1	3,20	4,0
	3	Кожуховый с кожухом из просечного листа	11,2	3,41	4,5
	7		7,9	3,66	3,0
	4	Гравитационный конструкции МГМИ со щелями в горизонтальной плоскости	10,0	4,30	2,0
	5		9,5	4,35	1,0
	6	Каркасно-стержневой с гравийной обсыпкой	10,0	4,5	1,5
	10		6,8	3,6	2,0
	1	Блочный на клее БФ-4 из гравия диаметром 2—3 мм на трубчатом каркасе	9,8	2,65	6,5
	12	Блочный на клее БФ-4 из гравия диаметром 1—2 мм на стержневом каркасе	3,5	1,9	4,7
	8	Керамический на стержневом каркасе	7,4	1,84	2,5
	9		5,5	2,36	4,7
II опытный участок	1щ	Мягкопоролоновый	6,3	2,91	3,0
	2щ	»	5,8	3,76	3,0
	3щ	Жесткопоролоновый	4,0	2,24	6,0
	4щ	»	7,6	0,99	5,0
	9щ	»	7,6	1,95	10,0
	5щ	Керамический бескаркасный диаметром 168 мм	3,0	1,21	6,0
	7щ	Тарельчатый	8,5	2,43	6,0

Максимальное время запаздывания t_n^* характерно для скважин, оборудованных каркасно-стержневыми фильтрами и фильтрами МГМИ. Эти же скважины имеют максимальное q_0 (характеристика общего большого водоотбора при равном эксплуатационном понижении уровня в скважине) и минимальные значения β, свидетельствующие о наименьшей интенсивности изменения удельного дебита в связи с кольматажом.

Для фильтров блочного типа значения t_n^*, q_0 и β на I и II опытных участках довольно близки, т. е. оказывается, что как начальное сопротивление фильтров, так и скорость его изменения, а также скорость снижения удельных дебитов скважин с этими фильтрами практически одинаковы. Удельные дебиты скважин

этой группы и q_0 в 2—3 раза меньше, чем у скважин с гравийными фильтрами, а значения β — в 2—3 раза больше, что свидетельствует о большей интенсивности изменения сопротивлений.

Анализ приведенных данных показывает, что время запаздывания t_n^* в интенсивном изменении удельного дебита (сопротивления) скважин Горьковского дренажа колеблется в широких пределах — от 3,0 до 11,2 мес, причем для скважин с одинаковыми конструкциями фильтров оно довольно близко. Очевидно, что в условиях какого-либо конкретного водозабора или вертикального дренажа при одинаковых конструкциях фильтров t_n^* может быть установлено по разведочно-эксплуатационным скважинам,

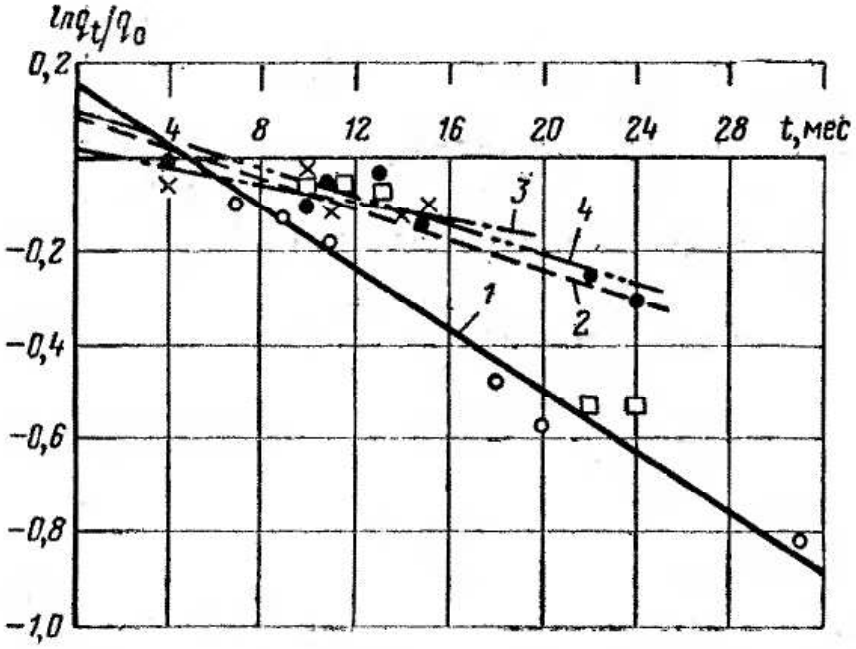


Рис. 99. Графики изменения гидравлического сопротивления скважин в процессе кольматажа:
1 — скв. 7, $\beta_1 = -0{,}03$; *2* — скв. 4, $\beta_2 = -0{,}02$; *3* — скв.5, $\beta_3 = -0{,}01$; *4* — скв. 6, $\beta_4 = -0{,}015$

либо в начальный период эксплуатации водозабора (дренажа) и принято как рациональный период их профилактической регенерации.

По скважинам Ульяновского вертикального дренажа по рассматриваемой методике также были рассчитаны параметры кольматажа. По 17 скважинам, оборудованным фильтрами блочного типа из пористой керамики, $t_n^* = 1{,}8 \div 9{,}1$ мес, а $\beta = 0{,}425 \div 0{,}446$, т. е. колебалась в незначительных пределах и очень близка к параметрам кольматажа скважин Горьковского дренажа.

При применении гравийных фильтров время запаздывания в наступлении периода интенсивного снижения удельного дебита возрастает до 13 мес, составляя в среднем 8 мес. Величина β колеблется в пределах от $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ до $2{,}6 \cdot 10^{-2}$ (данные по 22 скважинам, оборудованным каркасно-стержневыми фильтрами).

На Каменском вертикальном дренаже время запаздывания изменяется в пределах от 7 до 21 мес (в среднем 12 мес), а на Знаменском вертикальном дренаже от 4 до 22 мес (в среднем 11 мес). Указанные опытные данные характеризуют снижение производительности скважин на 28 опытных кустах.

Следовательно, в большинстве случаев интенсивное влияние удельных дебитов скважин начинается через 1 год ее эксплуатации. Поскольку интенсивность этого процесса в начальной стадии невелика, вероятно, в качестве рационального межремонтного цикла восстановления производительности скважин можно принять период, равный 1,5—2 годам.

Однако в каждом случае величина межремонтного периода должна корректироваться наблюдениями за ходом снижения удельных дебитов или возрастания величины сопротивления с определением времени запаздывания по рассматриваемой методике.

§ 27. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ КОЛЬМАТАЖА СКВАЖИН

Процесс кольматажа может быть описан системой уравнений [22, 23], одно из которых выражает закон сохранения количества вещества, а другое определяет интенсивность процесса. В случае осесимметричной фильтрации уравнение баланса имеет вид

$$\frac{(1-\varepsilon)}{qn_0}\frac{\partial \bar{a}}{\partial \tau}+\frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r}=0, \qquad \text{(III.22)}$$

где ε — пористость осевших частиц; $\bar{a}$ — удельный объем поровых отложений ($n - n_0$); C — средняя концентрация частиц в единице объема жидкости; $q = Q/2\pi m$ (Q — дебит скважины, m — мощность водоносного пласта); r — расстояние от скважины; $\tau = t - (R_n^2 - r^2)/2q$ (t — время, отсчитываемое от начала процесса, R_n — расстояние до границы пласта).

Следуя Д. М. Минцу, будем рассматривать процесс кольматажа как суммарный результат двух явлений:

1) изъятия частиц вещества из фильтрующейся жидкости и отложения их на поверхности зерен;

2) обратного поступления вещества в протекающую жидкость. Тогда наиболее общее уравнение кинетики записывается в виде [6]

$$\frac{\partial \bar{a}}{\partial t}=\gamma\left[N_0-\bar{a}\right]C-\beta\bar{a}, \qquad \text{(III.23)}$$

где γ — коэффициент кольматации; N_0 — предельное значение удельного объема поровых отложений; β — коэффициент, учитывающий отрыв частиц.

При $\beta = 0$ происходит чисто кольматационный эффект и уравнение (III.23) становится аналогичным, ранее предложенному Ю. М. Шехтманом [94]

$$\frac{\partial \bar{a}}{\partial t} = \gamma [N_0 - \bar{a}] C. \qquad \text{(III.24)}$$

Величина γ (коэффициент кольматации) отражает влияние скорости фильтрации, структурных характеристик пористой среды, условий взаимодействия частиц кольматанта с зернами среды. В общем случае γ можно считать обобщенным параметром, характеризующим процесс, и определять по следующему уравнению

$$\gamma = Av^x/d_0^y, \qquad \text{(III.25)}$$

где A — некоторая константа; v — скорость фильтрации; d_0 — размер зерен пористой среды; x и y — показатели степени, соответственно равные 1 и 2.

Соотношения (III.22), (III.23) и (III.24) представляют общую систему уравнений, описывающих процесс кольматажа. Условия для ее решения можно принять в виде:

$$\bar{a}(r, 0) = 0 \qquad \text{при } \tau = 0; \qquad \text{(III.26)}$$

$$C(r, 0) = 0 \qquad \text{при } \tau = 0; \qquad \text{(III.27)}$$

$$C(r, \tau) = C_0 \qquad \text{при } \tau = R_n. \qquad \text{(III.28)}$$

Поскольку коэффициент кольматации зависит от скорости фильтрации, на расстояниях, значительно удаленных от скважины, ввиду радиальности течения он является величиной малой. Следовательно, и отложения осадков там практически не должно быть. По мере приближения к скважине скорости возрастают, и в связи с этим небольшое количество осадков отлагается в прифильтровой зоне скважин. Поскольку при откачке воды нарушение химического равновесия в подземных водах наиболее сильно проявляется вблизи скважин, граница зоны кольматажа может быть отнесена без большой ошибки к границе нарушения химического равновесия.

В работе [51] было показано, что решение системы уравнений (III.22), (III.23) и (III.24) при условиях (III.26), (III.27) и (III.28) имеет вид

$$\frac{C(r, \tau)}{C_0} = \frac{R_n}{r} \frac{\exp(C_0\gamma\tau)}{\exp(C_0\gamma\tau) - 1 + \exp\{-[w(R_n) - w(r)]\}}; \qquad \text{(III.29)}$$

$$\frac{\bar{a}(r, \tau)}{N_0} = \frac{\exp(C_0\gamma\tau) - 1}{\exp(C_0\gamma\tau) - 1 + \exp\{-[w(R_n) - w(r)]\}};$$

$$\gamma = \frac{A}{d_0^y R_n^x}.$$

Значения $[w(R_n) - w(r)]$ для различных аппроксимаций функций $\ln (N_0 - \bar{a})/\bar{a}$ приведены в табл. 68.

Таблица 68

Значения $[w(R_n) - w(r)]$ в уравнении (III.29)

Аппроксимация функции $\ln \frac{N_0 - \bar{a}}{\bar{a}}$	$[w(R_n) - w(r)]$
$\approx -\frac{\bar{a}}{N_0}$	$\frac{AN_0(1-\varepsilon)}{d_0^y n_0}(R_n - r) + \ln \frac{R_n}{r}$
≈ 0 при $\bar{a} \ll N_0$	$\frac{AN_0(1-\varepsilon)}{d_0^y n_0}(R_n - r)$

Система приведенных уравнений определяет баланс изменения веществ, находящихся в жидкости и отложившихся в порах и на зернах среды, и дает возможность оценить насыщенность порового пространства в любой момент времени на любом расстоянии от скважины.

Понижение уровня воды в скважине, работающей с постоянным расходом, определяется уравнением

$$S(r, \tau) = \frac{Q}{2\pi m} \int_{R_\Phi}^{R_n} \frac{dr}{rk(r,\tau)}. \qquad \text{(III.30)}$$

Таким образом, даже в условиях жесткого режима фильтрация является неустановившейся, поскольку при $Q = \text{const}$ понижение уровня в скважине вследствие кольматажа является функцией времени. Величина $k(r, \tau)$, входящая в уравнение (III.30), может быть определена из выражения (III.20) с учетом $\bar{a}(r, \tau)$ по (III. 29). Удельный объем поровых отложений связан с насыщенностью пор осадком следующим соотношением

$$a = \bar{a}/n_0.$$

Для вычисления интеграла в уравнении (III.30) была составлена программа для ЭЦВМ-М-22. Величина интеграла получена для различных значений $AN_0(1 - \varepsilon)/d_0^y n_0$ по безразмерному параметру $C_0\gamma\tau$.

Рост сопротивления $S(r, \tau)$ зависит от концентрации C_0 кольматирующих соединений в жидкости, коэффициента кольматации γ, а следовательно, от скорости фильтрации (дебита

скважины) и структуры пород в прифильтровой зоне. В расчетах принималось, что $N_0 = n_0$. Отметим, что при $N_0/n_0 \approx 0{,}5$ интенсивность роста сопротивления замедляется, а при $N_0/n_0 \approx$ $\approx 0{,}1 \div 0{,}2$ кольматаж вообще не сказывается на работе скважин.

Полученное аналитическое решение уравнения (III.29) дает возможность оценить степень насыщения порового пространства кольматантом. Однако определение параметров химического кольматажа возможно лишь с использованием ЭЦВМ. Поэтому при практических расчетах более целесообразно пользоваться упрощенными соотношениями, основанными на некоторых допущениях применительно к объекту исследований.

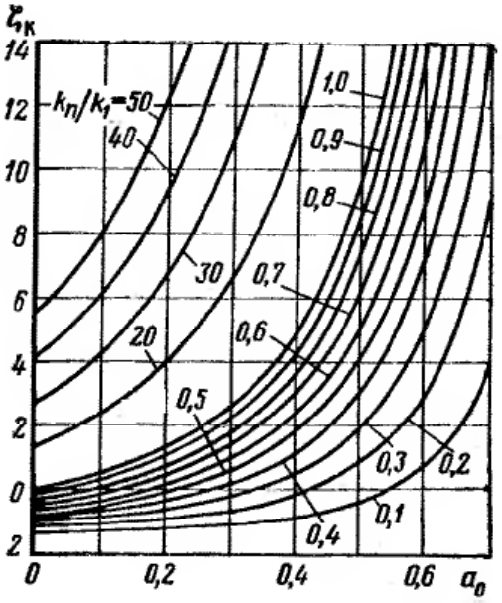


Рис. 100. Графики изменения сопротивления скважины, обусловленного кольматажом, в зависимости от соотношения, проницаемостей пласта и фильтра.

Одним из таких допущений является предположение о том, что скорость отложения кольматирующих соединений велика ($\gamma \to \infty$) и в зоне кольматажа концентрации веществ в жидкости изменяются скачкообразно [6, 23]. В этом случае рост дополнительного сопротивления, обусловленного кольматажом, описывается уравнением

$$S_к = \left[\frac{k'_п}{k'_0} - 1\right] \ln \frac{R(t)}{R_ф}, \quad \text{(III.31)}$$

где $k'_п$ — коэффициент фильтрации в зоне кольматажа; k'_0 — коэффициент фильтрации пласта; $R(t)$ — радиус зоны кольматажа, увеличивающийся во времени,

$$R(t) = \sqrt{R_ф^2 + \frac{Q}{\pi m \alpha_2} t};$$

$$\alpha_2 = \frac{N_0 + (n_0 - N_0)(C_0 - C_1)}{(C_0 - C_1)};$$

C_0 и C_1 — концентрации веществ в воде на подходе к зоне кольматажа и в самой зоне.

Из уравнения (III.31) следует, что размеры зоны кольматажа во времени увеличиваются, а коэффициент фильтрации в этой зоне — величина постоянная и равная

$$k'_п = k_п \left[1 - \frac{N_0}{n_0}\right]^3. \quad \text{(III.32)}$$

В общем случае размеры зоны кольматажа всегда существенно меньше геометрических размеров водоносного пласта в плане,

а коэффициент фильтрации в прифильтровой зоне изменяется во времени. В соответствии с этим можно записать

$$S_к(t) = \left[\frac{k_п}{k_1(t)} - 1\right] \ln \frac{R_0}{R_ф}. \qquad \text{(III.33)}$$

Здесь R_0 — размеры зоны кольматажа, принимаемые в соответствии с конструктивными особенностями водоприемной части скважины; $k_1(t)$ — коэффициент фильтрации в этой зоне, изменяющийся в процессе эксплуатации скважины; $k_п$ — коэффициент фильтрации водоносного пласта.

С использованием уравнений (III.31) и (III.20) построены (рис. 100) графики изменения $\zeta_к$ в зависимости от насыщенности пор осадками при различных соотношениях коэффициента фильтрации водоносного пласта $k_п$ и прифильтровой зоны k_1. Как видно из рисунка, во всех случаях с увеличением насыщенности возрастает дополнительное сопротивление. Однако в скважинах с ухудшенной начальной проницаемостью ($k_п/k_1 > 1$) сопротивление фильтра растет более интенсивно, чем в скважинах с начальной проницаемостью, превышающей проницаемость пласта ($k_п/k_1 < 1$).

Для роста дополнительного сопротивления во времени и определения времени проведения восстановительных работ необходимо в каждом конкретном случае оценивать параметры кольматажа. Для решения этой задачи примем, что на участке зоны кольматажа изменение концентраций $(C_0 - C_1) = \Delta C$ — величина постоянная во времени. Тогда, интегрируя уравнение кинетики (III.24) по t, имеем

$$\bar{a}(t) = N_0\{1 - \exp(-\Delta C \gamma_{ср} t)\}, \qquad \text{(III.34)}$$

где $\gamma_{ср}$ — осредненное значение коэффициента кольматации для всей зоны.

Подставляя уравнение (III.34) в выражение (III.20), получаем

$$k_1(t) = k_ф\left\{1 - \frac{N_0}{n_0}[1 - \exp(-3\Delta C \gamma_{ср} t)]\right\}^3, \qquad \text{(III.35)}$$

где $k_ф$ — начальное значение коэффициента фильтрации прифильтровой зоны

При $N_0 = n_0$ коэффициент фильтрации является экспоненциальной функцией времени

$$k_1(t) = k_ф \exp(-\Delta C \gamma_{ср} t). \qquad \text{(III.36)}$$

С учетом соотношений (III.35) и (III.36) получим следующую зависимость для изменения сопротивления, обусловленного кольматажом во времени

$$S_к(t) = \left[\frac{k_п}{k_ф} \exp(3\Delta C \gamma_{ср} t) - 1\right] \ln \frac{R_0}{R_ф}. \qquad \text{(III.37)}$$

Зависимость (III.37) может быть использована для оценки параметров химического кольматажа скважин.

Пример расчета. Рассмотрим методику определения параметров кольматажа ($\Delta C\gamma_{ср}t$) по скважинам в районе г. Каменка-Днепровская на Каховском водохранилище и в г. Заволжье Горьковской области. В обоих случаях скважины глубиной от 20 до 30 м каптируют подземные воды гидрокарбонатно-кальциевого типа, приуроченные к аллювиальным пескам.

За время эксплуатации во всех скважинах намечалась тенденция к росту дополнительного сопротивления и снижению производительности. Для оценки параметров кольматажа использован графоаналитический метод. Для этого в соответствии с уравнением (III.37) построены графики изменения сопротивлений в координатах $\lg y - t$ $\left(y = \dfrac{S_к}{\ln R_0/R_ф} + 1\right)$. По отрезку, отсекаемому прямой по вертикальной оси, получаем значение $\ln k_п/k_ф$, а угол наклона прямой даст значение $1{,}305\ \Delta C_0\gamma_{ср}t$.

Результаты расчетов приведены в табл. 69. Характерно, что для скважин с блочными фильтрами, отличающимися значительными гидравлическими сопротивлениями, начальное отношение $k_п/k_ф$ свидетельствует о существенно заниженной проницаемости фильтра по сравнению с проницаемостью пласта. Для фильтров каркасно-стержневого типа с контуром гравийной обсыпки $k_п/k_ф < 1$.

Таблица 69

Данные о параметрах кольматажа скважин

№ скважины	Тип фильтра	$\ln k_п/k_ф$	$k_п/k_ф$	$3\Delta C\gamma_{ср}t$
		Каменка-Днепровская		
37	Каркасно-стержневой с гравийной обсыпкой	—0,14	0,7244	2,09
38	То же	—0,05	0,8913	2,91
163	»	+0,065	1,1164	1,38
		Заволжье		
1	Мягкопоролоновый	0,2	1,585	2,76
2	Бескаркасный керамический	0	1,000	6,23
3	Пористобетонный	0,95	8,9	4,72

Определив параметры кольматажа и начальное отношение $k_п/k_ф$ по уравнению (III.37), можно найти дополнительное сопротивление в любой период эксплуатации водозаборов и оценить снижение их производительности. Если расчетное значение производительности окажется ниже, чем требуется по графикам водопотребления, необходимо проведение регенерации скважин.

Таким образом, с использованием предлагаемой методики, с достаточной для практических целей точностью можно определить снижение производительности водозаборов в процессе их эксплуатации.

§ 28. ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА КОЛЬМАТАНТА В ФИЛЬТРЕ И В ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ

Количество реагента в фильтре и прифильтровой зоне скважины может быть определено при известных составе кольматанта и степени насыщенности порового пространства (степени зарастания отверстий фильтра). Прямое определение насыщенности гравийных обсыпок и фильтров кольматантом в полевых условиях

затруднительно. При известной начальной проницаемости фильтра и прифильтровой зоны скважин, а также проницаемости, которые легко получить с помощью затрубного пьезометра на внешнем контуре гравийной обсыпки, можно найти насыщенность порового пространства кольматирующими соединениями.

Оценка проницаемости призабойной зоны в заданном радиусе возможно и без затрубного пьезометра, но точность определений меньше. Однако часто отсутствуют данные о начальной проницаемости призабойных зон. В этом случае можно рекомендовать следующий прием определения количества реагента при массовых обработках. Используя зависимость (III.20), запишем

$$k_1/k_2 = [(1 - a_1)/(1 - a_2)]^3, \qquad \text{(III.38)}$$

где a_1 и a_2 — насыщенности порового пространства, соответствующие проницаемостям k_1 и k_2 до и после обработки скважины.

Перед обработкой скважин определяют проницаемость прифильтровой зоны, а по ее окончании — проницаемость k_2. Полагая, что закольматированная зона ограничивается объемом, заключенным между скважиной и затрубным пьезометром, и зная залитое количество реагента, можно найти количество вымытого кольматанта, а также изменение насыщенности порового пространства $a_в$. Тогда можно записать:

$$k_1/k_2 = [1 - a_р/(1 - a_2)]^3, \qquad \text{(III.39)}$$

$$a_в = p_в/w_{пор}\rho_s. \qquad \text{(III.40)}$$

Здесь $P_в$ — масса осадка, определенная по потреблению реагента; ρ_s — плотность осадка (для гидроокислов железа, отложившегося в основном в призабойных зонах скважин $\rho_s = 1{,}7 \div 2{,}3$ г/см³); $w_{пор}$ — объем пор гравийной обсыпки (пород) в призабойной зоне.

Из выражения (III.39) видно, что изменения в проницаемости однозначно определяются оставшимся и вымытым количеством кольматанта. Кроме того, при известных k_1, k_2 и $a_в$ могут быть вычислены остаточная насыщенность порового пространства и величина k_0 по зависимости (III.20). При этом можно установить дополнительное количество реагента, которое требуется для полной очистки призабойной зоны скважины.

По зависимости (III.39) и (III.40) составлена номограмма, приведенная на рис. 101 [41]. При пользовании номограммой для определения $a_{ост}$ и k_0 необходимо оценить отношение k_1/k_2 и при известном значении $a_в$ найти $a_{ост}$. Зная $a_{ост}$, по кривой $a_{ост}$ можно определить k_2/k_0 и, следовательно, начальную проницаемость призабойной зоны скважины. В последующем при регенерации скважины k_0 можно принимать в качестве предельной, к достижению которой необходимо стремиться при эксплуатации водозаборов подземных вод.

По рассматриваемой методике рассчитана эффективность солянокислотных обработок на водозаборе «Балтэзерс», где варьировалось количество HCl при разной первоначальной проницаемости фильтра. Обработке подвергались скважины, оборудованные пористокерамическими фильтрами на трубчатых каркасах и гравийными фильтрами с чугунным каркасом и водоприемной поверхностью из медной сетки галунного плетения. Величина

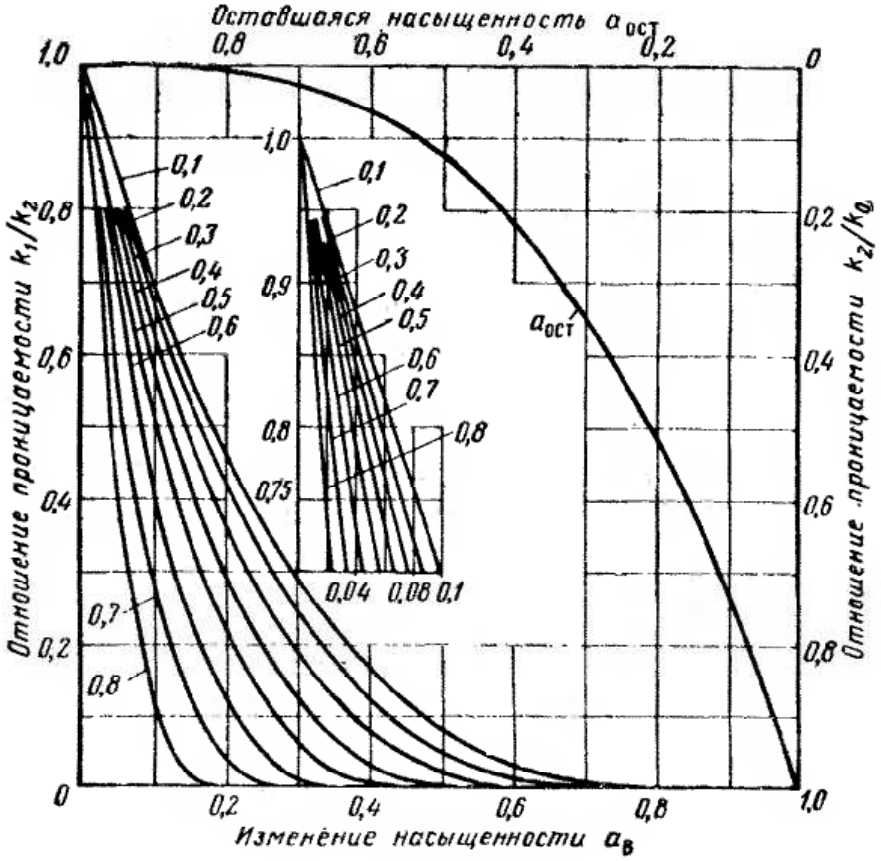


Рис. 101. Номограмма для определения остаточной насыщенности порового пространства кольматантом после реагентной обработки

проницаемости фильтров до и после обработки оценивалась по данным о расходе откачки и известных потерях напора в фрагменте скважина — затрубный пьезометр с учетом несовершенства по степени вскрытия пласта. Количество вымываемого осадка определяли по потреблению HCl в процессе обработки при известном объеме залитой кислоты и прослеживании изменения расхода прокачки скважины и концентрации HCl путем численного интегрирования графиков зависимости концентрации HCl во времени.

Результаты расчета приведены в табл. 70.

Согласно этим исследованиям, в скважинах с пористо-керамическими фильтрами, работавших в течение 5—8 лет, в значительной части обеспечен эффект полного растворения кольматирующих соединений. Это косвенно подтверждается фиксированием значительных остаточных концентраций HCl при обработке этих скважин (количество залитой кислоты составляло 0,6—1 т). Фактиче

Таблица 70

Данные по расчету остаточной насыщенности порового пространства и начальной проницаемости фильтра при обработках скважин водозабора «Балтэзерс»

№ скважины	Проницаемость, м/сут: до обработки k_1	Проницаемость, м/сут: после обработки k_2	Изменение насыщенности $a_в$	Отношение проницаемости до и после обработки k_1/k_2	Остаточная насыщенность порового пространства a_2	Отношение проницаемости после обработки к начальной k_2/k_0	Начальная проницаемость k_0, м/сут
Пористо-керамические фильтры							
15	0,5	0,62	0,387	0,8	0	1	0,62
16	1,24	1,79	0,385	0,692	0	1	1,79
17	0,77	3,6	0,115	0,214	0,7	0,085	42,35
18	0,68	1,74	0,218	0,39	0,2	0,47	3,7
22	0,36	2,06	0,225	0,174	0,5	0,12	17,16
24	4,8	10,00	0,52	0,48	0	1	10,0
26	16,7	27,5	0,214	0,607	0	1	27,5
28	9,43	13,35	0,13	0,698	0	1	13,35
29	6,6	8,84	0,084	0,746	0,2	0,47	18,8
30	5,24	8,2	0,183	0,639	0	1	8,2
31	2,88	7,65	0,41	0,375	0	1	7,65
34	5,75	16,7	0,323	0,344	0,2	0,47	35,5
35	10,55	39,0		0,27			
38	3,07	8,6	0,4	0,357	0	1	8,5
43	9,1	13,7	0,664	0,664	0	1	13,7
49	1,24	3,0	0,1	0,41	0,6	0,06	50
111	3,6	8,27	0,244	0,435	0	1	8,27
113	3,28	6,9	0,177	0,475	0,15	0,575	12,0
114	3,49	8,4	0,32	0,415	0	1	8,4
Гравийно-обсыпные фильтры с чугунным каркасом (фильтры «Тима»)							
84	3,05	32,3	0,124	0,094	0,78	0,01	3230
96	43	178,0	0,268	0,241	0,26	0,375	474,6
103	14	109,5	0,192	0,128	0,60	0,06	1825
119	4,7	12,35	0,098	0,38	0,75	0,015	823,3
122	5,95	53,5	0,085	0,111	0,82	0,008	—

ская начальная проницаемость керамических фильтров невелика и хорошо согласуется с начальной проницаемостью аналогичных конструкций фильтров на водозаборе «Гауяэкспериментальная».

В скважинах с гравийными фильтрами остаточная насыщенность порового пространства велика, несмотря на использование при обработках одной скважины 2—2,5 т HCl с начальной концентрацией 27%. Это объясняется длительным сроком эксплуатации скважин (более 30 лет) и значительной грязеемкостью гравийных фильтров. Приведенные расчеты позволяют определить количество реагента для восстановления производительности скважин, оборудованных фильтрами различных конструкций.

ГЛАВА IV
ПОДБОР И РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ

§ 29. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИЯМ ФИЛЬТРОВ

Выбор рациональной конструкции фильтра представляет собой сложную инженерную задачу. Правильный подбор фильтров применительно к конкретным гидрогеологическим условиям обеспечивает более продолжительную работу водозаборных скважин и устойчивость их производительности во времени.

В основу подбора фильтров должны быть положены следующие требования:

1) необходимая механическая прочность и достаточная устойчивость против химической, электрохимической коррозии и эрозионного воздействия воды;

2) минимальные диаметры фильтровых каркасов и максимальный пропуск воды;

3) большая скважность для увеличения пористости в зоне сопряжения поверхности фильтра с водоносной породой;

4) «пескование» допускается лишь в период пробных и опытных откачек и заранее определяется расчетом;

5) скважность и размер проходных отверстий подбираются в зависимости от забора воды различного химического состава;

6) возможность механической, а в ряде случаев и химической очистки каркасов фильтров, выполняемой с помощью растворителей (кислот, полифосфатов и др.).

Кроме общих требований, рациональная конструкция фильтров подбирается с учетом ряда специфических требований, рассматриваемых ниже.

По назначению конструкции фильтров следует разделить на три основные группы.

1. Фильтры, устанавливаемые в скважинах для водоснабжения и дренажа, рассчитанные на длительный срок эксплуатации — 10—15 лет и более.

2. Фильтры для оборудования скважин на воду с ограниченным сроком эксплуатации — от нескольких месяцев (иногда дней) до нескольких лет. К этой группе следует отнести фильтры, устанавливаемые в скважинах для временного водоснабжения, водопонижения и опытных откачек при изысканиях.

3. Фильтры, устанавливаемые в наблюдательных скважинах на период опытных откачек и в скважинах режимных сетей, рассчитанных на длительный срок наблюдений.

Таблица 71

Область применения фильтров различных типов и конструкций

Водоносные породы	Применяемые фильтры
Полускальные неустойчивые, щебенистые и галечниковые породы с преобладающей крупностью частиц щебня и гальки от 20 до 100 мм более 50%)	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией. Стержневые фильтры
Гравий, гравелистый песок с крупностью частиц от 1 до 10 мм с преобладающей крупностью частиц от 2 до 5 мм (более 50%)	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией, с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки или из штампованного стального листа. Стержневые фильтры с обмоткой проволокой из нержавеющей стали или с водоприемной поверхностью из штампованного листа.
Пески крупные с преобладающей крупностью частиц 1—2 мм (более 50%)	Трубчатые фильтры с щелевой перфорацией, с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, штампованного листа или сетки квадратного плетения. Стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, стального штампованного листа или сетки квадратного плетения
Пески средние с преобладающей крупностью частиц 0,25—0,5 мм (более 50%)	Трубчатые и стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из сеток гладкого (галунного) плетения. Трубчатые и стержневые фильтры с однослойной гравийной обсыпкой (гравийные фильтры)
Пески мелкие с преобладающей крупностью частиц 0,1—0,25 мм (более 50%)	Трубчатые и стержневые фильтры с однослойной, двух- или трехслойной песчаной или песчано-гравийной обсыпкой (гравийные фильтры). Блочные фильтры

Примечания: 1. Фильтры на стержневых каркасах (стержневые фильтры) обладают лучшими гидравлическими свойствами и обеспечивают более эффективную работу скважин при длительной их эксплуатации. Особенно эффективны эти фильтры в водах неустойчивого химического состава, когда проходные отверстия на каркасах сильно зарастают железистыми и карбонатными отложениями, в результате чего снижается их скважность (просветность). Фильтры на стержневых каркасах рекомендуются для скважин глубиной до 200 м.

2. Трубчатые стальные фильтры можно применять при всех глубинах скважин.

3. Применение фильтров из дерева, пластмассы, стеклопластика, а также блочных из пористого бетона и керамики допускается в скважинах глубиной до 100—150 м.

4. В крупногалечных и неустойчивых скальных породах при глубине скважин до 100 м можно применять фильтры с каркасом из штампованной листовой стали с антикоррозионным покрытием.

5. Для фильтров надлежит применять сетки квадратного и гладкого (галунного) плетения из проволоки латунной или нержавеющей стали, а также штампованные из пластических масс и других материалов, стойких к коррозии и обладающих необходимой прочностью.

6. Для изготовления фильтров следует использовать материалы, допущенные для этих целей Главным санитарно-эпидемиологическим Управлением Министерства здравоохранения СССР.

В настоящее время при оборудовании скважин фильтры необходимо подбирать согласно СНиП II 31—74, утвержденным Госстроем СССР со сроком введения с 1 октября 1974 г.

Указания по подбору фильтров приведены в табл. 71.

Исследовательские работы и изучение зарубежных конструкций фильтров подтверждают необходимость корректировки СНиП. Так, возникает необходимость замены трубчатых перфорированных каркасов штампованными, щелевыми, что обеспечивает большой экономический эффект. Фильтры блочного типа из пористой керамики, как не оправдавшие себя при эксплуатации, сняты с производства. Фильтры из пористого бетона не имеют серийного промышленного выпуска и необходимых масштабов применения.

Фильтры блочного типа, очевидно, необходимо устанавливать с дополнительным контуром рыхлой гравийной обсыпки подобно тому, как это делается в других странах.

Следует пересмотреть подбор гравийных обсыпок и отношение диаметров скважин к диаметрам каркаса и толщине обсыпок.

В технологию бурения и подбор конструкций фильтров существенное изменение вносит роторный способ проходки скважин с обратной промывкой, который ранее не предусматривался.

Последующая детализация методики подбора фильтров преследует цель формулирования критериев, которые позволили бы несколько усовершенствовать систему проектирования и строительства скважин на воду различного целевого назначения.

§ 30. ПРОЧНОСТНЫЕ КРИТЕРИИ ПРИ ПОДБОРЕ ФИЛЬТРОВ

Прочностные характеристики системы обсадки скважин определяются конструкцией фильтра с равномерно распределенными по его поверхности отверстиями. Секция фильтра снабжена соединительными элементами различного вида, с помощью которых собирается фильтровая колонна. Как указывалось выше, фильтры изготовляют из металлов (сталь, медь, бронза), дерева, керамики, пластмасс или других материалов. Они должны обеспечивать устойчивость скважины при максимальном числе отверстий, исключающем значительные гидравлические потери.

Фильтр при монтаже и нахождении в скважине подвергается следующим нагрузкам [107]:

1) растяжение и сжатие в направлении оси скважины под действием собственного веса при установке фильтра и труб;

2) боковое давление пород и гравийной обсыпки в скважине;

3) фильтрационное давление при притоке воды в скважину, вызывающее горизонтальные (радиальные) силы сжатия.

Нагрузки при установке фильтров на растяжение связаны с весом фильтра и надфильтровой колонны. Их влияние максимально проявляется в слабых участках колонны: подвесных приспособлениях, поперечном разрезе трубы и соединении секций.

Нагрузка при растяжении равна весу колонны за исключением потерь веса, связанных с погружением ее части в воду. Площадь поперечного сечения трубы связана с ее диаметром d_R, толщиной стенки трубы w, числом отверстий, попадающих в это сечение n_L и шириной отверстий b соотношением:

$$F = (d_R \pi - n_L b) w. \qquad \text{(IV.1)}$$

Предельно допустимое напряжение на растяжение в каждом конкретном случае является предметом исследований изготовляемых фильтров. Допустимая нагрузка на растяжение определяется зависимостью

$$P_Z = F\sigma_Z = (d_R \pi - n_L b) w \sigma_Z. \qquad \text{(IV.2)}$$

Нагрузка на растяжение должна быть близка к допустимой нагрузке P_z. Допустимая нагрузка на болты при фланцевом соединении секций σ_z зависит от площади поперечного сечения болта $F_к$ и их числа n_s.

Допустимая нагрузка P_z при соединении болтами

$$P_Z = n_s F_к \sigma_Z. \qquad \text{(IV.3)}$$

Допустимая нагрузка болтов на сдвиг зависит от допустимого напряжения на сдвиг материала болта τ, $F_к$ и числа болтов

$$P_s = n_s F_к \tau. \qquad \text{(IV.4)}$$

Допустимая нагрузка фланцевого соединения при наличии отверстий составляет

$$P_L = n_s d_s w \sigma_L, \qquad \text{(IV.5)}$$

где d_s — диаметр болта; w — наименьшая толщина стенки листа, соединяемого болтами; σ_L — допустимое напряжение с учетом отверстий.

Нагрузки на сжатие и устойчивость при сжатии. При установке в скважину фильтр испытывает нагрузки трех видов:

перегружены соединения, как и при растяжении, ось трубы остается прямолинейной;

нагрузка на продольный изгиб, ось колонны становится изогнутой, но на всех участках поперечное сечение трубы сохраняет форму круга;

нагрузка на сжатие, ось колонны остается прямолинейной, поперечное сечение трубы становится эллиптическим или приобретает другую форму.

В соответствии с указанными нагрузками различают устойчивость фильтров на сжатие, продольный изгиб и смятие.

Нагрузка сверху на трубу равна собственному весу колонны. По аналогии с нагрузкой при растяжении

$$F = (d_R \pi - n_L b); \qquad \text{(IV.6)}$$

при допустимом напряжении сжатия σ_d несущая способность выражена соотношением

$$P_d = (d_R n - n_L b) w \sigma_d. \qquad \text{(IV.7)}$$

Допустимая нагрузка на продольный изгиб, согласно Эйлеру,

$$P_к = \frac{1}{\nu} \frac{EI\pi^2}{S_к^2}, \qquad \text{(IV.8)}$$

где E — модуль упругости материала фильтра; I — несущий момент; ν — коэффициент запаса; $S_к$ — длина фильтра в м.

Для цельной трубы

$$I = \frac{\pi d_R^3}{8} w \left(1 - \frac{n_L b}{d_R \pi}\right). \qquad \text{(IV.9)}$$

При анализе работы фильтров возможны продольные изгибы двух вариантов: фильтр может изгибаться полностью или в щелевом фильтре могут изгибаться перемычки между рядами щелей.

В случае продольного изгиба всего фильтра $S_к$ равна его длине L. Допустимая нагрузка при продольном изгибе составит

$$P_{к1} = \frac{1}{\nu} \frac{EI\pi^2}{L^2}. \qquad \text{(IV.10)}$$

Величина $P_{к1}$ должна быть больше общего веса колонны. При этом коэффициент запаса принимают равным 1,5—2,0.

Если изгиб происходит в перемычке между рядами щелей,

$$I = b_s w^3/12, \qquad \text{(IV.11)}$$

где b_s — расстояние между щелями по горизонтали; w — толщина стенки фильтра.

Допустимая величина давления при продольном изгибе n_{st} перемычек в поясе и h_s' — расстоянии между центрами соседних перемычек по вертикали определяется по формуле:

$$P_{к2} = \frac{1}{\nu} \frac{EI\pi^2}{S_к^2} = \frac{1}{\nu} \frac{Eb_s\pi^2 w^3}{3\left(h_s'\right)^2} n_{st}. \qquad \text{(IV.12)}$$

В фильтрах с мостообразными отверстиями прочностные показатели на продольный изгиб ухудшаются, и при их росте коэффициент запаса может приниматься равным единице.

Нагрузки и прочностная устойчивость фильтров в скважине. Фильтр, находящийся в скважине, испытывает нагрузки в вертикальном направлении на сжатие, продольный изгиб фильтровой колонны и сжатие под действием собственного веса, включая силы трения. Продольный изгиб фильтра вследствие всестороннего обжатия породами невозможен.

В горизонтальном (радиальном) направлении действуют нагрузки на сжатие и смятие, обусловленные влиянием различных

сил, которые могут вызываться: проявлением одностороннего горного давления (или давления гравийной обсыпки); гидравлической подачей гравийной обсыпки в зафильтровое пространство с большой разницей давления снаружи и внутри фильтра; гидравлическим ударом при прокачке скважины эрлифтом. Следует, однако, отметить, что последние два фактора не играют существенной роли, поскольку их проявление в значительной степени компенсируется упругостью пород водоносного пласта.

Горизонтальное боковое давление (горное давление) линейно возрастает с увеличением глубины установки фильтра. Если стенки фильтра абсолютно гладкие, то на него действует только горизонтальная сила. В случае, когда имеется шероховатость, проявляется действие вертикальных сил. При оценке деформаций, связанных с боковым давлением, может быть использована теория расчета силосных башен. Согласно этой теории, боковое давление

$$P_e = \frac{F\gamma}{U\bar{k}} \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)\left(1 - e^{-\frac{uk}{F}z}\right), \qquad \text{(IV.13)}$$

где F — площадь поперечного сечения цилиндрического отверстия; γ — объемный вес грунта; U — окружность фильтра; $k = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) \operatorname{tg} \varphi'$; φ — угол внутреннего трения водоносных пород; φ' — угол внутреннего трения контакта фильтра и пород; z — глубина от поверхности земли.

$$P_e = \frac{d\gamma}{4\bar{k}} \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)\left(1 - e^{-\frac{4\bar{k}}{d}z}\right) \qquad \text{(IV.14)}$$

(d — диаметр фильтра).

Если в самом неблагоприятном случае принять, что $\varphi' = 1/3\varphi$, то величина $\operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ и $\bar{k}$ можно определить по данным, приведенным ниже:

φ, градус	20	25	30	35	40	45	50
$\operatorname{tg}^2(45-\varphi/2)$ . .	0,450	0,406	0,333	0,271	0,217	0,171	0,132
k	0,131	0,138	0,138	0,134	0,126	0,115	0,102

При относительно малых глубинах $z \approx 5d$

$$P_e = \frac{d\gamma}{4\bar{k}} \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2). \qquad \text{(IV.15)}$$

Допустимая нагрузка при боковом горном давлении с учетом тангенциальных сил и нагрузки на изгиб. Допустимая нагрузка на круглую трубу со средним диаметром d_R и толщиной стенки w при давлении обжатия P составляет:

для цельной трубы

$$P = \frac{2w\sigma}{d_R}; \qquad \text{(IV.16)}$$

для щелевой трубы

$$P_1 = \zeta \frac{2w\sigma}{d_R}. \qquad \text{(IV.17)}$$

Коэффициент ζ зависит от длины щели h_s и высоты перемычки между ними по вертикали h_{st}.

Если фильтры с мостообразными отверстиями, устойчивость их зависит от сопротивления на изгиб выдавливаемого штампом участка металла. При высоте щели h_s, высоте перемычки по вер-

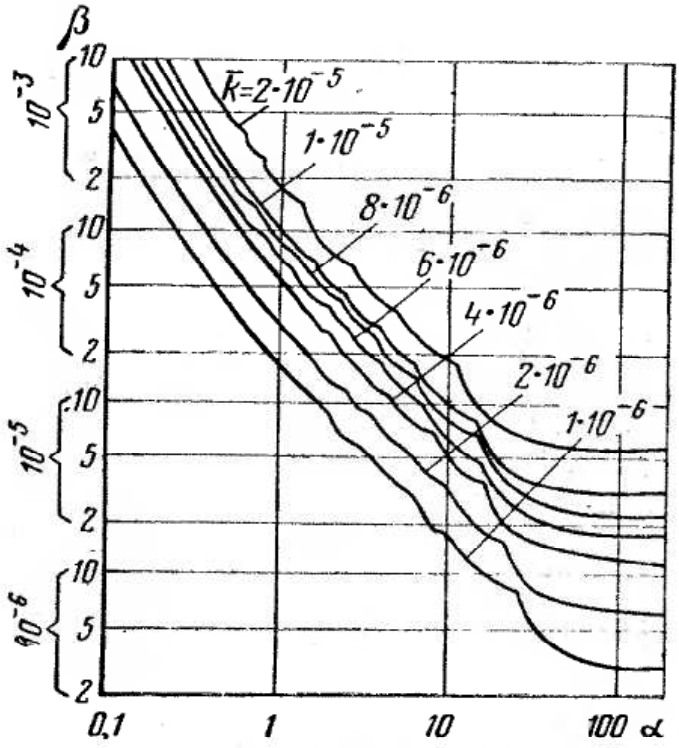


Рис. 102. График для расчета устойчивости фильтра на сжатие при боковом давлении

тикали h_{st} и ширине ее по окружности b_{st} допустимая нагрузка равна наименьшей из следующих величин:

$$P_2 = \frac{8wb_{st}^2\sigma}{d_R\left[3\,(h_s+h_{st})^2 - h_{st}^2\right]}; \qquad \text{(IV.18)}$$

$$P_3 = \frac{8wb_{st}^2\sigma}{d_R\left[3\,(h_s+h_{st})^2 - 3\,(h_s+h_{st})\,h_{st} + h_{st}^2\right]}. \qquad \text{(IV.19)}$$

Величины P_1, P_2 и P_3 должны быть больше, чем боковое горное давление.

Допустимая нагрузка при боковом горном давлении и продольная нагрузка с учетом сжатия труб. Для расчета допустимой нагрузки на сжатие рекомендуется использовать графики Флюгге

[107]. Устойчивость против сжатия при боковом давлении оценивается по графику на рис. 102. Для использования графика необходимо оценить величины

$$\alpha = 2l/d \qquad \text{(IV.20)}$$

и

$$\bar{k} = w^2/3d^2. \qquad \text{(IV.21)}$$

С учетом этих величин оценивается значение β, а затем допустимая нагрузка (в кгс/см³):

$$P_к = \beta 4{,}32 \cdot 10^6 \frac{w}{d}. \qquad \text{(IV.22)}$$

Здесь l — длина трубы в см, d — диаметр трубы в см; w — толщина стенки в см.

Допустимая нагрузка на сжатие при осевом давлении определяется с использованием рис. 103.

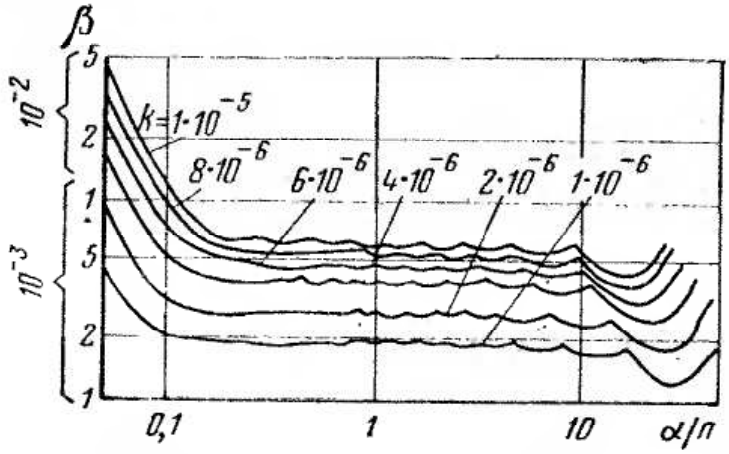


Рис. 103. График для расчета устойчивости фильтра на сжатие при осевом давлении

По кривой для соответствующего $\bar{k}$ принимается α, $\alpha/2$, $\alpha/3$, . . ., α/n и для наименьшей величины β допустимая нагрузка

$$P_к = \beta 2{,}16 \cdot 10^6. \qquad \text{(IV.23)}$$

Допустимая нагрузка на сжатие при одновременном действии горного $P_к$ и осевого давления $p_к$ должна удовлетворять соотношению

$$\frac{P'_к}{P_к} + \frac{p'_к}{p_к} = 1.$$

При этом величины $P_к$ и $p_к$ определяют так, как будто действуют соответственно только боковое горное и осевое давления отдельно.

И, наконец, величина фильтрационного давления на фильтр может быть определена по соотношению [107]

$$P = v^2/200,$$

$$v = Q/F,$$

где Q — расход в м³/с; F — площадь поперечного сечения фильтра в см².

Пример расчета прочности фильтра. Допустим, что вес 1 м фильтра с соединениями составляет 58 кгс, диаметр фильтра — 500 мм, толщина стенки — 4 мм. Секции соединены накладками высотой 100 мм с толщиной стенки 6,5 мм, болты М 10 в количестве 20 штук. Фильтр сделан из стального листа с допустимым напряжением растяжения, сжатия и изгиба 1200 кгс/см². Болты из стали с допустимым напряжением на растяжение и на срез 1000 кгс/см², напряжение растяжения фланца — 1600 кгс/см².

Предположим, что верх фильтра находится на глубине 6 м от поверхности земли; 9,5 м фильтра находится над водой и 19,5 м — под водой.

Несущая способность фильтра на растяжение определялась при следующих характеристиках:

средний диаметр трубы d_R, см 50,4
толщина стенки w, см 0,4
ширина щели l, см 0,5
число щелей n_L, ... 150

Несущая способность болтов на сдвиг оценивалась при $F = 0{,}49$ см и допустимом напряжении на сдвиг 1000 кгс/см². Модель упругости E принимался равным $2{,}1 \cdot 10^6$ кгс/см². Возможность продольного изгиба элемента фильтровой поверхности оценивалась при $b_s = 0{,}55$, $w = 0{,}4$, $h_s = 3{,}5$, $n_{st} = 150$. Несущая способность на тангенциальное давление определялась при $h_s = 2{,}9$, $h_{st} = 0{,}6$, $w = 0{,}4$, $d_R = 50{,}4$, $\sigma = 1200$, а на изгиб элемента при тех же параметрах фильтровой поверхности и $b_{st} = 0{,}55$.

Результаты расчетов прочностных характеристик фильтров приведены в табл. 72.

Таблица 72

Сводные данные о расчетных и фактических нагрузках на фильтр скважины

Действующие нагрузки	Фактическая нагрузка	Рассчитанная несущая способность	Коэффициент запаса
Вертикальное растяжение, кгс:			
фильтра	1486	39 800	27
глухих труб	1842	76 000	41
соединений на фланцах и болтах	1697	9 800	5,8
Вертикальное сжатие, кгс:			
фильтра	1763	39 800	23
всей колонны труб с учетом продольного изгиба	1763	12 700	7,2
водоприемной поверхности с учетом продольного изгиба	1763	1 980 000	1120
фильтров с учетом сжатия	1763	205 500	116
Горизонтальное давление (горное давление), кгс/м²:			
фильтров с тангенциальным кольцевым напряжением	560	39 600	71
фильтра с учетом продольного изгиба элемента водоприемной поверхности	560	7 250	11
фильтра с учетом смятия	560	7 250	13
Смятие фильтра (в кгс/м²) при одновременном действии давлений:			
горизонтального	560	7 250	
осевого	1763	205 500	

Из приведенных расчетов следует, что даже при относительно небольшой толщине стенки фильтра (4 мм) и скважности, превышающей 20%, обеспечивается существенный запас прочности фильтра с учетом всего комплекса возможных деформаций в процессе его установки и нахождения в скважине.

Применение фильтров из штампованных материалов позволяет значительно снизить расход металла по сравнению с фильтрами на основе трубчатых каркасов. Однако в полной мере ориентироваться на прочностные критерии при подборе фильтров можно только при каптаже скважинами вод, не способных вызывать коррозию металлов или при надежной антикоррозионной защите конструкций.

§ 31. ПОДБОР ФИЛЬТРОВ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИИ И КОЛЬМАТАЖА

Химическая коррозия происходит, если в воде находятся некоторые компоненты в концентрациях, обусловливающих растворение металлов. Такими компонентами являются CO_2, O_2, H_2S, HCl, Cl_2, H_2SO_4. В максимальной степени коррозия проявляется в высокоминерализованных водах. При каптаже подземных вод гидрокарбонатно-кальциевого типа небольшой минерализации проверять образование коррозионных продуктов следует, используя показатель Ризнера.

Показатель стабильности воды Ризнера характеризует устойчивость углекислых соединений в воде и равен $Ri = 2pH_s - pH$ (здесь pH_s — показатель водородных ионов, отвечающий равновесному содержанию в воде углекислых соединений, pH — фактическая величина концентрации водородных ионов подземных вод).

В результате опытных работ получено, что при $Ri > 9$ вода коррозионна, если $7 < R_i < 9$, то возможно развитие процессов коррозии и кольматажа. При $Ri < 7$ вода склонна к выделению кольматирующих образований.

Большой опыт эксплуатации скважин на воду показывает, что интенсивность коррозии конструкционных материалов различна. Но применение разных металлов и сплавов позволяет обоснованно проектировать скважины, в частности, можно использовать водоприемные поверхности из цветных металлов в соответствии с изложенными ниже рекомендациями.

Материал фильтра выбирается в зависимости от показателя стабильности:

Низкоуглеродистая сталь	7,0—8,0
Железо Армко	6,5—8,0
Красная латунь	6,5—8,5
Бронза эвердур	9,0
Суперникель	9,0
Монель 400	9,5
Нержавеющая сталь	12,0—15,0

Процесс электрохимической коррозии может быть предотвращен путем использования в конструкции фильтров металлов с близ-

кими потенциалами. Скорость коррозии фильтров из стальных труб достигает значительных величин. Так, в скважинах вертикального дренажа Горьковской ГЭС при наличии в воде до 10 мг/л сероводорода и Ri $>$ 8 скорость коррозии превышала 8—10 мм/год. На водозаборах Дзержинска при каптаже аллювиальных отложений междуречья Волги и Оки скорость коррозии низкоуглеродистой стали была более 10 мм /год.

Во всех случаях водоприемная поверхность из нержавеющей проволоки или листа сохранялась практически неизменной. Однако при устройстве особо ответственных сооружений с фильтрами из цветных металлов и нержавеющей стали также необходимо прогнозировать интенсивность процесса коррозии и в соответствии с этим выбирать материал фильтра. Важным обоснованием этого являются приводимые ниже примеры [116].

Город Глисон, Теннеси. Фильтры из сплава эвердур (96% меди, 3% кремния, 1% марганца) работали в скважинах в среднем 3 года. Фильтры же из нержавеющей стали работают устойчиво. Наиболее старые скважины с этими фильтрами эксплуатируются с 1957 г. Сплавы, содержащие медь, корродируют, а нержавеющая сталь устойчива в водах с высоким содержанием углекислоты и соответствующим высоким значением показателя стабильности воды Ризнера.

Белый Дом, Вашингтон. В 1962 г. три скважины водозабора системы кондиционирования воздуха были оборудованы фильтрами из сплава монель (70% никеля, 30% меди). В 1964 г. скважины вышли из строя и были оборудованы фильтрами из нержавеющей стали (тип 304).

Указанные примеры свидетельствуют о том, что фильтры из сплавов монель и эвердур неустойчивы в водах с высоким содержанием углекислоты и высокими значениями показателя Ризнера.

Британская Колумбия, Канада. Большое количество иглофильтров из нержавеющей стали (тип 304) эксплуатировалось в системе водопонижения, где откачивались инфильтрационные морские воды с концентрацией H_2S, равной 120 мг/л. В 1964 г. они были заменены фильтрами из нержавеющей стали типа 304 EL/C (низкоуглеродистая, экстра), которые практически не корродировали. Когда содержание сероводорода в воде очень велико и скважинами отбирается морская вода, даже нержавеющая сталь типа 304 оказывается неустойчивой.

В каждом из рассматриваемых случаев в фильтрах не накапливаются продукты коррозии. Материал фильтра разрушается, растворяется водой и удаляется из скважины. Решение этой проблемы заключается в использовании других металлов, более коррозионно устойчивых, фильтров из пластмасс или металлических конструкций с антикоррозионными покрытиями.

Если есть сведения о склонности подземных вод к выделению кольматирующих образований, следует ориентироваться на

конструирование фильтров максимальной скважности. Поскольку в большинстве случаев это явление прослеживается с разной степенью интенсивности, при проектировании и устройстве эксплуатационных скважин выполнение этого требования необходимо.

§ 32. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ И ИХ ПОДБОР

Выбор типа и конструкции фильтра. Наименьшие гидравлические потери вне зависимости от условий каптажа рыхлых или связных пород обеспечиваются при установке в скважине фильтров со щелями, ориентированными в горизонтальной плоскости. Наиболее предпочтительны фильтры с проволочной водоприемной поверхностью — каркасно-стержневые конструкции В. М. Гаврилко или фильтры фирм «Джонсона» и «Кука».

При проектировании скважин относительно невысокой производительности возможно применение фильтров из штампованных материалов и на трубчатых каркасах с какой-либо из водоприемных поверхностей (сетчатой, из проволоки или штампованного листа). Во всех случаях следует иметь в виду, что при использовании дополнительной водоприемной поверхности существенно снижается эффективная скважность фильтра, поэтому более целесообразно применение гравийного фильтра вместо устройства дополнительной водоприемной поверхности.

При сооружении эксплуатационных скважин длительного действия необходимо предусматривать установку фильтров максимальной скважности. В фильтрах с проволочной обмоткой или продольными проволочными стержнями на каркасах скважность 40—60% можно считать допустимой, исходя из их конструктивных особенностей. Для щелевых и дырчатых фильтров, изготовляемых из труб, допускаемая минимальная скважность при соблюдении прочности равна 20—25%.

Для скважин, забирающих воду из слабопроницаемых пород и рассчитанных на короткий период эксплуатации, скважность фильтров можно снижать до 10—15%.

Необходимо отметить, что скважность фильтров в ряде случаев зависит от конструктивных особенностей материалов, из которых они изготовляются, а также от технологии изготовления проходных отверстий. Если стальные фильтры штампованные, можно получить большую скважность, чем при автогенной резке щелей или при сверлении.

Данные о скважности и ширине проходных отверстий щелевых фильтров, изготовляемых из труб различных материалов, приведены в табл. 73.

Такой широкий диапазон размеров щелей объясняется тем, что в одних случаях щелевые фильтры являются собственно фильтрами и контактируют с породами, а в других — служат вспомогательными каркасами для более сложных конструкций фильтров.

Таблица 73

Скважность фильтров в зависимости от применяемых материалов

Фильтры из труб	Ширина щели, мм	Предельная скважность, %
Стальных	3—30	30
Чугунных	3—15	15
Асбестоцементных	0,5—6	25
Деревянных клепочных	1—4	15
Винипластовых	0,5—8	25
Гончарных	2—50	17
Фарфоровых	1—2	6

Выбор диаметра и длины фильтра-каркаса. Диаметр фильтра-каркаса выбирают, исходя из проектируемого дебита скважины и параметров водоподъемного оборудования. Дополнительно фильтры следует проверять на допустимые скорости движения воды (в фильтре и водоподъемных трубах), которые не должны превышать 1,5—2 м/с. Поскольку при толщине контура гравийной обсыпки 150—200 мм, как правило, скважины работают устойчиво, их диаметр можно определять, исходя из назначаемого диаметра фильтра и предполагаемой толщины обсыпки. Необходимо отметить, что в водах неустойчивого химического состава предпочтительно использовать фильтры большого диаметра при сохранении предлагаемой толщины слоя обсыпки.

Длину фильтра-каркаса выбирают на основе анализа гидрогеологических условий водоносных пластов, принимая ее равной их мощности, если последняя меньше 10 м, т. е. следует проектировать скважины, совершенные по степени вскрытия пласта. При значительных мощностях водоносного горизонта фильтры устанавливают в наиболее водопроницаемых зонах. При слоистом строении толщи возможны ярусные фильтры с перекрытием водонепроницаемых или слабоводопроницаемых отложений глухими трубами.

Если водоносный пласт однороден и его мощность более 10 м, длину фильтра можно подбирать методом фильтрационных сопротивлений, согласно которому пользуются приемом, основанным на том, что показатель сопротивления скважины, характеризующий несовершенство по степени вскрытия пласта, уменьшается с увеличением длины фильтра l и при $l/m = 0{,}8 \div 0{,}9$ становится незначительным (m — мощность водоносного пласта). Суммарное же сопротивление фильтра прямо пропорционально его длине. Это можно объяснить, если представить, что однородный водоносный пласт оборудован фильтром лишь частично, а некоторая зона ствола скважины сохраняет устойчивость без крепления ее фильтром. Очевидно, дополнительное сопротивление будет сказываться только на участке установки фильтров.

Суммарное сопротивление, связанное с конструктивными особенностями скважины, имеет оптимальную величину, поскольку

сопротивление, обусловленное несовершенством по степени вскрытия пласта, уменьшается с увеличением длины фильтра, а потери напора из-за несовершенства скважин по характеру вскрытия пласта возрастают при большей длине фильтра. Поэтому увеличение длины фильтра гидродинамически несовершенной скважины не приводит к росту ее расхода при заданном понижении уровня. Это особенно заметно при использовании в скважине фильтров с большим сопротивлением (сетчатого, блочного, фильтров-каркасов с малой скважностью). Для иллюстрации приема подбора длины сетчатого фильтра воспользуемся результатами исследований сопротивлений сетчатых фильтров на каркасе из перфорированной трубы с сеткой галунного плетения № 12/90.

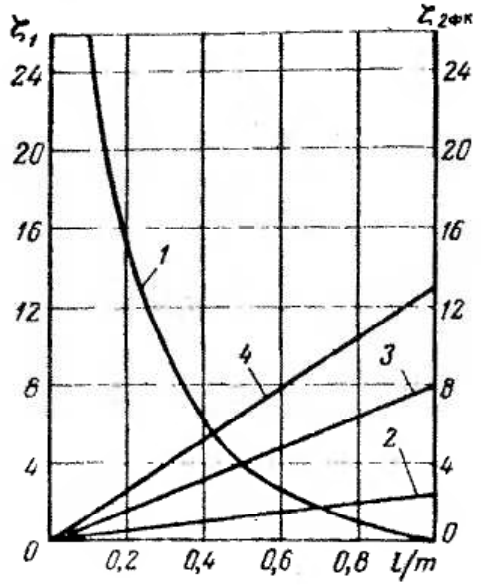


Рис. 104. График для расчета оптимальной длины фильтра в скважине с двойным несовершенством:

1 — изменение $\zeta_1 = f(l/m)$; *2, 3, 4* — изменение сопротивления сетчатого фильтра при скважностях соответственно 24, 10 и 5%

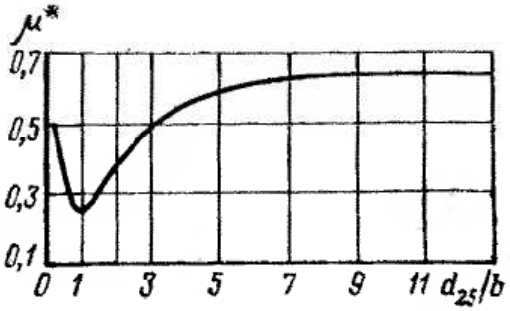


Рис. 105. График зависимости коэффициента расхода фильтра с круглой перфорацией от состава контактирующего с ним гравия (песка)

Пример расчета. Необходимо выбрать длину фильтра скважины с водоприемной поверхностью из сетки галунного плетения № 12/90 на каркасе из трубы с круглыми отверстиями фильтра при намечаемой откачке эрлифтом. Мощность напорного водоносного горизонта 10 м, диаметр фильтра принимается 100 мм.

При подборе длины фильтра удобно строить совмещенные графики зависимости ζ_1 и $\zeta_{2ф}$ от l/m (здесь ζ_1 — показатель сопротивления, суммируемый с сопротивлением пласта и обусловленный несовершенством скважины по степени вскрытия пласта, а $\zeta_{2ф}$ — показатель сопротивления фильтра). В рассматриваемом случае при диаметре отверстия каркаса $d_0 = 20$ мм и отношении $d_0/D = 0{,}2$ (D — диаметр фильтра) сопротивление сетчатого фильтра при скважности 24, 10 и 5% равно соответственно 24, 10 и 5.

Из графика на рис. 104 следует, что в каждом случае применение фильтра с длиной, большей той, при которой оба показателя сопротивления равны друг другу ($\zeta_1 = \zeta_{2ф}$), не может привести к снижению потерь, связанных с конструктивными особенностями скважин. Для сетчатых фильтров со скважностью опорного каркаса 24, 10 и 5% оптимальные значения l/m составляют соответственно 0,7; 0,5 и 0,43.

При использовании фильтров высокой скважности с небольшими сопротивлениями (каркасно-стержневые фильтры или другие конструкции, обеспечивающие проницаемость, весьма близкую к проницаемости каркас-

ных конструкций) практически всегда можно принимать отношение $l/m = 0{,}7 \div 0{,}8$.

Во всех указанных случаях, особенно при большой мощности водоносного пласта, для окончательного выбора длины фильтра при заданном диаметре и конструкции целесообразно использовать проверку постоянства гидравлических потерь с применением критерия, согласно которому при

$$l > 0{,}53D/\mu\eta \qquad \text{(IV.24)}$$

гидравлические потери и приток к скважине остаются постоянными.

При пользовании критерием (IV.24) диаметры фильтра задаются в соответствии с изложенными рекомендациями, величиной μ можно задаваться в соответствии с исследованиями И. Петерсена, М. Альбертсона и С. Ровера, приведенными в табл. 52, а скважность принимается в долях единицы. Кроме того, для этих целей применимы результаты исследований Г. В. Донского, характеризующие зависимость коэффициентов расходов от отношений d_{25}/b (d_{25} — размер частиц гравийной обсыпки или водоносных пород, соответствующий 25%-ному содержанию их в пробе; b — ширина щели или диаметр круглого отверстия), приведенных на рис. 105.

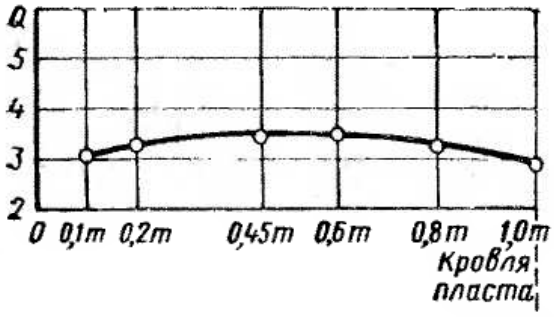


Рис. 106. График зависимости дебита скважины Q от положения фильтра в напорном водоносном пласте (по С. К. Абрамову), m — мощность пласта

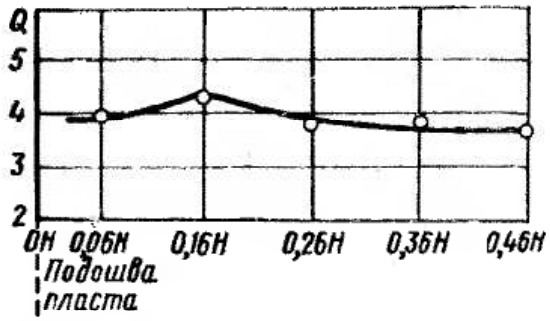


Рис. 107. График зависимости дебита скважины Q от положения верха фильтра в безнапорном водоносном пласте (по В. Д. Бабушкину), H — мощность пласта

При правильно подобранном фильтре проницаемость гравийной обсыпки выше проницаемости пласта, поэтому потерями напора в гравии условно можно пренебречь (в начальный период на опытных участках Каменского и Знаменского вертикальных дренажей они составляли 2—5 см при толщине контура более 200 мм) и принимать D равным диаметру скважины.

Пример поверочного расчета. На участке Каменского вертикального дренажа мощность водоносных пород составляет в среднем 15 м, а бурение ведется роторным способом с обратной промывкой (диаметр скважины 0,8 м). В скважинах установлены каркасно-стержневые фильтры конструкции В. М. Гаврилко со скважностью 0,43. При использовании в качестве обсыпки гравия Волгоградского карьера с размером частиц $D_{50} = 4$ мм, $\mu^* = 0{,}88$ (см. табл. 52) и $l = 11{,}2$ м получается $l/m = 0{,}75$, что согласуется с расчетами предыдущего примера.

Очевидно, в скважинах специального назначения для осушения, искусственного пополнения запасов подземных вод и других целей возможен иной конструктивный подход к выбору длины и диаметра фильтра.

Влияние положения фильтра в водоносном пласте на дебит скважины в напорных условиях экспериментально изучалось С. К. Абрамовым [31] на ЭГДА. Было установлено, что фильтр можно располагать в любом положении в пласте по вертикали.

С приближением его концов l непосредственно к верхнему и нижнему водоупорным пластам наблюдается незначительное уменьшение дебита скважин, которым можно практически пренебречь (рис. 106).

Примерно то же наблюдается и при работе скважин в безнапорных условиях и, как установлено В. Д. Бабушкиным [14] на основе опытов в фильтрационном лотке, уменьшение их дебита при приближении верхнего конца фильтра к депрессионной поверхности выражено еще меньше (рис. 107). При устройстве крупных водозаборов и водопонизительных систем оптимальные длины фильтров и интервал их установки могут быть найдены экспериментальным путем — расходометрией эксплуатационных скважин, т. е. выявлением участков с максимальным притоком с помощью приборов, позволяющих определять скорости воды по высоте водоприемной части скважины.

При эксплуатации скважиной нескольких водоносных горизонтов (при чередовании водоносных слоев с водоупорными) необходимо применять фильтры, составленные из отдельных звеньев, и располагать их таким образом, чтобы рабочая часть каждого звена находилась против водоносного слоя, а глухая — против водоупорного.

§ 33. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУФФОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ

Выбор размера отверстий фильтра необходим при конструировании и изготовлении фильтровых каркасов независимо от того, будут ли они контактировать непосредственно с естественной водоносной породой или с обсыпкой. Размер проходных отверстий фильтров назначают с учетом гранулометрического состава пород, слагающих водоносный горизонт; химического состава подземных вод; особенностей конструкций фильтра.

Опытами Тиккеля и Коберли были изучены процессы сводообразования у отверстий фильтров как в среде, составленной из калиброванных металлических шариков, так и в естественных разнозернистых песках. Ими было установлено, что размеры проходных отверстий фильтров в основном зависят от двух факторов:

фракционного состава песков, т. е. от крупности и разнородности частиц, контактирующих с каркасом;

формы проходных отверстий фильтра.

В результате исследований были получены следующие зависимости для определения размера проходных отверстий фильтра:

диаметр круглых отверстий

$$D_0 = (3 \div 4{,}5)\, d_{90};$$

ширина прямоугольной щели

$$t = (2 \div 3)\, d_{90},$$

где D_0 — диаметр отверстия; t — ширина щели; d_{90} — диаметр песчаных частиц, меньше которого в породе содержится 90% фракций.

Изучение формы щели показало, что увеличение ее длины не сказывается на устойчивости мостиков, за исключением случая, когда форма прямоугольного отверстия приближается к квадрату. В этом случае отношение t/d_{90} приближается к отношению D_0/d_{90}.

Как было показано еще первыми исследователями, при близком расположении щелей сводообразование ухудшается. Однако минимально допустимого расстояния между щелями найдено не было. В. И. Щуров считает, что это расстояние не должно превышать $(5 \div 7)\, t$. И. Е. Жернов предлагает принимать расстояние между круглыми отверстиями $\geqslant 3D_0$, между щелями $\geqslant 3t$.

На основе результатов специальных лабораторных опытов в фильтрационной трубке, а затем в фильтрационном лотке, где изучались условия выноса песчаных частиц через проходные отверстия в дырчатых, сетчатых и щелевых фильтрах при работе их как в однородных, так и разнородных по крупности песках, С. К. Абрамовым [30, 31] рекомендуются следующие эмпирические зависимости [1] для определения размеров отверстий на фильтровых каркасах (табл. 74).

Таблица 74

Размеры отверстий фильтров в зависимости от коэффициента неоднородности пород и их среднего диаметра

Тип фильтра	Рекомендуемые размеры отверстий фильтров	
	в однородных породах и обсыпках $k_н \leqslant 2$	в неоднородных породах и обсыпках $k_н > 2$
Дырчатый	$(2{,}5 \div 3)\, d_{ср}$	$(3 \div 4)\, d_{50}$
Сетчатый	$(1{,}5 \div 2)\, d_{ср}$	$(2 \div 2{,}5)\, d_{50}$
Щелевой	$(1{,}25 \div 1{,}5)\, d_{ср}$	$(1{,}5 \div 2)\, d_{50}$
Проволочный	$1{,}25 d_{ср}$	$1{,}5 d_{50}$

Примечание. Меньшие значения коэффициентов при $d_{ср}$ и d_{50} относятся к мелкозернистым породам, а большие — к крупнозернистым.

Из приведенных соотношений следует, что величина проходных отверстий находится в определенной зависимости от их формы и взаимного расположения.

В результате исследований С. К. Абрамов пришел к выводу, что расстояние между отверстиями следует назначать, исходя лишь из условий обеспечения необходимой скважности и прочности фильтров, а длину щелей принимать равной десятикратной их ширине. По существу, точка зрения С. К. Абрамова относительно выбора

[1] Эти рекомендации в настоящее время входят в нормативные документы на проектирование и сооружение буровых скважин на воду.

расстояния между щелями включает рекомендации В. И. Щурова и И. Е. Жернова, поскольку скважность фильтров 20—30% (максимально возможная в фильтрах из труб с учетом их прочности) может быть обеспечена при соблюдении расстояния между щелями не менее $3t$ или $3D_0$.

Подбор гравийной обсыпки. В зависимости от механического состава водоносных пород и химических свойств подземных вод в скважинах можно устанавливать фильтры с гравийной обсыпкой или без нее. В водах с большой жесткостью и со значительным содержанием железа и растворенных газов (углекислоты, кислорода) необходимо устанавливать фильтры с большой фильтрационной поверхностью, максимальным процентом скважности и большими проходными отверстиями, что может быть достигнуто только при применении гравийных обсыпок.

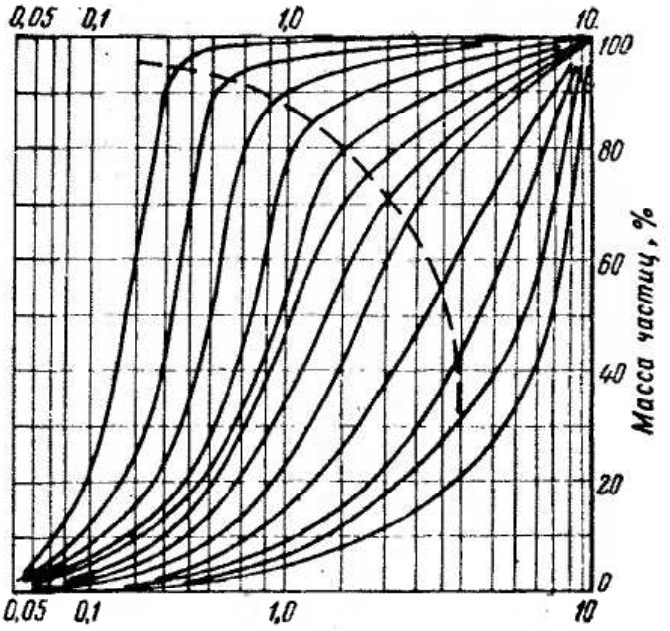


Рис. 108. Кривые зернового состава песков и кривая характерного диаметра (пунктирная) для определения состава гравийной обсыпки

В галечниках, гравии и крупнозернистых песках фильтры устанавливают без гравийной обсыпки. В среднезернистых, мелкозернистых и тонкозернистых песках для увеличения отбора воды из скважин и предупреждения зарастания фильтров рекомендуется устанавливать фильтры с гравийной обсыпкой. Последнюю надо рассматривать как средство улучшения фильтрационных свойств грунтов в прифильтровой зоне, а также как конструктивный элемент, позволяющий задаваться большим размером проходных отверстий фильтра (а следовательно, и большим процентом скважности).

Гравийные фильтры обычно сооружаются с однослойной и двухслойной гравийной обсыпкой (реже с большим числом слоев). Подбор обсыпок при устройстве гравийных фильтров является одним из наиболее ответственных этапов в комплексе работ, связанных с проектированием, сооружением и эксплуатацией водозаборных скважин. Крупность гравийных (песчаных) частиц и количество слоев обсыпки определяют, исходя из механического состава песков, слагающих водоносный пласт на участке установки фильтра.

При устройстве многослойных фильтров особое внимание обращается на подбор первого слоя обсыпки, контактирующего с грун

том. Этот слой является основным, фильтрационным, второй и последующие — каркасными, поддерживающими первый слой. Соответственно дифференцируются и соотношения между частицами грунта и частицами гравия, которые обеспечивают стабильную работу скважин без пескования. Межслойные коэффициенты (отношения размеров частиц разных слоев обсыпки) в обсыпке принимаются меньшими, чем на контакте с грунтом [30].

Основным требованием к подбору гравийных обсыпок является обеспечение суффозионной устойчивости пород в прискважинной зоне при сохранении относительно небольших контактных потерь напора. В основу подбора гравийного фильтра скважины берутся данные о гранулометрическом составе водоносных пород с кривой, построенной в полулогарифмическом масштабе. По этой кривой оценивается размер частиц, соответствующий 50%-ному содержанию в пробе (d_{50}), и при коэффициенте межслойности, равном 8—12, определяется D_{50} гравия или песка, применяемого для обсыпки.

Однако более предпочтительно при подборе состава обсыпки использовать не отдельные значения характерного состава песков, а кривую их гранулометрического анализа в целом. Наиболее детальные исследования по подбору состава слоя обсыпки с учетом всей кривой гранулометрического состава были проведены В. И. Фоменко [84], однако приемы, предложенные им при подборе суффозионных и несуффозионных грунтов, довольно сложны и их целесообразно использовать при проектировании особо ответственных сооружений.

Удовлетворительные результаты дает пользование диаграммой, приведенной на рис. 108, где представлен практически полный диапазон кривых гранулометрического состава песков и кривая их характерного диаметра, на которую следует ориентироваться при подборе фильтра во избежание механического кольматажа обсыпки и суффозии. Расчетную величину среднего диаметра гравия получают путем умножения величины характерного диаметра на 5.

Материал обсыпки должен быть однородным и просеянным через сито с размерами ячеек, приведенными в табл. 75. При этом минимальная масса пробы гравия также должна быть различной для фильтрового гравия (песка) разного состава. Во всех случаях количество частиц минимального и максимального диаметров не должно превышать 10%.

Толщина слоя обсыпки. Можно считать достаточно установленным, что при соблюдении геометрического критерия суффозии вынос частиц из водоносного пласта через обсыпку мало зависит от ее толщины. Исследования [114] показывают, что при толщине слоя

$$l = (5 \div 10) D_{50} \qquad \text{(IV.25)}$$

и при соотношении невымываемых частиц песка и обсыпки 1 : 10 фильтр работает без пескования.

Таблица 75

Данные о рекомендуемом составе обсыпки и массе представительной пробы гравия (песка)

Размеры частиц, мм	Рекомендуемые соотношения размеров частиц при многослойной обсыпке								Масса пробы для ситового анализа, г
Фильтровый песок									
0,25—0,5	+								500
0,5—0,75		+							500
0,75—1			+						500
1—1,5				+					1 000
1,5—2	+				+				1 000
Фильтровый гравий									
2—3		+				+			1 000
3—4			+				+		1 000
4—6				+					1 000
6—8	+				+				5 000
8—12		+				+			5 000
12—16			+				+		5 000
16—25				+					5 000
15—35					+	+	+		15 000

Однако по условиям ведения работ при обсыпках такой толщины и использовании крупнозернистого гравия трудно гарантировать непрерывность слоя обсыпки, поэтому минимальную толщину ее рекомендуется выбирать в зависимости от размера зерен гравия и песка:

Размер зерен, мм	0,75—4	4—12	12—35
Толщина слоя, мм	$\geqslant 60$	$\geqslant 70$	$\geqslant 80$

В скважинах с многослойной обсыпкой толщина слоя из тонкозернистого гравия (песка) никогда не должна быть меньше толщины опорного слоя грунта.

Применять для обсыпки фильтров скважин гравий неоднородного состава нецелесообразно из-за существенного расслоения его в процессе засыпки и чередования слоев уплотненной обсыпки с крупнозернистыми слоями, через которые возможна суффозия [76]. В исключительных случаях допустимо применение неоднородного гравия при принудительной подаче его на забой скважины по специально спускаемым трубам или других технологических приемах, обеспечивающих уменьшение расслоения гравия в ходе засыпки.

Расход гравия зависит от длины фильтров и толщины обсыпки. Длину фильтра определяют расчетным путем с учетом особенностей строения водоносного горизонта (смена гранулометрического состава пород, наличие глиняных линз и т. д.).

В расчете гравийной обсыпки следует учитывать, что при засыпке по межтрубному пространству высота слоя должна быть на 3—5 м больше длины рабочей части фильтра. Запас столба гравия над верхним краем рабочей части фильтра необходим для пополнения обсыпки в случае ее проседания и выносе. При достаточных запасах гравия, небольших глубинах скважин (15—25 м) и длине рабочей части фильтра, не превышающей 10—15 м, целесообразно производить гравийную обсыпку на всю глубину скважины.

В фильтрах блочного типа длина обсыпки принимается равной длине рабочей части фильтра.

При устройстве рыхлой обсыпки перед началом работ требуется определить объем гравия, необходимый на 1 м фильтра,

$$V = \frac{\pi}{4}\left(D_т^2 - d_ф^2\right) l\alpha, \qquad \text{(IV.26)}$$

где $D_т$ — внутренний диаметр обсадной трубы; $d_ф$ — внешний диаметр фильтра; l — длина фильтра; $\alpha = 1{,}2 \div 1{,}5$ коэффициент растекания.

При обнажении фильтра необходимо учитывать усадку и растекание гравия под фрезер обсадной трубы. В зависимости от способа подъема колонн (домкратами, полиспастами, вибраторами) усадка гравия будет различной; в некоторых случаях она достигает 50% и более.

Для успешной работы гравийных фильтров следует тщательно подготовить материал для обсыпок. Гравий, добываемый в речных карьерах и непосредственно в плесах, в большинстве случаев содержит лишь незначительные примеси глинистых частиц, которые легко удаляются просеиванием. Песок и гравий, добываемые в горных карьерах, часто обогащены продуктами выветривания (пыль, глина), поэтому кроме просеивания, их надо промывать водой. При массовой установке фильтров гравий рекомендуется просеивать на виброгрохотах с установкой двух сит, определяющих верхний и нижний пределы необходимого размера частиц гравия.

§ 34. ПОДБОР ФИЛЬТРОВ БЛОЧНОГО ТИПА

Лабораторными исследованиями, проведенными во ВНИИ ВОДГЕО [34], установлено, что величина выноса песка через фильтр зависит главным образом от размера поровых каналов. Существенное значение при этом имеет и структура порового пространства.

Анализируя данные ряда исследований различных вяжущих для получения фильтровых блоков, видим, что их параметры определяются не только размером формуемых частиц, но и другими факторами: видом клеящего материала, его дозировкой для смеси,

способом и степенью уплотнения смеси, формой частиц (гравий или крошка), т. е. технологией изготовления блоков.

Отсюда следует, что предполагаемая устойчивость отношения D_{50}/d_{50}, которое бралось за основу известных рекомендаций, в действительности не существует, так как размер пор зависит от ряда факторов. Таким образом, параметры $D_{ср}$ или D_{50} могут быть положены в основу подбора фильтров блочного типа приближенно.

В качестве расчетного параметра принято брать коэффициент фильтрации $k_ф^0$, находящийся в прямой зависимости от пористости и квадрата среднего диаметра пор.

$$k_ф^0 = 18{,}9nD^2/\nu, \qquad \text{(IV.27)}$$

где n — пористость в долях единицы; ν — кинематический коэффициент вязкости в см²/с; D — диаметр пор.

В расчете фильтров блочного типа учитывается не только размер пор, но и структура порового пространства. Решение поставленной задачи, таким образом, следует искать в соотношении коэффициентов фильтрации блоков и водоносных песков.

Искомая зависимость для подбора фильтров блочного типа была получена [33] из анализа уравнения (IV.27), проведенного с целью выявления характерных точек семейства кривых

$$k_ф = \psi\left(k_ф^0\right)\big|_{k=\text{const}}. \qquad \text{(IV.28)}$$

После вычислений, результаты которых сведены в табл. 76, была построена единая кривая наиболее рационального подбора блочных фильтров (рис. 109).

Таблица 76

Рациональные соотношения коэффициентов фильтрации блоков и водоносных песков для подбора фильтров

k, м/сут	$k_ф^0$, м/сут	$\frac{k_ф^0}{k}$	k, м/сут	$k_ф^0$, м/сут	$\frac{k_ф^0}{k}$
2	300	150	25	2500	100
5	650	130	40	3600	90
10	1200	120	60	4800	80
15	1600	107			

Функция, изображающая данную кривую, может быть аппроксимирована зависимостью вида

$$k_ф^0/k = 185/\sqrt[5]{k}. \qquad \text{(IV.29)}$$

Решая это уравнение относительно $k_ф^0$, получим формулу для подбора фильтров блочного типа

$$k_ф^0 = 185k^{0,8} \qquad \text{(IV.30)}$$

или

$$k_ф^0 \approx 100k. \qquad \text{(IV.31)}$$

Зависимость (IV.29) косвенно подтверждает известное положение о том, что наибольший эффект от применения гравийного фильтра в скважине получается при его работе в условиях тонкои мелкозернистых песков. В более крупных песках влияние обсыпки на приток воды к скважине снижается, о чем свидетель-

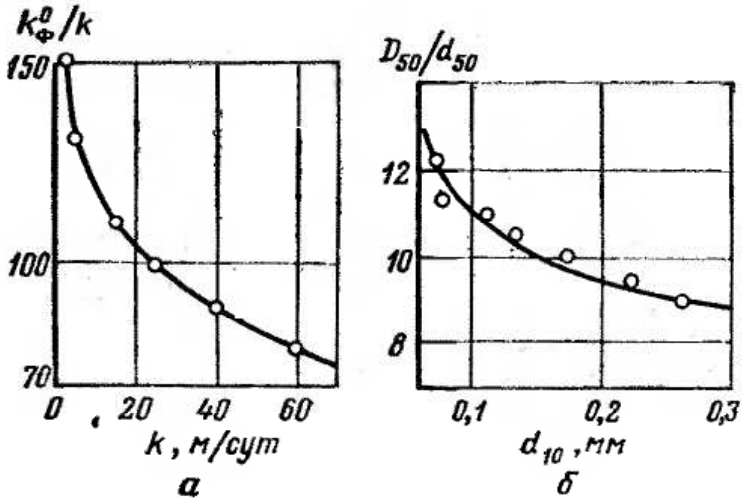


Рис. 109. Кривая для подбора фильтров гравийного типа:

а — для фильтров блочного типа; *б* — для фильтров с рыхлой гравийной обсыпкой

ствует уменьшение рационального соотношения $k_ф^0/k$ по мере приближения величины k к $k_ф^0$.

При пользовании кривой (рис. 109, *а*) для подбора фильтров блочного типа по известному коэффициенту фильтрации породы находим отношение $k_ф^0/k$ и затем необходимый для данных условий коэффициент фильтрации блоков $k_ф^0$. Проще $k_ф^0$ можно определить непосредственно по формуле (IV.30).

Принципиально зависимость (IV.30) может быть использована также и для подбора фильтров с рыхлой гравийной обсыпкой. Если перейти к соотношению диаметров частиц обсыпок и песков, учитывая, что их проницаемость пропорциональна квадрату эффективного диаметра слагающих частиц, то получим новую кривую для подбора гравийных фильтров (рис. 109, *б*), аналогичную кривой на рис. 109, *а*.

Рациональное отношение D_{50}/d_{50} в зависимости от d_{10}, как следует из графика, находится в пределах 9—12, что согласуется

с указанными выше рекомендациями для подбора гравийных фильтров.

Кривая на рис. 109, *б* с определенной степенью точности может быть использована также для подбора фильтров блочного типа.

§ 35. РАСЧЕТ ГРАВИТАЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Особенностью гравитационных фильтров является то, что размеры их водоприемных отверстий значительно превышают размеры песчаных частиц или частиц гравийной обсыпки. Таким образом, водоносный грунт или материал обсыпки, находящийся в водоприемных отверстиях, имеет свободную выходную поверхность, не перекрытую сетками или дырчатыми перегородками. В таких условиях при некоторых критических значениях скорости фильтрации $v_{кр}$ не связанные между собой частицы водоносной породы приходят во взвешенное состояние и, приобретая свойства плывучести, могут заполнить собой полость скважины.

Принцип работы гравитационных фильтров основан на уравновешивании фильтрационного потока, взвешивающего частицы водоносной породы и являющегося причиной выноса породы в скважину, силой тяжести фильтрующей среды. Следовательно, расчет гравитационных фильтров должен заключаться в определении в каждом конкретном случае допустимой входной скорости фильтрации. Зная величину $v_{доп}$ и суммарную площадь водоприемных отверстий фильтра, можно найти его пропускную способность

$$Q = Nfv_{доп}, \qquad \text{(IV.32)}$$

где N — число водоприемных отверстий на фильтре, расположенных ниже динамического уровня воды; f — площадь поперечного сечения одного отверстия.

Подставляя значение Q из формулы (IV.32) в выражение для расчета скважин получаем допустимую величину понижения уровня воды, которую необходимо знать при установлении режима эксплуатации скважин, оборудованных гравитационными фильтрами.

Исходя из условия равновесия силы тяжести (объемный вес песка в воде) и силы давления фильтрационного потока на единицу объема водоносного песка, Н. А. Карамбиров получил следующую формулу для определения допустимой скорости фильтрации воды через водоприемные отверстия гравитационного фильтра:

$$v_{доп} = \eta_1 \beta k (1 - n)(\gamma - 1), \qquad \text{(IV.33)}$$

где η_1 — коэффициент запаса, принимаемый равным $0{,}5 \div 0{,}7$; β — коэффициент, зависящий от угла α (рис. 110); значения коэффициента β берут по графику на рис. 110; k — коэффициент фильтрации породы или гравийной обсыпки, определяемый опыт

ным путем; n — пористость породы или гравийной обсыпки; γ — плотность породы или обсыпки.

Из анализа формулы (IV.33) следует, что $v_{доп} < k$, так как $\eta_1 = 0{,}5 \div 0{,}7$; $\beta \leqslant 1$ и $(1 - n)(\gamma - 1) < 1$. Это значит, что при работе гравитационного фильтра в мелкозернистых песках, имеющих небольшой коэффициент фильтрации, входные скорости будут очень малыми.

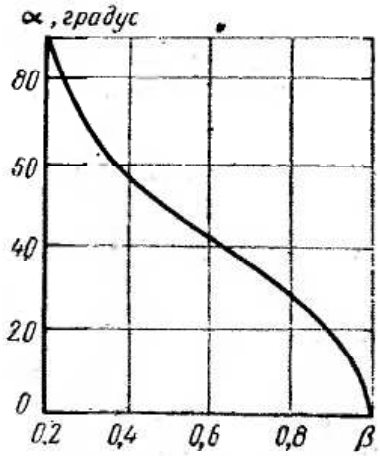


Рис. 110. График зависимости коэффициента β от угла α

Кроме того, приведенные расчеты позволяют представить зависимость (IV.33) в виде приближенной формулы для определения допустимой скорости фильтрации

$$v_{доп} \approx 0{,}6\beta k. \qquad \text{(IV.34)}$$

Производительность скважин, оборудованных гравитационными фильтрами, может быть значительно увеличена, если обсыпка фильтров будет из крупнозернистого материала (гравия). В этом случае для расчета допустимой входной скорости фильтрации берут исходные данные гравийной обсыпки k, n, γ. Крупность же гравийного материала подбирается согласно рекомендациям для подбора фильтров с гравийной обсыпкой.

§ 36. ПОДБОР ФИЛЬТРОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

До последнего времени распространенным является мнение о том, что требования к подбору фильтров наблюдательных скважин могут быть существенно снижены по сравнению с проектированием фильтров эксплуатационных скважин. Это связано с тем, что в большинстве случаев назначение наблюдательных скважин ограничивается обеспечением возможности регистрации изменения напора в водоносном пласте, вызванного каким-либо внешним возмущением (опытной откачкой, работой водозаборов или водопонизительных систем, проявлением естественного или искусственного подпитывания водоносных горизонтов и др.). При стационарном гидрохимическом опробовании водоносных пластов достоверность полученной пробы воды в общем случае обеспечивается при прокачках малопроизводительных скважин, что также ориентирует гидрогеологов на устройство наблюдательных скважин (пьезометров) относительно небольшого диаметра и без учета гидравлических потерь в фильтрах и прифильтровых зонах скважин.

Вместе с тем развитие методов опробования скважин при нестационарном режиме, оценка параметров пластов по данным об изменении уровня (напора) в реке (канале) и при колебаниях барометрического давления, оценка фильтрационных свойств

пластов методом характерных точек предъявляют особые требования к скорости реагирования наблюдательной скважины — пьезометра — на внешнее возмущение. При существенных сопротивлениях фильтров наблюдательных скважин уровень их изменяется с большим запаздыванием или вообще не колеблется [7]. Значительное влияние потерь напора в прифильтровых зонах и фильтрах наблюдательных скважин связано с тем, что уровень воды в них может изменяться только в результате притока или оттока воды в ствол скважины. Очевидно, даже при незначительных расходах этого потока величина искажения истинного пьезометрического напора может быть существенной. Влияние этого фактора на искажение кривых пьезометрического напора было исследовано Н. А. Огильви [65]. При этом величина искажения отыскивалась путем нахождения зависимости

$$Z = u(z).$$

Здесь $z = f(t)$ — функция, определяющая характер колебаний измеренного уровня воды в скважине и $Z = f(t)$ — изменение истинного пьезометрического напора подземных вод во времени. Разность этих значений определяет направление потока вблизи скважины: при $Z > z$ вода поступает в скважину, а при $Z < z$ она будет выходить из скважины.

Расход воды Q, из скважины вызывает изменение уровня воды, которое описывается формулой

$$Q = s\frac{dz}{dt}, \tag{IV.35}$$

где s — площадь сечения скважины на участке, где наблюдается изменение уровня воды.

Аналогично для притока воды в скважину из напорного пласта, согласно формуле Дюпюи, можно записать

$$Q = \frac{2\pi km}{\ln R/r_0}(Z - z). \tag{IV.36}$$

Сопоставляя выражение (IV.35) и (IV.36), получим

$$\frac{dz}{dt} = a(Z - z), \tag{IV.37}$$

где $a = 2\pi km/S\ln R/r_0$ (для совершенной наблюдательной скважины). Соответствующие значения a для несовершенных скважин и точечных пьезометров могут быть легко найдены.

При истинном пьезометрическом напоре подземных вод, изменяющемся по закону $Z = F(t)$, величина измеренного уровня воды в скважинах определяется линейным дифференциальным уравнением

$$Z' + aZ = aF(t), \tag{IV.38}$$

решение которого записывается в виде

$$z = a\,e^{-at}\left[\int e^{at}F(t)\,dt + C\right]. \qquad \text{(IV.39)}$$

Очевидно, что характер изменения уровня z, фиксируемого в наблюдательных скважинах и пьезометрах, зависит от вида кривой изменения истинного пьезометрического напора подземных вод, начального положения уровня воды в скважине и значения a.

Н. А. Огильви [65] рассмотрел ряд случаев изменения истинного пьезометрического напора подземных вод. При линейном изменении напора со скоростью v

$$Z = Z_0 + vt. \qquad \text{(IV.40)}$$

Соответствующее решение для напора, фиксируемого в скважине, записывается в виде

$$z = Z_0 + vt - \frac{v}{a} + aC\,e^{-at}. \qquad \text{(IV.41)}$$

Если при $t = 0$ уровень воды в скважине равняется истинному начальному пьезометрическому напору Z, то $C = v/a^2$ и уравнение (IV.41) представляется соотношением

$$z = Z_0 + vt - \frac{v}{a}(1 - e^{at}), \qquad \text{(IV.42)}$$

или

$$Z - z = \frac{v}{a}(1 - e^{at}). \qquad \text{(IV.43)}$$

Из выражения (IV. 43) следует, что при равномерном возрастании пьезометрического напора подземных вод разность между этим напором и измеренным уровнем воды в скважине будет увеличиваться, асимптотически стремясь к предельному значению $\alpha = v/a$. Величина α будет тем больше, чем больше скорость изменения уровня и чем меньше значение a, которое, в свою очередь, существенно уменьшается в скважинах со значительными гидравлическими сопротивлениями.

При равномерном возрастании уровня воды ($v > 0$) разности $Z - z$ будут положительными, т. е. измеренный уровень воды будет меньше истинного пьезометрического напора. При $v < 0$ разность $Z - z$ будет отрицательной и, следовательно, $z > Z$.

Более сложные зависимости между истинным пьезометрическим напором подземных вод Z и измеренным уровнем воды в скважине z получаются при измерении z по нелинейному закону. Если предположить изменение пьезометрического напора с $t = 0$ по закону

$$Z = Z_0 + A \sin 2\pi t/\tau \qquad \text{(IV.44)}$$

(A — амплитуда колебания; τ — период колебания), уровень воды в скважине будет меняться по закону

$$z = Z_0 + \frac{A}{1+v^2}\sin\frac{2\pi t}{\tau} - \frac{Av}{1+v^2}\cos\frac{2\pi t}{\eta} + \\ + \frac{A\,e^{-at}}{1+v^2} - (Z_0 - z_0)\,e^{-at}, \qquad \text{(IV.45)}$$

где $v = 2\pi/at$ — коэффициент снижения амплитуды колебаний; z_0 — начальный уровень воды в скважине.

При непрерывном процессе гармонических колебаний пьезометрического напора подземных вод уравнение (IV.45) примет вид

$$z = Z_0 + \frac{A}{1+v^2}\sin\frac{2\pi t}{\tau} - \frac{Av}{1+v^2}\cos\frac{2\pi t}{\tau}. \qquad \text{(IV.46)}$$

В соответствии с уравнением (IV.46) напоры воды в скважинах будут испытывать колебания с тем же периодом τ, но с уменьшенной амплитудой и будут сдвинуты по фазе. Данные о степени искажения фиксируемых пьезометрических напоров при линейном и синусоидальном изменениях уровня воды в пласте приведены в табл. 77.

Таблица 77

Параметры a для скважин и колодцев разного диаметра и коэффициенты искажения при линейном изменении уровня воды ($\alpha = a/v$) и синусоидальных гармонических колебаниях ($v = 2\pi/at$)

Тип наблюдательной скважины	Диаметр скважины, м	Параметр a		Коэффициент искажения α, при скоростях		Коэффициент искажения v при синусоидальных колебаниях уровня с периодами	
		1/ч	1/сут	$w = 1$ м/ч	$w = 1$ м/сут	$\tau = 1$ ч	$\tau = 1$ сут
Несовершенная скважина с длиной фильтра $l = 1$ м	0,250	1,48	35,5	0,676	0,065	4,25	0,177
	0,150	2,66	64,0	0,376	0,016	2,36	0,098
	0,100	5,65	135,0	0,177	0,007	1,10	0,046
Совершенная скважина, прорезающая слой мощностью 1 м	0,250	0,65	15,5	1,540	0,065	9,65	0,405
	0,150	1,67	40,0	0,600	0,025	3,77	0,157
	0,100	4,87	116,0	0,207	0,009	1,30	0,054

Примечание. Параметр a и коэффициенты искажения α и v рассчитаны при коэффициенте фильтрации пород $k = 1$ м/сут и $R = 50$ м. При других значениях k параметр a находится путем умножения приведенных в таблице цифр на k, а коэффициенты искажения α и v — путем их деления на k.

При сравнительно небольших линейных скоростях изменения напора в пласте ($w = 1$ м/сут) разность в фактическом и наблюдаемом положениях уровней может достигать сравнительно большой величины, измеряемой десятками сантиметров.

При синусоидальных колебаниях уровней степень искажения кривых пьезометрического напора, кроме того, может оцениваться сравнением амплитуд колебания пьезометрического напора при разных значениях v и $A_н$, отнесенных к амплитуде действительных колебаний пьезометрического напора. Величина $A_н$ рассчитывается по формуле

$$A_н = \frac{A}{1+v^2}(\sin \operatorname{arctg} 1/v + \cos \operatorname{arctg} 1/v). \qquad \text{(IV.47)}$$

Данные о соотношении амплитуд приведены в табл. 78.

Таблица 78

Соотношения амплитуд колебания уровня в пласте и скважине

v	$A_н/A$	v	$A_н/A$	v	$A_н/A$	v	$A_н/A$
0,01	1,000	1,00	0,707	4,00	0,243	8,00	0,124
0,05	0,998	2,00	0,427	5,00	0,196	9,00	0,110
0,10	0,995	3,00	0,316	6,00	0,164	10,00 *	0,100
0,50	0,813			7,00	0,141		

* При $v > 10$ отношение $A_н/A = 1/v$

Моменты наступления максимумов или минимумов наблюдаемых уровней воды в скважинах можно определить по уровню

$$t_{экстр} = k\frac{\tau}{2} - \frac{\tau}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{1}{v}. \qquad \text{(IV.48)}$$

Сдвиг фаз, соответствующий разности моментов наступления экстремальных значений наблюдаемых уровней и истинных пьезометрических напоров, будет

$$\omega = \tau\left(\frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{1}{v} - \frac{1}{4}\right). \qquad \text{(IV.49)}$$

Последнее уравнение показывает, что при возрастании v сдвиг фаз кривых истинных колебаний пьезометрических напоров и наблюдаемых уровней воды будет стремиться к четверти периода этих колебаний.

Анализ показывает, что при наблюдении уровня воды в скважинах происходит естественное выравнивание и сглаживание фиксируемых кривых. При этом полученные кривые будут

отражать только медленное изменение пьезометрического напора подземных вод, а быстрые колебания не будут фиксироваться. Достоверность полученных данных об уровнях подземных вод будет большей при медленных колебаниях уровня воды, использовании скважин малого диаметра, значительной водопроницаемости горных пород и малых сопротивлениях призабойной зоны и фильтра.

При неблагоприятном проявлении каждого из названных факторов искажение кривых напора неизбежно. Для получения точных данных о пьезометрических напорах необходимо, чтобы водоприемная часть скважины имела фильтрационные характеристики, близкие к параметрам водоносного пласта, а диаметр фильтра и надфильтровых труб должен приниматься по возможности небольшим. Однако последнее ограничение осложняет замер уровней, прокачку при гидрохимическом опробовании, непрерывную регистрацию уровней с использованием автоматических устройств.

Предложение Н. А. Огильви [65] об устройстве безынерционных приборов — манометров с датчиком давления, жестко фиксируемым в затампонированной скважине — весьма интересно. Наибольший смысл представляет проектирование устройств для опробования слабопроницаемых глинистых пород при прямом определении их фильтрационных характеристик в многослойных пластах. В общем же случае, вероятно, следует ориентироваться на создание относительно малоинерционных наблюдательных скважин и постоянно контролировать их состояние во времени.

При опробовании наблюдательных скважин наиболее приемлемы экспресс-методы, описанные в гл. II, а именно экспресс-налив, осуществляемый путем погружения под статический уровень емкостей с последующей регистрацией восстановления уровня или путем подкачки газа (воздуха) в скважину с герметизированным устьем. Критерием хорошей работы наблюдательной скважины (ее малой инерционности) является получение водопроводимости, близкой к водопроводимости пласта, или сопротивления, близкого к нулю. При значительных по абсолютной величине положительных сопротивлениях скважин их использование нецелесообразно, особенно при оперативном контроле за положением уровня грунтовых вод на мелиорируемых массивах, системах защиты территорий от подтопления, контроле действия систем защиты подземных вод от загрязнения и при решении других гидрогеологических задач.

Результаты опробования совершенных наблюдательных скважин экспресс-наливом обрабатываются по методике, изложенной в гл. II.

Возможен и учет инерционности наблюдательной скважины с целью внесения поправок в полученные данные об уровнях подземных вод [93].

При нестационарном режиме фильтрации, как указывалось выше, происходит водообмен между водоносным пластом и скважиной, расход которого $Q_{нс}$ определяется скоростью изменения

количества воды в скважине $v_{нс}$. При площади горизонтального сечения трубы скважины

$$\omega_с = \pi r_с^2, \quad Q_{нс} = \pi r_с^2 v_{нс}.$$

Для несовершенной скважины с фильтром, заглубленным не менее чем на полторы его длины, разность напоров $\Delta H_{нс}$ определяется соотношением

$$\Delta H_{нс} = \frac{Q_{нс}}{kl_0} = \frac{\pi r_0^2 v_{нс}}{kl_0}, \qquad (IV.50)$$

где l_0 — расчетный размер рабочей части скважины; при длине фильтра l и радиусе $r_с$

$$l_0 = 2{,}73l/\lg 0{,}7l/r_с. \qquad (IV.51)$$

Обозначив $\pi r_с^2/kl_0 = 1/\theta$, величину $\Delta H_{нс}$ можно представить в виде

$$\Delta H_{нс} = v_{нс}/\theta. \qquad (IV.52)$$

Следовательно, для оценки инерционности наблюдательной скважины необходимо определить θ, являющуюся комплексной характеристикой сопротивления скважины, а $v_{нс}$ представляет собой скорость изменения уровней в скважине. При этом истинный напор H в водоносном пласте при измеренном напоре $H_с$ в наблюдательной скважине будет

$$H = H_с + \Delta H_{нс}. \qquad (IV.53)$$

Для определения величины $\Delta H_{нс}$ можно воспользоваться приемом, предложенным В. М. Шестаковым. Для рассматриваемого случая опробования несовершенной наблюдательной скважины методом экспресс-налива (экспресс-откачки) изменение уровня после возмущения скважины описывается соотношением

$$H_0/H = kl_0 t/\omega_с, \qquad (IV.54)$$

где H_0 — высота начального столба воды в скважине при наливе, H — его текущая величина в момент времени t.

Из уравнения (IV. 54) графоаналитически путем построения зависимости в координатах $\ln H_0/H - t$ определяется θ, как уклон прямой, полученной по данным опробования. Для наблюдательной скважины, сообщающейся с пластом через забой, методика расчета остается прежней, только следует иметь в виду, что расчетный размер рабочей части скважины при ее диаметре $d_к$

$$l_0 = 5d_к. \qquad (IV.55)$$

Таким образом, с использованием (IV. 53) возможна оценка близкого к истинному положению уровня в наблюдательной скважине, даже при некотором дополнительном сопротивлении. Однако

следует отметить, что в этом случае в расчете $\Delta H_{нс}$ по формуле (IV. 52) должна приниматься скорость изменения уровня в наблюдательной скважине $v_{нс}$, на которой также неизбежно отразится величина гидравлического несовершенства скважины.

В частном случае при значительных сопротивлениях скважины, как указывалось выше, быстрое изменение уровня вообще не отразится на наблюдаемой кривой пьезометрического напора и погрешность в фиксируемых напорах весьма трудно определить. Поэтому при проектировании наблюдательных скважин следует исходить из требований, которые к ним предъявляются.

При необходимости обеспечения оперативного контроля за колебанием уровней грунтовых вод надо исходить из проницаемости фильтра, соответствующей его геометрической характеристике (в 5—10 раз превышающей проницаемость пласта). В специальных гидрогеологических работах, например при оценке параметров водоносного пласта по данным об изменении барометрического давления, эти требования должны быть еще более жесткими и определяться заданной точностью оцениваемых параметров. Если же предполагается с помощью наблюдательной скважины рассматривать относительно плавные изменения уровня, то проницаемость фильтра может быть в 2—3 раза выше проницаемости пласта. При долговременных наблюдениях за колебаниями уровней подземных вод необходим постоянный контроль за состоянием наблюдательных скважин, например опробование экспресс-наливом, так как погрешность в величине уровня может изменяться во времени. Такой контроль целесообразно осуществлять не реже 1 раза в год.

Специфическим является подбор фильтров наблюдательных (пусковых) скважин при индикаторных исследованиях. В главе II было показано, что применение индикаторов позволяет в лабораторных условиях оценивать коэффициент фильтрации фильтров различных конструкций. Очевидно, что результаты этих опытных работ могут быть использованы для определения степени искажения фильтрационного потока скважиной при индикаторных и резистивиметрических исследованиях.

ГЛАВА V

УСТАНОВКА ФИЛЬТРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ БУРЕНИЯ И ИХ ОСВОЕНИЕ

Установка фильтров в скважинах зависит от их конструкций и способов бурения. В настоящее время при сооружении скважин применяются три способа бурения:

ударно-канатный;

роторный с прямой промывкой забоя глинистым раствором;

роторный с обратной промывкой забоя чистой водой.

§ 37. УСТАНОВКА ФИЛЬТРОВ ПРИ УДАРНО-КАНАТНОМ БУРЕНИИ

При этом способе ствол скважины одновременно с бурением крепят обсадными трубами, а фильтры устанавливают под защитой труб с последующим их извлечением.

Когда обсадные трубы доведены до водоупора, фильтр спускают в ствол, очищенный от бурового шлама и песчаных пробок. В несовершенных скважинах, забой которых не доведен до водоупора, для предотвращения попадания в ствол скважины пород в виде пробки фильтр следует устанавливать под защитой обратного напора воды, создаваемого искусственной подкачкой, или под защитой временного глиняного тампона, сооружаемого в основании забоя скважины.

При бурении скважин ударным способом для отбора воды из рыхлых отложений, представленных породами различной крупности, применяются фильтры с водоприемными поверхностями из сеток, проволоки, просечного листа, перфорированных и щелевых каркасов, а также с гравийной обсыпкой и без нее.

Фильтры с сетчатым покрытием

При установке этих фильтров соотношение диаметров обсадных труб и фильтров может быть предельно минимальным. Например, при обточенных муфтах фильтры диаметром 168 мм могут устанавливаться в 219-мм трубах.

В скважинах с минимальным межтрубным зазором в случае каптирования песков плывунного характера при установке сетчатых фильтров возможно образование песчаных пробок и заклинивание фильтра в колонне. В результате этого при обнажении фильтр будет подниматься вместе с обсадной колонной. Для освобождения от заклинивания часто производится посадка фильтров с помощью забивных снарядов, однако при этом может

повреждаться сетка. Для предотвращения этих явлений рекомендуется в колонну подливать воду с целью создания обратного напора, а также размывать пробки путем подачи воздуха или воды в зазор между колонной и фильтром по трубам диаметром 12,7—25,4 мм. Это, как правило, приводит к положительным результатам.

Сетчатые фильтры можно устанавливать на колоннах того же диаметра либо впотай. Второй вариант более предпочтителен, так как он позволяет при необходимости заменять фильтры, однако это возможно не во всех гидрогеологических условиях. При установке фильтров впотай длина надфильтровой трубы должна быть такой, чтобы верхний ее край находился внутри рабочей колонны. Длина надфильтровой трубы зависит от того, в каких грунтах устанавливается фильтр и какая принята изоляция для защиты от проникновения песка в скважину по пространству между фильтром и рабочей колонной.

В мелкозернистых песках плывунного типа, в которых при бурении возникают песчаные пробки, надфильтровые трубы следует делать длиннее, чем в крупнозернистых и гравелистых песках. При установке фильтров в песках плывунного типа, когда для закрытия пространства между надфильтровой трубой и обсадной колонной применяют сальник или создают водяной столб для противодавления, надфильтровые трубы могут быть и более короткими. Однако эти трубы по СН 325—65 должны входить в рабочую колонну не менее чем на 3 м при глубине скважины до 50 м и не менее чем на 4 м при бо́льшей глубине.

Пространство между фильтром и обсадной колонной перекрывается сальником. В настоящее время применяются сальники различных конструкций, начиная от самых простых пеньковых до свинцовых. Широкое распространение получили сальники с резиновым уплотнением.

Как показал опыт эксплуатации, скважины с сетчатыми фильтрами работают, как правило, неудовлетворительно. Причиной является механическая заклинка фильтров и процессы электрохимической коррозии, возникающие вследствие применения в фильтрах металлов с различными электрическими потенциалами. Но на первом этапе эксплуатации играет роль механическая заклинка фильтров. Для борьбы с этим в некоторых организациях сетчатые фильтры галунного плетения устанавливали под защитой контура гравийно-песчаной обсыпки толщиной 50 мм на сторону. Результат оказался положительным. Такой эксперимент был проведен в скважинах Бернардинского водозабора в г. Вильнюсе при эксплуатации вод неустойчивого химического состава. В результате этого увеличился начальный дебит скважин, а также срок эксплуатации их более чем в 2 раза.

Данные наблюдений приведены в табл. 79.

Из приведенных выше данных следует, что применение контура гравийной обсыпки при всех конструкциях фильтров улучшает работу скважин и поэтому при установке фильтров необхо-

Таблица 79

Влияние контура обсыпки на продолжительность работы сетчатых фильтров

№ скважины	Максимальный дебит после строительства, м³/ч	Минимальный дебит на период наблюдения, м³/ч	Срок работы скважин, мес
Скважины с сетками галунного плетения			
18	85	12	20
19	70	8	20
16	43	7	19
15а	48	10	18
22	75	22	17
Скважины с сетками галунного плетения и контуром гравийно-песчаной обсыпки			
17	95	10	34
20	77	22	54
21	90	18	50
10а	95	15	39

димо стремиться к использованию песчаных или песчано-гравийных обсыпок.

В зависимости от гранулометрического состава водоносных пород и химического состава подземных вод сооружают гравийные фильтры с однослойной или многослойной обсыпкой.

Фильтры с однослойной гравийной обсыпкой

В зависимости от способа сооружения скважин однослойные гравийные обсыпки делятся на тонкослойные (толщина обсыпки 35—50 мм) и уширенного контура (толщина 75—100 мм и более).

Устройство тонкослойной гравийной обсыпки с помощью рабочих колонн. В скважинах глубиной до 100 м гравийные обсыпки производятся при подъеме рабочих колонн. Между их внутренней поверхностью и фильтровым каркасом засыпают гравий, подобранный в соответствии с гранулометрическим составом окружающих пород. В скважинах средних глубин обсыпка выполняется обычным способом, т. е. при свободном падении частиц гравия на забой через слой воды в межколонном пространстве.

Во избежание расслоения засыпки при оседании на забой рекомендуется гравий засыпать большими порциями, равными по объему и высоте намечаемого обнажения фильтра, т. е. 1—2 м. Колонны поднимают через несколько минут после того, как прекратиться шелестящий звук, издаваемый гравием при соприкосновении со стенками трубы во время его падения на забой.

Если зазор между обсадной и фильтровой колоннами на сторону составляет 100 мм и более, обсыпку фильтров можно

производить по вспомогательным трубам малого диаметра, опущенным на забой. По мере обсыпки фильтра трубы приподнимают.

При однослойной обсыпке следует иметь в виду, что объем гравия, определенный геометрическим расчетом, не совпадает с фактическим его потреблением, особенно при сооружении обсыпок в мелкозернистых песках, где наблюдается усадка и растекание гравия. При обсыпках рекомендуется иметь запас на 20—25% более расчетного.

Как показал опыт, тонкие гравийные обсыпки не обеспечивают надежной работы фильтров, поэтому стремятся делать обсыпки уширенного контура. Однослойные обсыпки уширенного контура можно сооружать одним из следующих способов.

Гравийная обсыпка уширенного контура при прокачке фильтра эрлифтом. Перед подъемом обсадных колонн в фильтр опускают эрлифт. Водоподъемная труба последнего находится на высоте 0,5 м от дна фильтра, где она остается весь период его обнажения. Обсыпка фильтра гравием производится при непрерывной работе эрлифта, во время которой на поверхность выносятся породы, проникающие в фильтр через обсыпку и каркас. Под влиянием выноса породы из прифильтровой зоны контур обсыпки расширяется (рис. 111).

Недостатком этого способа является то, что фильтрующая поверхность по мере обнажения фильтра увеличивается, а скорость водопритока уменьшается. Поэтому верхние участки гравийной обсыпки остаются слабо прокачанными и более тонкими, чем нижние. При таком способе устройства гравийных фильтров расход гравия увеличивается в 1,5—2 раза по сравнению с расчетным. Для прокачки применяются компрессоры производительностью 6—10 м³/мин с давлением, соответствующим глубине погружения труб эрлифта.

Однослойная гравийная обсыпка уширенного контура при прокачке фильтра «скользящим эрлифтом». Для улучшения образования контура гравийных обсыпок автором разработан и внедрен способ «скользящего эрлифта» (рис. 112). Особенностью этого способа является движущаяся эрлифтная колонна, которая перемещается внутри фильтра по мере его обнажения. Для этого эрлифт оборудуют следующим образом: на нижнем конце водоподъемной трубы устанавливают наконечник с водоприемной решеткой, закрытой снизу глухим фланцем. К низу фланца прикрепляют сальник, состоящий из нескольких слоев резиновых колец-прокладок. Резиновые кольца вырезают по внутреннему диаметру фильтра и прикрепляют с помощью второго фланца и болта к первому. Наконечник привинчивают к водоподъемной колонне и опускают на дно фильтра, при этом сальник плотно прижимается к внутренним стенкам.

После монтажа эрлифта обсадные трубы поднимают на высоту 1—1,5 м, обнажая установленный фильтр. Затем водоподъемную трубу закрепляют на обсадных трубах с помощью хомутов, после

чего в пространство между рабочей колонной и фильтром засыпают гравий и включают эрлифт. Подсыпают гравий на забой с таким расчетом, чтобы его запас над фрезером поднимаемой обсадной

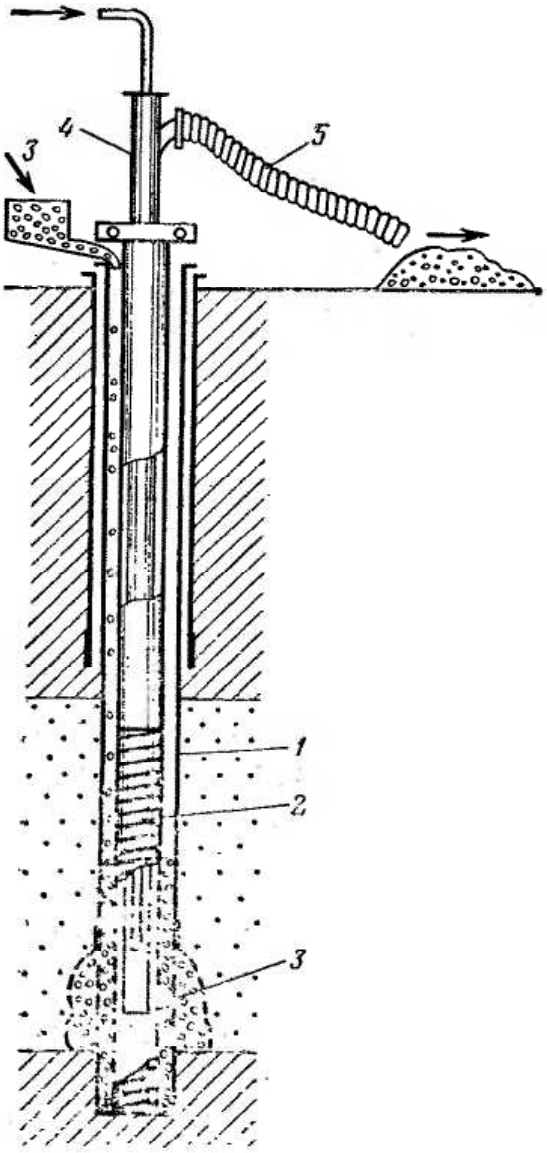


Рис. 111. Устройство однослойной гравийной обсыпки при помощи эрлифта:

1 — обсадная труба, *2* — фильтр, *3* — гравий, *4* — эрлифт, *5* — шланг

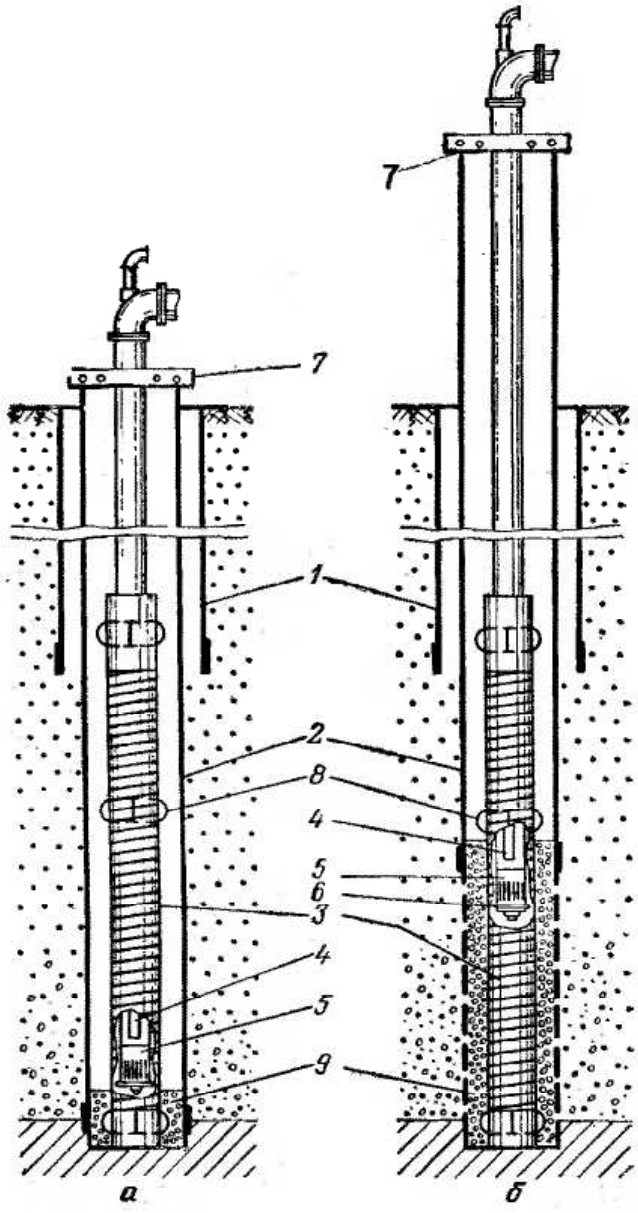


Рис. 112. Устройство однослойной гравийной обсыпки при помощи скользящего эрлифта:

а — начальная стадия; *б* — промежуточная стадия; *1* — кондуктор; *2* — обсадная труба; *3* — рабочая часть фильтра; *4* — воздушная труба; *5* — водоподъемная труба с решеткой; *6* — резиновый манжет с уплотняющим кольцом; *7* — хомут; *8* — направляющие фонари; *9* — гравийная обсыпка

трубы составлял не более 1,5—2 м. Состояние гравия в забое контролируется щупом.

По мере прокачивания фильтра происходит усиленный вынос породы и замещение ее гравием. После некоторого осветления откачиваемой воды обсадную колонну снова поднимают на 1—1,5 м,

и вместе с ней на эту же высоту перемещается эрлифтная колонна. Уплотняющий сальник изолирует прокачанный участок от вышележащего непрокачанного. Для прокачки фильтра по всей длине операции повторяются.

Как показывает опыт, расход гравия при данном способе устройства обсыпки увеличивается в 2,5—3 раза по сравнению с обычной засыпкой. Кроме того, мелкие частицы породы, закупоривающие гравийные обсыпки, уносятся более интенсивно.

Геометрический расчет количества гравия, израсходованного на засыпку, показывает, что контур гравийной обсыпки значительно расширяется и, следовательно, исключается необходимость применения колонн больших диаметров.

Для этих работ могут быть использованы компрессоры с подачей 3—5 м³/мин и давлением, соответствующим глубине погружения труб эрлифта.

Гравийная обсыпка при одновременном бурении скважин эрлифтом. Для ускорения темпов работ, снижения стоимости, сокращения диаметра буровых колонн, максимального расширения контура гравийной обсыпки и использования гравия разнозернистого состава автор предложил новый способ бурения, по которому в 1949—1950 гг. было построено несколько десятков буровых скважин.

Этот способ заключается в следующем. При подработке забоя в момент его обрушения наблюдается осевое перемещение пород, прилегающих к стволу скважин. Следовательно, если в какой-либо точке разреза вымывать породы и вместо нее на той же глубине искусственно вводить гравелистый материал, то можно увеличить фильтрационные свойства пород на данном участке, не обрушая вышележащие слои пород.

Опыт и практика подтверждают, что при гравийной обсыпке и увеличении ее контура входные скорости в процессе движения воды к фильтру уменьшаются, а тем самым ослабляются и суффозионные явления, а с увеличением толщины гравийной обсыпки требования к сортировке гравия могут быть несколько снижены.

Работы по предложенному способу ведут следующим образом: в начале бурения скважину закрепляют колонной большого диаметра (500 мм) в пределах пород, перекрывающих водоносный горизонт, или до верхней границы, где намечена установка фильтра. Затем опускают вспомогательную колонну труб диаметром на 150—200 мм меньше диаметра рабочей колонны.

Минимальный диаметр вспомогательной колонны должен быть не менее 200 мм. В ней монтируют эрлифт, состоящий из водоподъемной колонны диаметром 100 мм и воздушных 37-мм труб, которые, проходя в водоподъемную колонну через сальник, имеют центральное расположение. На нижнем конце водоподъемной трубы монтируется диффузор, диаметр которого на 50—75 мм меньше диаметра вспомогательной колонны, предназначенной для подсасывания грунта по всему периметру забоя (рис. 113).

Рабочая водоподъемная и воздушная колонны труб для спуска и подъема соединяются с лебедкой через систему блоков. Перед началом работ между колоннами рабочих и вспомогательных труб засыпают гравий на высоту 2—2,5 м, положение которого контролируется на забое. После подготовительных операций включается компрессор и грунт вымывается с забоя. По мере вымыва гравий из межтрубного пространства перемещается на забой; одновременно засыпают гравий в межтрубный зазор с поверхности

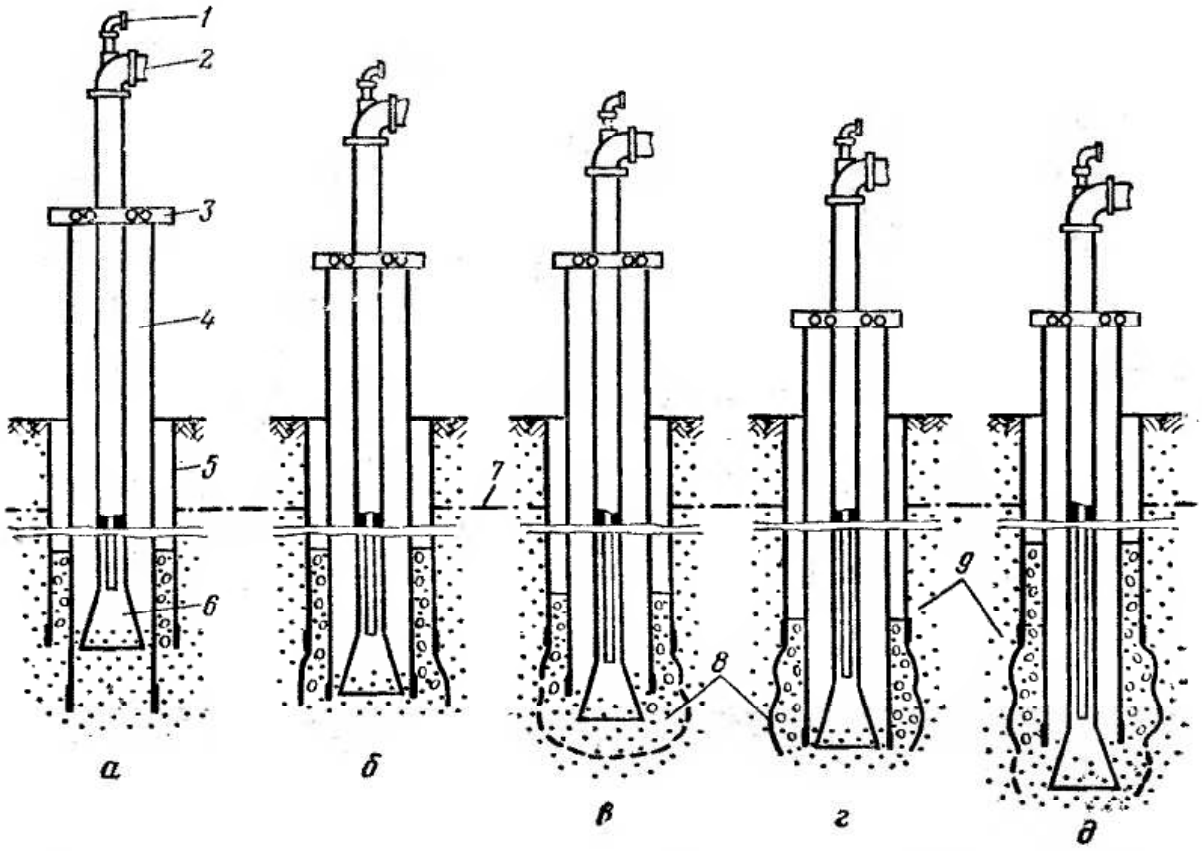


Рис. 113. Схема продвижения забоя и образования гравийной обсыпки при бурении скважины эрлифтом:

а — начальное положение; *б, в, г, д* — промежуточные положения: *1* — воздушная труба; *2* — водоподъемная труба; *3* — хомут; *4* — рабочая колонна; *5* — кондуктор; *6* — диффузор; *7* — уровень подземных вод; *8* — гравийная обсыпка; *9* — порода водоносного горизонта

земли. Для более быстрого продвижения гравия к забою целесообразно поворачивать вспомогательную колонну, используя для этого механические средства, например редукторную лебедку.

Дальнейшее погружение колонны производится после того, как эрлифтом вместе с водой начинает выбрасываться гравий, засыпаемый с поверхности. Это свидетельствует о том, что гравий заполнил межтрубное пространство до уровня диффузора трубы. Вымываемая порода отводится в сторону по шлангу, установленному на головке эрлифта; ее гранулометрический состав контролируется с помощью сит. По мере углубления забоя скважины наращивают обсадные, водоподъемные и воздушные трубы.

На рис. 114 представлена схема описанного выше способа бурения, на которой виден контур гравийной обсыпки, образовавшийся при проходке скважины. Бурить скважины этим способом можно при заранее известном разрезе пород.

Однослойная гравийная обсыпка уширенного контура при посадке фильтров с конусом. Этот способ установки фильтров

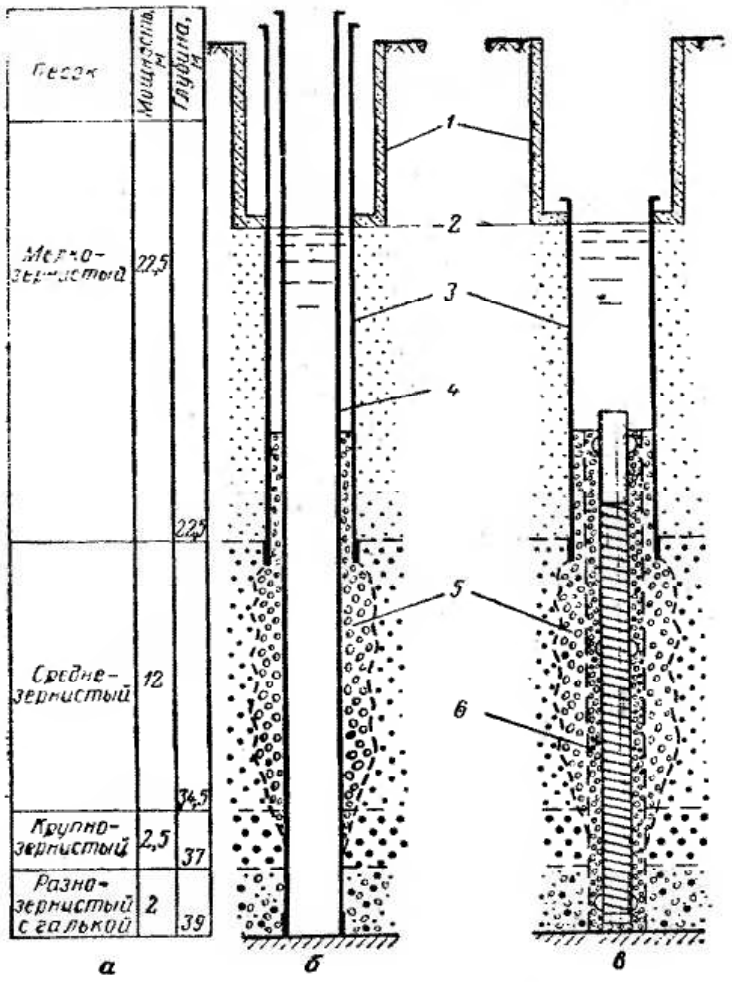


Рис. 114. Схема бурения скважины эрлифтом:
а — геологический разрез скважины; *б* — конструктивная схема скважины до установки фильтра; *в* — то же, после установки фильтра; *1* — шахта; *2* — уровень подземных вод; *3* — кондуктор; *4* — рабочая колонна; *5* — гравийная обсыпка первого слоя; *6* — гравийная обсыпка второго слоя

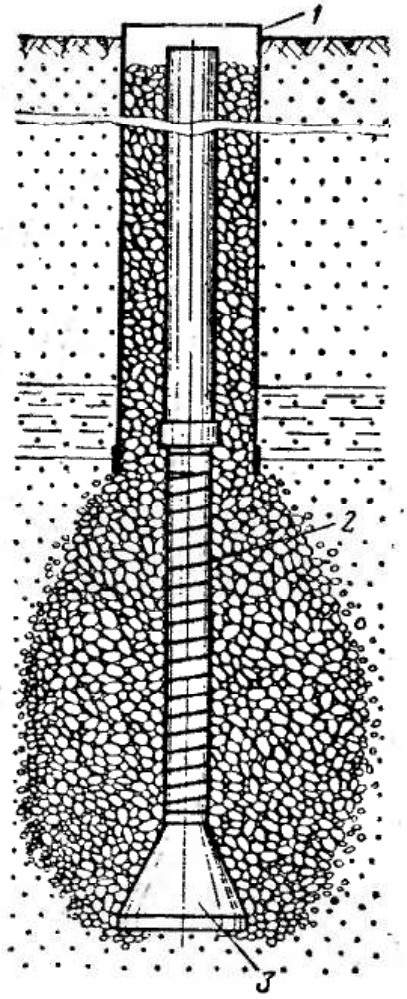


Рис. 115. Схема устройства гравийной обсыпки с применением башмака-конуса:
1 — обсадные трубы; *2* — фильтр на колонне труб; *3* — конический башмак

применялся при сооружении водопонизительных скважин в Подмосковном угольном бассейне и при бурении водозаборных скважин в подразделениях треста Промбурвод. Сущность метода заключается в следующем. До водоносного горизонта скважина закрепляется обсадными трубами (кондуктором) по возможности большого диаметра. После этого в скважину на надфильтровой колонне опускают фильтр, на нижнем конце которого установлен башмак-конус. Перед началом бурения пространство между фильтром и кондуктором засыпается гравием на высоту 2—3 м. Порода

с забоя удаляется желонкой через конус. При движении фильтровой колонны вниз одновременно на забой поступает гравий (рис. 115). Поэтому необходимо следить за положением гравия в кондукторе и поддерживать его уровень на 2—3 м выше нижнего края кондуктора, чтобы не допустить разрыва обсыпки.

По достижении проектной отметки в колонну подливают воду, где создается противодавление, забой очищается от породы до низа башмака-конуса, куда затем засыпается гравийная подушка.

После интенсивной прокачки и досыпки гравия в межтрубное пространство скважину сдают в эксплуатацию. Сооружение скважин этим способом происходит успешно при малых и средних глубинах и в водоносных горизонтах без глинистых слоев и пропластков, которые могут затруднить формирование гравия вокруг фильтров.

В тресте Промбурвод с 1968 г. этим способом ежегодно бурится 180—200 скважин глубиной до 70—80 м. Внутренний диаметр кондуктора (направляющие колонны) составляет 394 и 342 мм; в него опускают фильтры на трубах внешним диаметром 273 мм; на отстойнике фильтров имеется конус. По данным треста Промбурвод, бурение скважин с конусом рекомендуется при разности диаметров труб 100 мм.

Поскольку при бурении скважин с использованием башмака-конуса создается контур гравийной обсыпки, результаты бурения, как правило, положительные.

Сравнение описанных выше двух способов бурения показывает, что отличие заключается только в средствах удаления породы с забоя: эрлифт или желонка.

Для отбора воды из мелкозернистых и тонкозернистых песков в американской практике применяются фильтры с гравийной обсыпкой, причем у строителей как в СССР, так и в США проявляется одна и та же тенденция — стремление к увеличению периметра фильтрации и толщины обсыпки на внешней поверхности устанавливаемых фильтров.

В скважинах глубиной около 30 м фильтры рекомендуется устанавливать под защитой обсадной колонны, доведенной до водоупора. В данном случае гравийную обсыпку подбирают в полном соответствии с породами водоносного горизонта, обеспечивая равномерную обсыпку гравия около фильтра и надфильтровой трубы. Учитывая возможность некоторой усадки гравия в процессе прокачки рекомендуется иметь столб гравия над верхним краем рабочей части фильтра высотой примерно 1,8 м.

Для устройства фильтров в мелкозернистых грунтах при значительной глубине скважин применяется способ посадки фильтра с помощью конуса. При бурении эксплуатационных скважин этим способом необходимо иметь детальный геологический разрез на участке постановки фильтра, что определяется путем заложения разведочной скважины. Перед установкой фильтра породы до водоносного горизонта бурят ударным или вращательным способом.

Фильтр опускают в скважину на колонне, в нижней части которой навинчен конус-расширитель (рис. 116). При опускании фильтра конус доходит до породы и опирается на нее. В этот момент труба с фильтром должна быть подвешена на лебедке. Затем между обсадной и спускаемой колоннами засыпают гравий на высоту 1,2—1,8 м над конусом. По окончании засыпки гравия колонну освобождают и через спускаемую колонну извлекают породы.

По мере погружения фильтра в водоносные породы необходимо следить за тем, чтобы столб гравия над фрезером обсадной трубы сохранялся на высоте 1,5—1,8 м. При достижении проектной отметки следует закрепить фильтровую колонну и продолжать извлечение породы с забоя до тех пор, пока гравий не проникнет в конус, после чего конус надо зацементировать, а над верхним краем рабочей части фильтра гравийную обсыпку поднять на высоту 2,4—3 м. По этому способу рекомендуется устанавливать фильтры тяжелого типа, рассчитанные на давление, производимое весом спускаемой колонны.

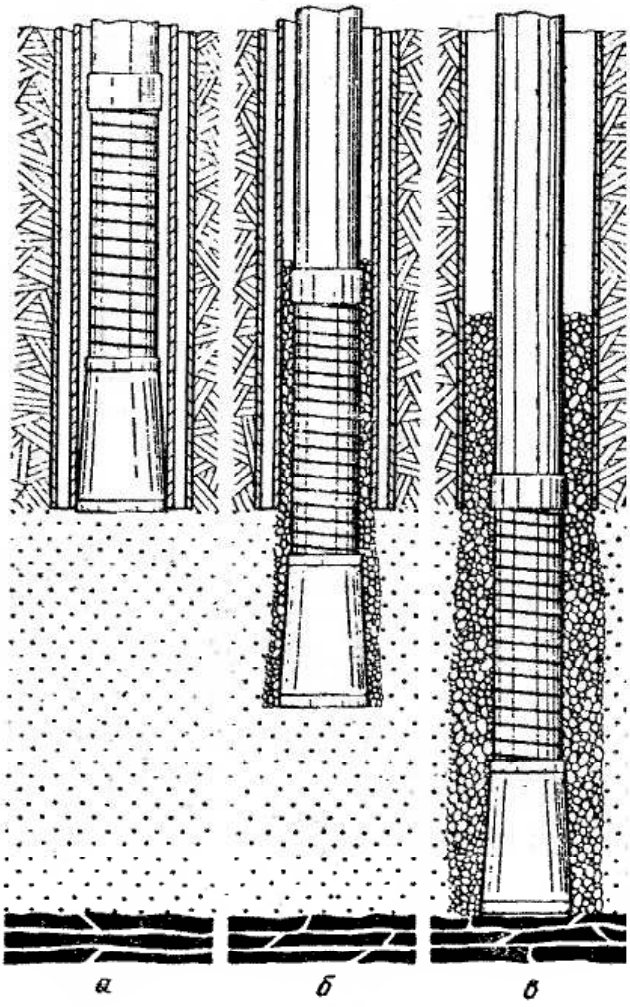


Рис. 116. Образование гравийной обсыпки с помощью конусов:

а — исходное состояние перед началом бурения через фильтр; *б* — промежуточное положение фильтра; *в* — скважина в законченном виде

Необходимо отметить, что толщина обсыпки зависит от угла наклона, образованного конусом с поверхностью трубы. Если надо увеличить толщину обсыпки, берется конус с большим основанием. Размер конуса при этом не должен быть более диаметра рабочей колонны, доведенной до водоносного горизонта.

Фильтр с однослойной гравийной обсыпкой уширенного контура, устанавливаемый при помощи вспомогательных скважин. Этот способ давно описан в американской литературе и не получил широкого распространения. Сущность его заключается в следующем: для увеличения контура гравийной обсыпки вначале бурят центральную скважину и оборудуют ее фильтром. Вокруг этой скважины на расстоянии 1—1,5 м бурят дополнительно четыре — пять скважин, в которые по достижении водоупора засыпают гра-

вий под защитой обсадных труб. После засыпки гравия извлекают обсадные колонны.

Сооружение кустовых скважин сложно и дорого стоит. По мнению некоторых буровых организаций, кустовые скважины должны оправдывать свое назначение при отборе воды из мелкозернистых и тонкозернистых песков со слабой водоотдачей.

Скважины такой конструкции пытались бурить во многих строительных организациях, но это были единичные случаи, что не позволяет делать какие-либо выводы. Массовое строительство скважин с однослойным контуром равийной обсыпки и расширенным контуром обсыпки, создаваемым при помощи четырех питательных скважин, было в тресте Промбурвод на одном из водозаборов в Курске, где за период 1962—1972 гг. по эксплуатационным скважинам накопился материал для предварительного обобщения и выводов.

В этих условиях бурили скважины средней глубиной около 45 м, где подошва водоносных мелкозернистых песчаных отложений залегала на отметке около 30 м. Скважины бурили ударным способом с посадкой труб диаметром 508 мм и оборудовали их проволочными фильтрами с трубчатыми каркасами диаметром 254—305 мм с контуром гравийной обсыпки. По 20 таким скважинам средний удельный дебит после ввода в эксплуатацию составил 4,16 л/с. По 57 скважинам диаметром 508 мм, оборудованным 305-мм фильтрами (с четырьмя скважинами диаметрами 325—426 мм для уширения контура гравийной обсыпки), дебит был несколько выше.

По данным Воронежского СМУ треста Промбурвод, скважин

с удельным	дебитом	(в	л/с):	до 5	9
»	»	»	»	от 5 до 10	21
»	»	»	»	от 10 до 15	15
»	»	»	»	от 15 и более	12

Таким образом, в скважинах с уширенным контуром гравийной обсыпки по сравнению с однослойной обсыпкой малого контура удельный дебит увеличился в 2—3 раза.

Анализируя опыт сооружения кустовых скважин, нельзя утверждать, что между каркасом фильтра и гравийным контуром питательных скважин, отстоящих от центральной скважины на 1—1,5 м, не осталось перемычки из мелкозернистых водоносных пород, а это, несомненно, может снижать производительность скважин.

Для проверки этих условий на Курских водозаборах в 1965 г. были пробурены скважины большого диаметра (около 1 м) с устройством однослойной обсыпки уширенного контура. Сооружение таких скважин значительно проще и дешевле, а дебит их приближался к дебиту кустовых скважин.

Для сопоставления Курского опыта с другими рассмотрим примеры бурения и сооружения гравийных фильтров при помощи вспомогательных скважин в Узбекистане.

Гравийные фильтры уширенного контура устраивали различными способами в Голодной степи для мелиоративных целей. По данным САНИИРИ, здесь были испытаны четыре способа сооружения гравийных фильтров: при помощи бурения вспомогатель-

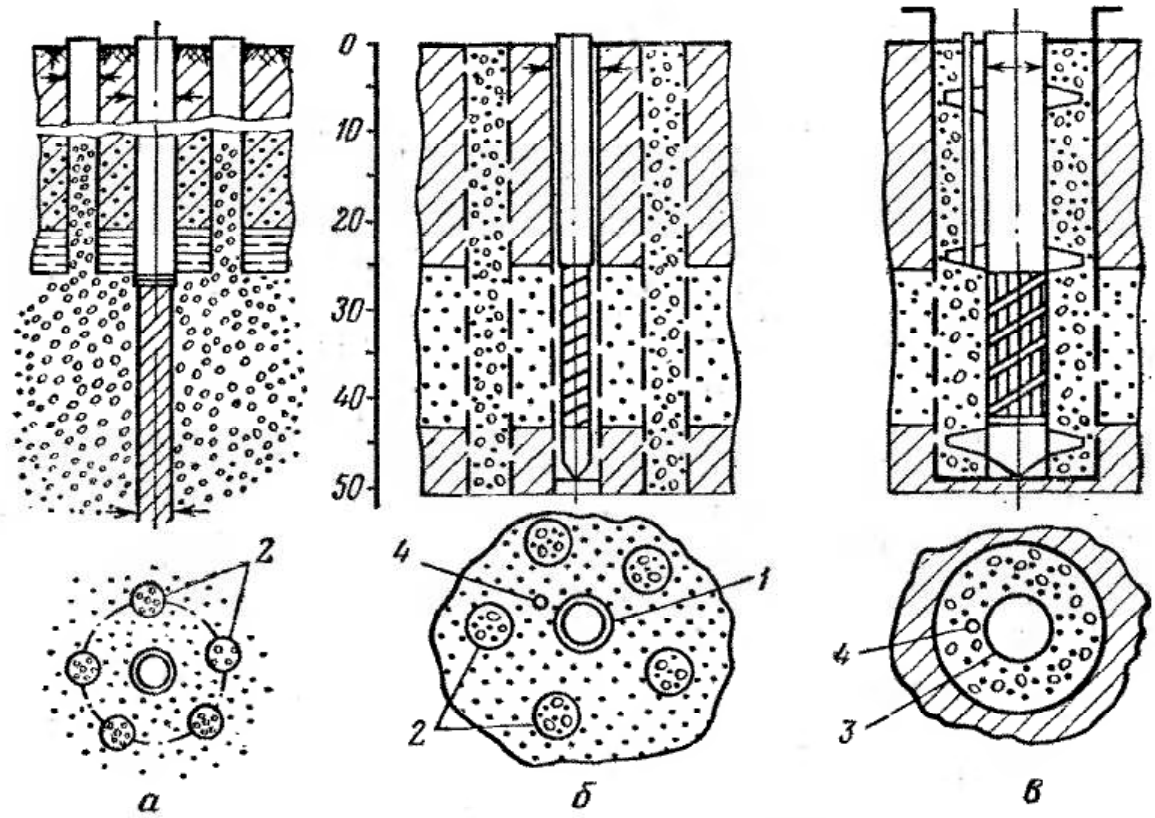


Рис. 117. Схема устройства гравийных обсыпок водопонизительных скважин в Голодной степи:

а — при помощи вспомогательных скважин, доведенных до кровли горизонта; *б* — при помощи вспомогательных скважин, доведенных до подошвы горизонта; *в* — при бурении одной скважины большого диаметра; *1* — центральная скважина с фильтром d = 426 мм; *2* — вспомогательные скважины для гравийной обсыпки d = 200 мм; *3* — скважина диаметром 800—1200 мм с фильтром d = 426 мм; *4* — пьезометры

ных скважин; при ударно-канатном бурении; при роторном с прямой промывкой забоя глинистым раствором при роторном с промывкой забоя чистой водой.

На рис. 117 представлена схема устройства гравийных обсыпок при помощи вспомогательных скважин, пробуренных роторным способом с обратной промывкой. Число пробуренных скважин превысило тысячу, и Х. Якубов, А. Абиров (САНИИРИ) обработали все экономические показатели по скважинам. Результаты обработки сведены в табл. 80.

Из этих данных следует, что сооружение гравийных фильтров при помощи вспомогательных скважин не только не имеет каких-либо преимуществ перед скважинами больших диаметров, но и

Таблица 80

Техническая характеристика и экономические показатели скважин, пробуренных различными способами

Показатели	Методы бурения и устройства обсыпных гравийных фильтров			
		скважины большого диаметра		
	роторный при помощи вспомогательных скважин	ударно-канатный	роторный с прямой промывкой забоя глинистым раствором	роторный с обратной промывкой водой
Общее число скважин	8	32	> 750	≈350
Продолжительность бурения, сут	10—15	8—12	4—6	2,0—3,0
Затраты гравия, м³	90—100	55—60	55—60	60—65
Продолжительность откачек, сут	20—30	5—10	5—10	3—5
Продолжительность строительства, сут	30—65	15—20	6—8	3—4
Удельный дебит, л/с:				
в тонкозернистых песках	3—4,5	—	3—4,5	3,5—5,0
в мелкозернистых песках	5,0—6,0	4,5—6,5	4,5—6,5	4,5—6,5
в гравелистых песках	—	8—15	8—15	10—22
Стоимость одной скважины, тыс. руб.	26,0	14,5	11,5	7,04

приводит к большим материальным затратам без существенного увеличения дебита скважин.

Дренажные скважины пробурены в Голодной степи, где водоносные горизонты представлены разнозернистыми песками. Средняя глубина скважин составляет 65—70 м.

Влияние подработки забоя на установку фильтров при ударном бурении

В буровой практике известны случаи, когда данные разведочного и эксплуатационного бурения не совпадают. Отличается описание проходимых пород, а также состав и мощность водоносных горизонтов, представленных песками.

При бурении обычно стремятся достичь проектной глубины скважины и мало интересуются скоростью проходки скважины на участке предполагаемой установки фильтра и объемом пород, который извлекается с забоя. Между тем эти два фактора, отображающие правильное строение водоносных горизонтов и правильную

установку фильтров, оказывают большое влияние на сооружение скважин.

В технологии бурения скважин на воду принято считать, что при ударном способе по сравнению с роторным при прямой промывке забоя можно более точно отбирать образцы пород, а также не нарушать характер напластования пород в разрезе, их мощность, механический состав и др.

Опыт бурения скважин и специальные исследования, поставленные Гидропроектом для выяснения влияния технологии бурения на структуру, состав и фильтрационные свойства пород водоносного горизонта, позволили установить, что при ударном способе часто изменяется характеристика пород в разрезе. Так, при строительстве земляной части плотины Куйбышевской ГЭС было пробурено несколько скважин при помощи желонки и рядом с этими скважинами на расстоянии 3—4 м на ту же глубину (до 20 м) тем же способом бурили скважины, но при создании обратного напора водой, наливаемой в обсадные трубы.

В скважине, которую бурили с наливом воды, было установлено около 19 прослоек пород различной мощности и крупности, в то время как в рядом стоящих скважинах отмечалось не более 6—7 прослоек. Было отмечено, что маломощные песчаные прослои (до 0,5 м) исчезали из разреза, а более мощные (до 1,5—3,0 м) увеличивались (до 2—5 м).

Рассмотрим этот процесс по схеме, представленной на рис. 118. Чтобы углубить скважину в водонасыщенных песках и закрепить ее трубами, необходимо очистить ствол до башмака труб и несколько выйти за него. В момент работы желонки в трубах происходит вакуумирование, в результате которого наблюдается подплыв породы к забою скважины. По мере наполнения желонки породой при ее извлечении создается вакуум и при выходе желонки из-под статического уровня уровень в скважине понижается, что создает разность напоров внутри скважины и ее стенкой. Оба эти фактора влияют на образование песчаных пробок, высота которых может достигать 8—10 м и более.

В этих условиях чтобы углубить скважину, необходимо очистить забой и извлечь из труб весь объем пород до забоя. Такая технология бурения ведет к излишней подработке забоя и изменяет характер пород водоносного горизонта.

Для примера приведем бурение скв. 279 на защитном дренаже в Ульяновске. Объем выбуренного пространства в скважине по расчету должен составить 5,2 м³, а фактический объем породы, извлеченной из скважины, — 45 м³, что в 8,7 раза превышает объем выработки по сравнению с расчетным. Это объясняется тем, что на глубине около 40 м вокруг ствола образовались воронки обрушения, нередко достигавшие в диаметре 4—6 м и глубины 3—5 м.

Большинство скважин, у которых при чрезмерной подработке забоя образовались воронки обрушения после установки фильтров

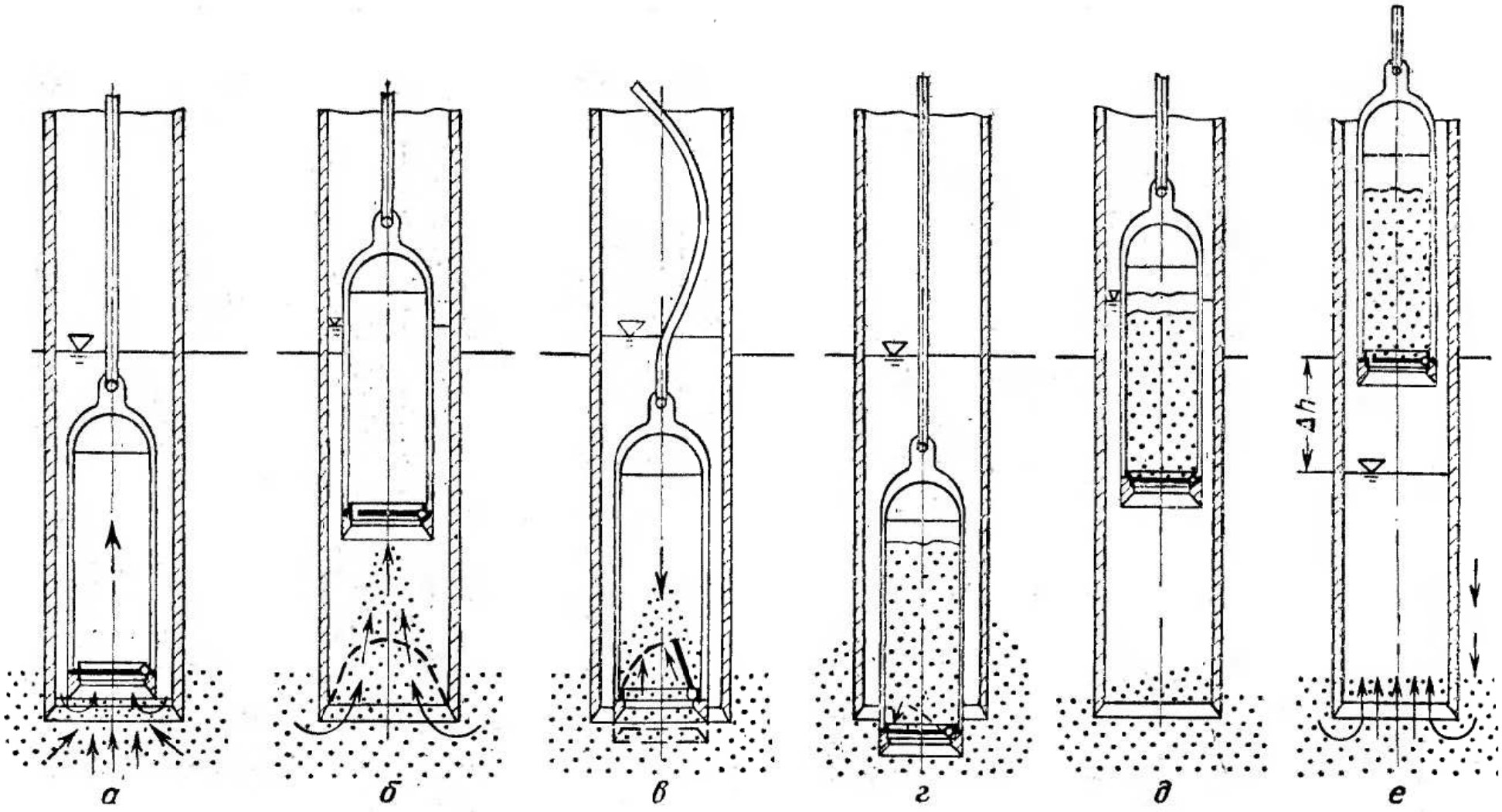


Рис. 118. Схема положения желонки в забое скважины при ударном бурении:

а, в, г — положение желонки при отборе пород с забоя; *б, д* — вакуумирование забоя при подъеме желонки; *е* — снижение напора воды при извлечении желонки

работало неудовлетворительно: наблюдалось снижение удельных дебитов, а нередко и длительное пескование.

Для получения истинного разреза выработки необходимо бурить скважины с таким расчетом, чтобы объем выбуренной породы приближался к геометрическому объему выработки. Только в этом случае может быть уверенность в правильности геологического разреза и механического состава пород, пройденных бурением. Однако хорошо известно, что объем выбуренной породы, как правило, во много раз превышает геометрический объем выработки. В этом случае возникает вопрос, в каких случаях и в каких пределах можно допускать подработку забоя скважин?

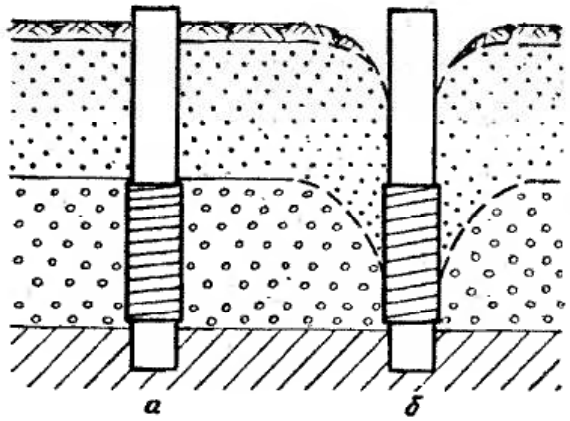


Рис. 119. Схема бурения скважины при залегании в кровле мелкозернистых песков:

а — нормальная посадка фильтра; *б* — излишняя подработка забоя

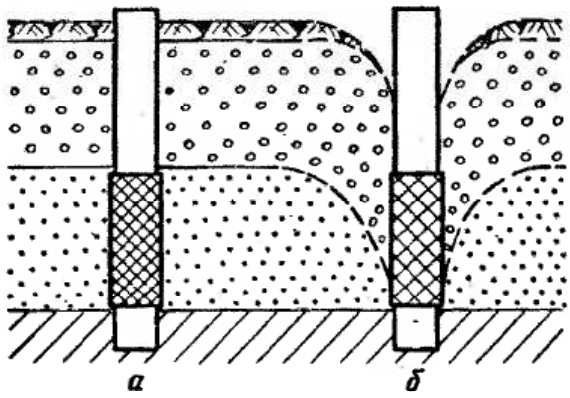


Рис. 120. Схема бурения скважины при залегании в кровле крупнозернистых песков:

а — нормальная посадка фильтра; *б* — излишняя подработка забоя

Рассмотрим несколько принципиальных схем строения водоносных горизонтов и проанализируем процессы, происходящие при бурении скважин в этих условиях.

Схема 1. Скважина заложена в породах, состав которых по вертикали существенно не изменяется. В этих случаях величина подработки забоя при бурении, установке или извлечении фильтра особого значения не имеет.

Схема 2. Скважина на воду пройдена в породах, верхняя часть которых представлена мелкозернистыми и глинистыми песками, а нижняя — крупнозернистыми (рис. 119). При подработке забоя в объеме, значительно превышающем геометрический объем ствола скважины, особенно на участке крупнозернистых песков, происходит оплывание мелкозернистых песков, что ведет к понижению фильтрационных свойств пород. Следовательно, в данных и подобных условиях целесообразны минимальное извлечение породы с забоя и большая скорость посадки труб на участке установки фильтра.

Схема 3. В верхней части разреза скважина вскрывает крупнозернистые пески, а в нижней — мелкозернистые (рис. 120). В этом

случае путем подработки и извлечения мелкозернистых песков надо сознательно идти на обрушение песков верхней зоны, ибо замещение мелкозернистых песков крупнозернистыми будет способствовать улучшению фильтрационных свойств пород на участке установки фильтра.

Схема 4. Разрез скважины на участке установки фильтра представлен чередованием крупнозернистых и мелкозернистых песков (рис. 121). В этом случае как при проходке скважины, так и при установке фильтра требуется учитывать порядок напластования пород водоносного горизонта, а также его мощность.

Таким образом, изменение характера напластования при ударном бурении зависит от объема извлекаемой породы и может оказывать положительное или отрицательное влияние на установку фильтров.

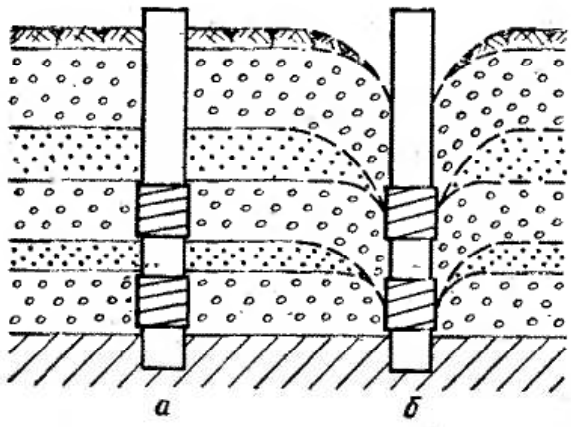


Рис. 121. Схема бурения скважины и положение пород при слоистом строении:

а — нормальная посадка фильтра; *б* — излишняя подработка забоя (смещение)

На изменение проницаемости прифильтровых зон в процессе бурения скважин различными способами давно было обращено внимание. Автору впервые в 1958 г. представилась возможность увидеть строение таких зон при вскрытии фильтров в водопонизительном котловане Волгоградской ГЭС и затем в 1963—1965 гг. — в водопонизительных скважинах Лебединского карьера КМА.

Опыт бурения скважин на КМА представляет большой интерес. В данных условиях по контуру рудного месторождения и в перемычках котлована было пробурено 155 скважин, которые на первом этапе оборудовали фильтрами для откачки воды насосами из сеноман-альбского водоносного горизонта. Были использованы трубы диаметром 425 мм, глубина скважин составляла 70—80 м. Устанавливали проволочные фильтры на щелевых трубчатых каркасах диаметром 250 мм с длиной рабочей части около 20 м. Фильтры устанавливали с контуром гравийной обсыпки.

По мере понижения уровня воды и снятия напора в пласте скважины, пробуренные на сеноман-альбский водоносный горизонт, добуривали по рудно-кристаллической толще и затем переоборудовали их сквозными фильтрами со сбросом воды в подземную галлерею самотеком.

Изменение строения прифильтровых зон на Лебединском карьере КМА изучалось в ВОДГЕО и ЦНИИГоросушение [38]. Ниже излагаются основные выводы, которые были получены при этих исследованиях.

В ходе сравнительного изучения прифильтровых зон было установлено, что строение и состав их в различных скважинах и в одних и тех же скважинах на разных уровнях вскрытия значительно отличаются. Однако в строении прифильтровых зон имеются некоторые общие черты, характерные для большинства исследованных скважин. Строение прифильтровых зон скважин, пробуренных ударно-канатным и вращательным способами, показано на рис. 122.

В большинстве случаев зоны обрушения имеют в плане овальную или округлую форму с размерами от 25—30 см до 1,7—1,8 м в поперечнике. Сложены они различными по литологическому составу породами, образующими вокруг фильтра концентрические слои. Строение зон обрушения в плане показано на рис. 123.

К фильтру скважин обычно примыкает гравийный слой мощностью 5—20 см, который состоит из обсыпки, пропитанной пластичным глинистым веществом. Как было выяснено, это вещество представляет собой дисперсную фазу глинистого раствора, использовавшегося при добуривании скважины в рудно-кристаллической толще, вследствие чего имеется некоторое количество рудного шлама. Глинистое вещество, прочно цементирующее гравий и гальку, содержится обычно в значительных количествах (до 60—70% по объему), в связи с чем водопроницаемость пород этой зоны уменьшается до ничтожной величины.

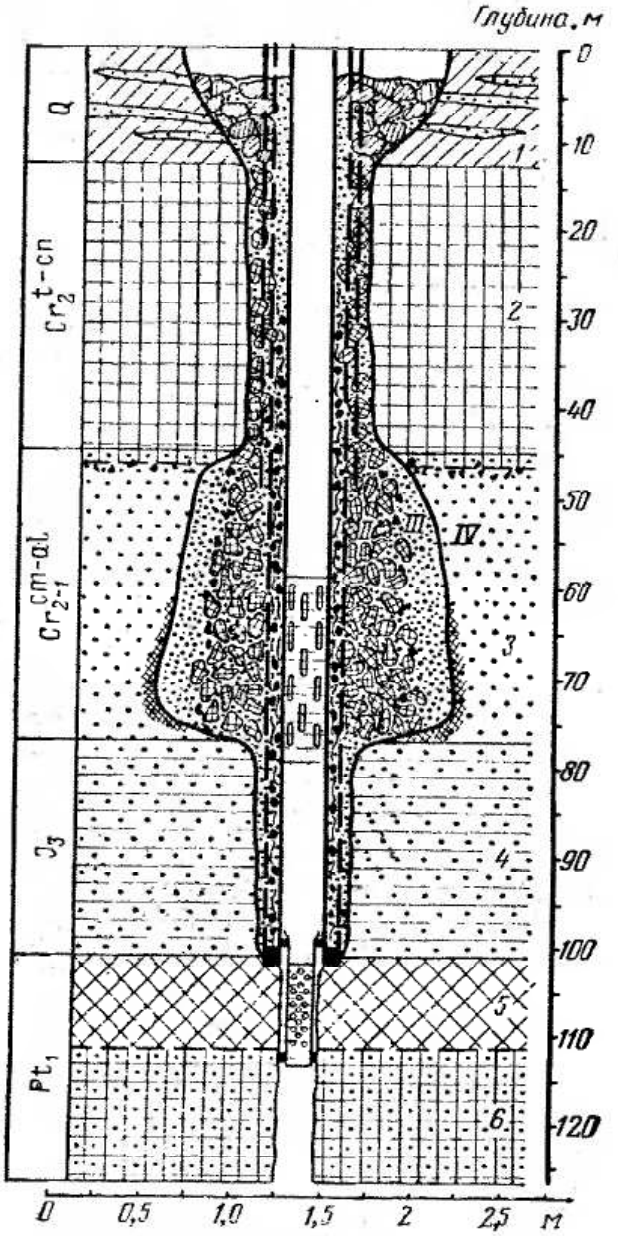


Рис. 122. Схематическое строение (в разрезе) зоны обрушения сквозных фильтров:

I — гравийно-галечниково-глинистый слой; *II* — карбонатно-песчано-глинистый слой; *III* — песчаный слой; *IV* — пески сеноманальбского водоносного горизонта за пределами зоны обрушения; *1* — суглинки; *2* — мел; *3* — песок; *4* — глины; *5* — руда; *6* — кристаллический массив

Лабораторное определение коэффициента фильтрации показало что он колеблется от 0,002 до 0,15 м/сут при напоре 4 кгс/см². Глинистый цемент прочно удерживает гравийную обсыпку, кото-

рая остается на фильтровых каркасах после их вскрытия. К этому слою примыкает второй, карбонатно-песчано-глинистый мощностью 30—70 см, также сложенный разнородным материалом: обломками мела и мергеля, сурки, темно-серыми сеноманскими песками, оползшими из верхней части разреза, и остатками глинистого раствора, проникшего сюда сквозь гравийную обсыпку при добуривании скважины. Содержание глинистого вещества

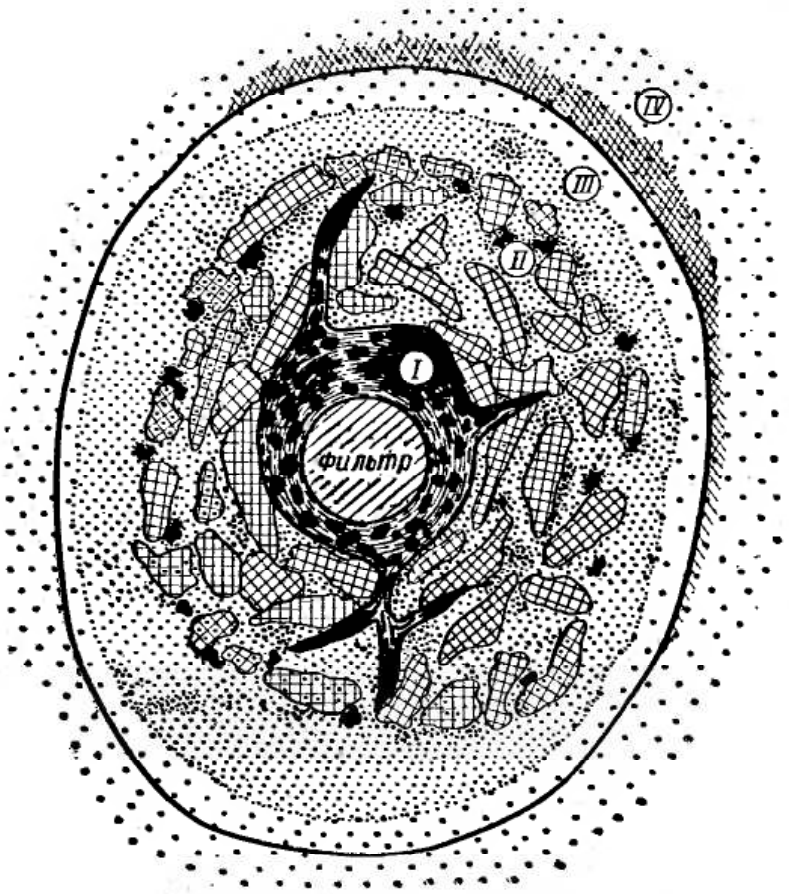


Рис. 123. Схематическое строение (в плане) прифильтровой зоны сквозных фильтров на глубине 20 м:
условные обозначения те же, что на рис. 122

в этом слое в целом невелико. Коэффициенты фильтрации песчано-карбонатного материала незначительны и составляют не более 0,2—1 м/сут при перепаде давления 4 кгс/см^2.

Третий слой, в отличие от первых двух, более однороден по составу и представлен темно-серыми сеноманскими песками, реже с примесью альбских песков. Толщина этого слоя колеблется обычно от 20—30 до 80 см, а коэффициент фильтрации изменяется от 2 до 10 м/сут. Пески третьего слоя граничат с песками водоносного горизонта, водопроницаемость которых составляет 9—15 м/сут. Часто вдоль контакта перемещенных и коренных пород отмечается незначительное ожелезнение.

Обследование вскрытой части фильтров показало, что кольматирующий глинисто-карбонатный материал перекрывает до 80—

90% рабочей поверхности фильтра; лишь кое-где на отдельных участках фильтра, обычно в его нижней части, выклиниваются первый и второй слои и в них образуются своеобразные «отдушины», через которые фактически и поступает в фильтр вода.

Формирование в прифильтровой зоне скважин глинистого и карбонатного слоев создает неблагоприятные условия для прохождения воды в фильтр, в результате чего фактические водопритоки сокращаются во много раз по сравнению с возможными.

Таким образом, анализ материалов по строению и составу прифильтровых зон показывает, что бурение водопонижающих скважин на Лебединском карьере КМА является достаточно убедительным примером применения технологии, созданной без учета геолого-эксплуатационных условий участка и требований, предъявляемых к вскрытию водоносного пласта.

Гравийные фильтры с многослойной обсыпкой

В водоносных породах, представленных мелкозернистыми песками со слабой водоотдачей, гравийные фильтры устраивают с двухслойной и реже с трехслойной обсыпкой.

Фильтры с двухслойными гравийными обсыпками устанавливают с помощью вспомогательных колонн. При оборудовании скважины в начальную колонну большого диаметра опускается вспомогательная колонна (рис. 124). Зазор между колоннами должен составлять не менее 50 мм на сторону. Для равномерного образования контура гравийной обсыпки вспомогательные колонны центрируют в колоннах предыдущего диаметра с помощью направляющих фонарей.

При сооружении скважин с многослойной обсыпкой начальный диаметр ее следует определять, исходя из диаметра каркаса фильтра и толщины слоев обсыпки. Например, для двухслойной обсыпки при диаметре каркаса фильтра 150—175 мм и толщине обсыпки каждого слоя 50 мм потребуется начальный диаметр рабочей колонны 350—400 мм. Толщина слоев гравийных обсыпок оценивается с учетом условий их работы: первый контур обсыпки, контактирующий с породой, является основным (фильтрационным), второй — вспомогательным (каркасным).

При подборе вспомогательных колонн для обсыпок надо стремиться к увеличению толщины слоя обсыпки внешнего контура. Так, при начальном диаметре скважины 450 мм и двухслойной обсыпке предпочтительнее опускать вспомогательную колонну диаметром 300 мм, а не 350 мм и устанавливать каркас фильтра диаметром 150—200 мм.

Скважины с многослойной обсыпкой сооружают следующим образом: водоносный горизонт перекрывают колонной труб большого диаметра до водоупора или до отметки предполагаемой установки фильтра. Когда водоносный горизонт не пройден, во избе-

жание подплыва забой тампонируют глиной на высоту 1—1,5 м после чего на глиняную пробку насыпают гравийную подушку высотой 0,5 м. В напорных водоносных горизонтах тампонаж осуществляется при обратном напоре, создаваемом путем закачки воды в ствол скважины.

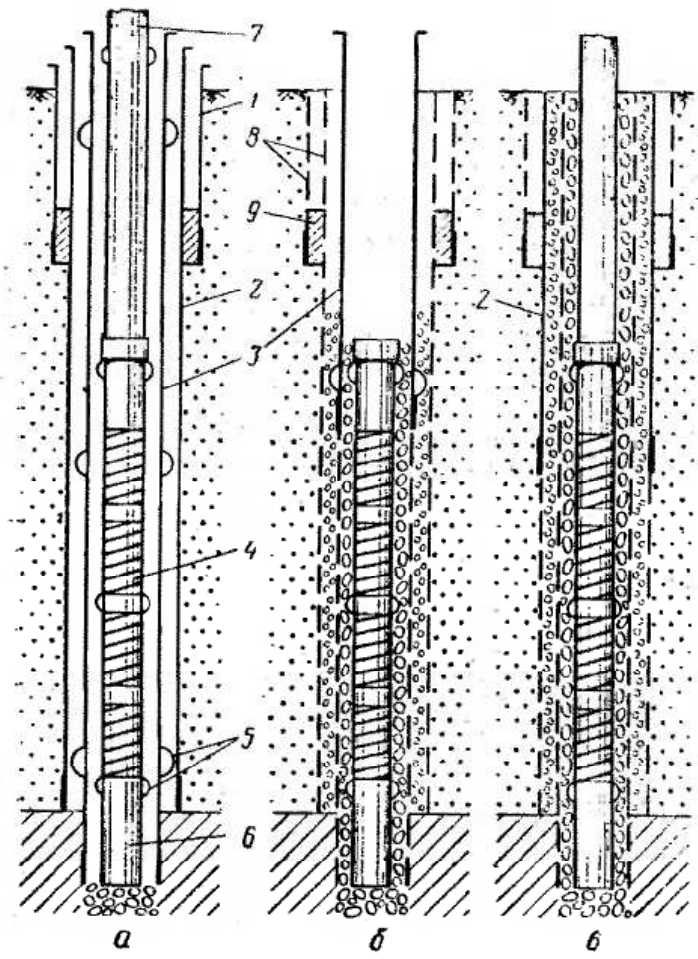


Рис. 124. Схема устройства фильтра с двухслойной гравийной обсыпкой:

а — состояние скважины перед началом работ по обсыпке фильтра гравием; *б* — конструкция скважины, из которой извлечены все трубы за исключением труб малого диаметра; *в* — конструкция скважины, предусматривающая возможность повторной установки фильтра; *1* — кондуктор; *2* — рабочая колонна; *3* — вспомогательная колонна; *4* — фильтр; *5* — направляющие скобы; *6* — отстойник; *7* — надфильтровая труба; *8* — след вспомогательных колонн; *9* — глиняный тампонаж

При обнажении фильтра колонны поднимают последовательно от периферии к центру скважины — от большого диаметра к меньшему. Когда устанавливают короткие фильтры (до 10 м), обсадные трубы поднимают поочередно, начиная с большого диаметра, одновременно на всю высоту рабочей части фильтра. Если длина фильтра достигает 15—20 м, колонны поднимают последовательно по частям: вначале на 7—10 м поднимают основную колонну, затем вспомогательную и далее операция повторяется.

Состояние гравия в забое контролируется щупом во избежание заклинивания поднимаемых колонн.

Скважины, в которых устанавливают фильтры с трехслойной гравийной обсыпкой, сооружаются так же, как и с двухслойной обсыпкой, но такие фильтры применяются редко.

Указанные способы сооружения гравийных фильтров с многослойной обсыпкой пока трудоемки, громоздки и дороги. Однако при механизации всех процессов бурения (включая посадку труб) и правильной организации труда выполнение этих работ можно значительно ускорить и удешевить. Некоторые скважины глубиной до 52 м с начальным диаметром 600 и конечным 500 мм сооружались Бурводстроем в течение 14 дней при неполной двухсменной работе. Чистое бурение по некоторым скважинам составляло 40—45 ч.

§ 38. УСТАНОВКА ФИЛЬТРОВ В СКВАЖИНАХ, ПРОБУРЕННЫХ РОТОРНЫМ СПОСОБОМ

В настоящее время при бурении скважин на воду применяются две схемы:

а) бурение с прямой промывкой, при которой глинистый раствор под давлением подается на забой скважины по бурильной колонне, а разрушенная порода поднимается на поверхность восходящим потоком жидкости, циркулирующим между стенкой скважины и бурильной колонной (штангами), при этой схеме применяются высоконапорные насосы производительностью до 17 л/с и более с давлением 80—100 кгс/см^2;

б) бурение с обратной промывкой, при которой глинистый раствор или вода подается на забой между стенкой скважины и бурильной колонной, а разбуренная порода поднимается с забоя по трубам бурильной колонны; при этом способе применяются вакуумные насосы или эрлифтные установки.

Для оборудования скважин в основном применяются фильтры тех же конструкций, что и для скважин, пробуренных ударным способом.

Установка и освоение фильтров в скважинах, пробуренных роторным способом с прямой промывкой забоя глинистым раствором

При бурении скважин роторным способом глинистый раствор проникает в водоносные породы, а при гравийных обсыпках в стволах, заполненных раствором, происходит кольматаж глинистыми частицами, поэтому восстановление проницаемости призабойных или прифильтровых зон скважин является сложной технической задачей.

Установка фильтров в водозаборных скважинах, пробуренных роторным способом с промывкой глинистым раствором, относится к числу наименее разработанных буровых операций.

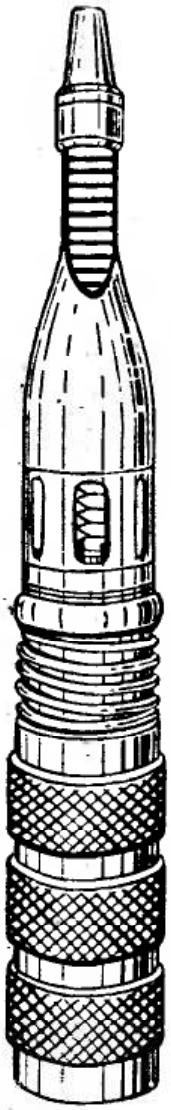
В работе [82] приведены десять методов разглинизации, разделенных на две основные группы: внутреннюю и наружную, но без критического анализа и рекомендаций по выбору наиболее рациональных схем. Такое деление способов, как нам кажется, является несколько искусственным, не отражающим физической сущности процесса разглинизации, так как способы «внутренней» и «внешней» разглинизации преследуют одну цель — разрушение глинистой корки на внешнем контуре фильтра в области его сопряжения с породой. С этой точки зрения, все рекомендуемые способы разглинизации скважин на воду было бы правильнее разделить на три основные группы:

а) понижение гидростатического напора и повышение пластового давления в призабойной зоне в контуре выработки — желонирование (тартание) и прокачка эрлифтами;

б) механическое и гидравлическое воздействие на призабойную зону — поршневание; обрушение забоя, промывка пакерами; законтурная промывка;

в) химическое воздействие на призабойную зону для снижения прочности поверхностной энергии глинистых и коллоидных частиц.

Не следует думать, что тот или иной способ разглинизации обязательно должен приводить к положительным результатам.



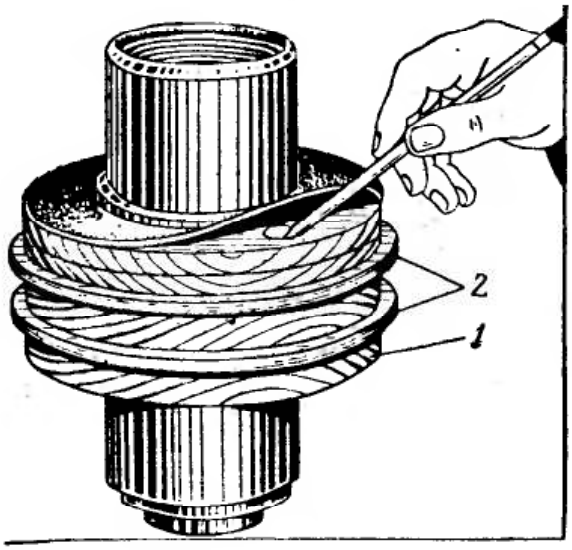


Рис. 126. Поршень деревянный для очистки фильтров:

1 — деревянные диски; *2* — резиновые прокладки

Рис. 125. Поршень стальной с резиновыми манжетами для разглинизации скважин

Часто их следует применять в комбинации. Например, в начале забой подрабатывается желонкой для обрушения корки заглинизированных пород, а затем проводится прокачка и т. д.

Освоение скважины, пробуренной роторным способом с промывкой глинистым раствором, производится после того, как скважину оборудуют эксплуатационной колонной и фильтрами. На первом этапе освоения скважину промывают и заменяют глинистый раствор чистой водой. Эта операция позволяет снизить давление на водоносный горизонт. Все дальнейшие операции ведутся с обязательным наблюдением за положением и скоростью восстановления уровня воды в скважине, на основании которого устана-

вливается наличие гидравлической связи между скважиной, водоносным горизонтом и степенью разглинизации.

В практике освоение и разглинизация скважины обычно начинаются с простейших методов.

Тартание. Этот прием заключается в том, что в скважину опускается удлиненная желонка, диаметр которой на 50 мм меньше диаметра рабочей колонны и фильтра. Производя желонирование и удаляя песок из отстойника, а также отбирая воду из ствола скважины, можно создавать большие напорные градиенты у наружной стенки фильтра, в результате чего будет происходить разглинизация пород водоносного горизонта. Производить тартание рекомендуется в течение 2—3 смен.

Свабирование. Для разглинизации в скважину на канате опускается тяжелая болванка с резиновыми манжетами, либо поршень на бурильных трубах (рис. 125, 126). Снаряд располагается выше фильтра, а ход поршня снаряда в зависимости от высоты вышки или мачты станка может находиться в пределах 8—10 м и более.

Глинистая корка разрушается под воздействием создаваемых давлений и разрежений, которые создаются при движении поршня вниз и верх.

При оборудовании скважины сетчатым фильтром возможно его повреждение, так как под влиянием вакуума сетка продавливается в фильтр через перфорационные отверстия.

При установке щелевых фильтров, штампованных и трубчатых поршень может входить и в рабочую часть фильтра. На эту операцию обычно затрачивается 1—2 смены, после чего скважина прокачивается эрлифтом до полной очистки фильтра от осадков.

По данным фирмы «Джонсон», для освоения и разглинизации скважин применяются поршни (качающиеся плунжеры) следующих размеров:

Размер поршня		Масса поршня, кг
дюйм	мм	
6	152,4	550—600
8	203,2	700
10	254	800
12	304,8	1000

Зазор между деревянными дисками, а также манжетами из транспортерной ленты и внутренним диаметром трубы должен быть в пределах 12—13 мм; при стальных дисках зазор увеличивается до 25 мм.

Прокачка скважины поршнями должна производиться с балансира ударно-канатного станка или с лебедки с амплитудой 20—25 качаний в 1 мин в течение 15 мин на каждый участок прокачки

фильтра. Прокачка ведется сверху вниз. Через определенные промежутки времени поршень извлекают и замеряют количество песка, внесенного в фильтр. Если песок занимает 1,5—2 м по высоте фильтра, то песок извлекают и это регистрируется на диаграмме освоения скважины.

По окончании первого этапа освоение производится второй этап, при котором поршень движется со скоростью 30—35 каче-

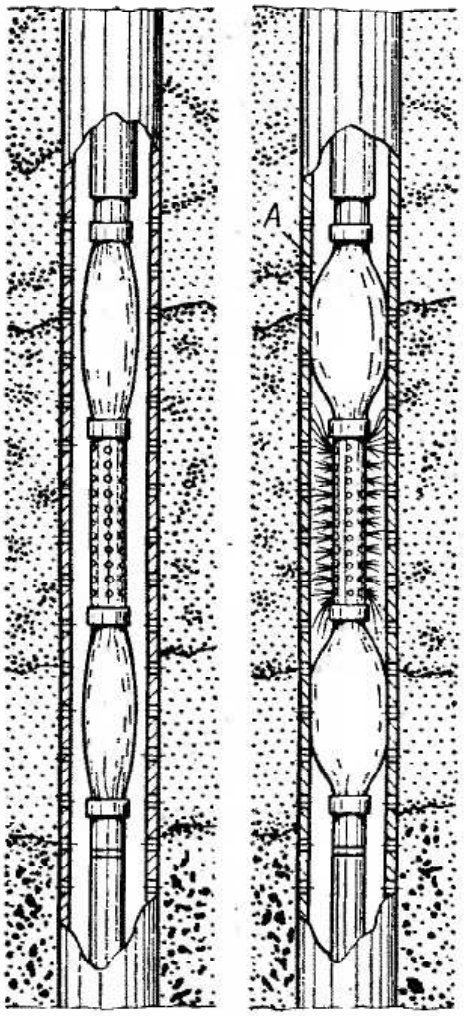


Рис. 127. Гидравлический ерш для очистки фильтров

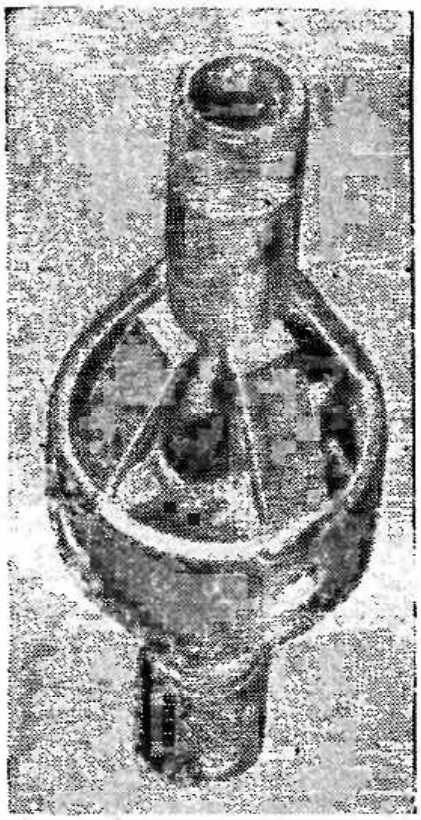


Рис. 128. Приспособление для гидравлической промывки фильтров

ний в 1 мин. Иногда прокачка фильтра осуществляется в три этапа. Обычно количество песка, проникающего в фильтр, уменьшается от этапа к этапу.

В процессе освоения скважины поршневанием для разрушения глинистого кольматанта целесообразно использовать полифосфаты (гексаметофосфаты натрия, триполифосфат), которые вливают в скважину из расчета 1,5 кг порошка на 200 л воды. Полифосфаты разрушают комплексы и способствуют лучшему диспергированию глин.

Окончательное освоение скважины должно производиться насосами.

Американские методические указания относятся к установке проволочных фильтров без гравийной обсыпки, когда формирование естественных фильтров происходит за счет самих пород водоносного горизонта.

Разглинизация фильтра с помощью гидравлического ерша. Данный способ заключается в том, что в скважину на бурильных трубах опускают ерш из стальной проволоки. Внутри него размещены сопла для подачи воды под давлением с помощью бурового насоса (рис. 127).

Фильтр разглинизируется позонно. Для этого ерш имеет две уплотнительные резиновые манжеты, ограничивающие участок обработки. В процессе обработки ерш поднимается и опускается в пределах длины рабочей части фильтра, когда струи воды промывают его боковую поверхность. Перед спуском ерша в скважину для предупреждения заклинивания его необходимо проверять ствол скважины шаблоном.

При проектировании гидравлического ерша следует учитывать что скорость воды на выходе из сопла должна быть не менее 45 м/с, а разность между диаметрами ерша и фильтра должна быть в пределах 25—40 мм.

В практике бурения в США боковая гидравлическая промывка фильтров проводится при помощи головок, опускаемых на трубах, которые позволяют одновременно подавать воду под большим давлением и прокачивать скважину с помощью эрлифта для удаления вымываемых частиц пород со стенок фильтра (рис. 128).

Указанные выше методы освоения скважин выполняются через внутреннюю полость фильтра. При роторном бурении происходит глинизация пород водоносного горизонта за контуром фильтра и тогда приходится прибегать к методам воздействия на пласт во внешнем контуре.

Разглинизация фильтров через промывочные окна. Настоящий метод разработан в Краснодарской комплексной гидрогеологической экспедиции В. И. Блажковым и широко пропагандируется ВСЕГИНГЕО [16] как самый эффективный метод разглинизации.

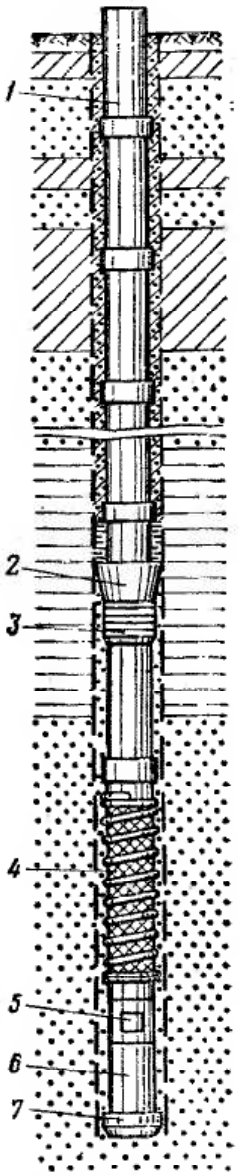


Рис. 129. Схема установки для разглинизации фильтра через промывочные окна:

1 — надфильтровая труба; *2* — брезентовый сальник; *3* — обмотка сальника; *4* — сетчатый фильтр; *5* — промывочное окно; *6* — отстойник; *7* — пробка

Разглинизация скважин по предложенному способу производится после выполнения следующих подготовительных работ. После вскрытия водоносного горизонта и каротажных работ для выбора интервала установки фильтра в скважину, заполненную

глинистым раствором, на трубах опускают фильтр. В нижней его части, в отстойнике, устанавливают ниппель, в котором прорезаны окна для разглинизации. Прокачка скважины производится с помощью эрлифта, желонки или гидроэлеватора. На рабочей колонне выше фильтра устанавливают брезентовый сальник. Перед спуском фильтра в скважину сальник заполняют густым глинистым или цементным раствором. Такой сальник надежно изолирует водоносный горизонт от вышезалегающих пород. В этих же целях может быть проведена манжетная цементация. Схема установки фильтра для разглинизации этим способом показана на рис. 129.

Глубина спуска эрлифтной колонны для откачки рассчитывается по плотности раствора и с учетом мощности

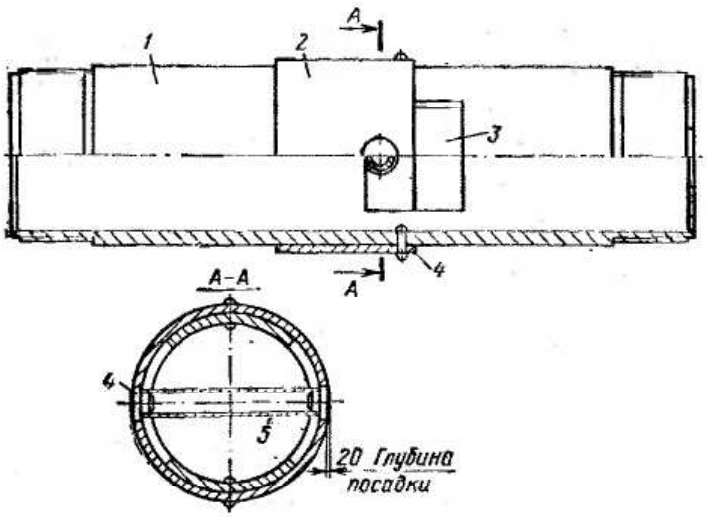


Рис. 130. Ниппель с промывочными окнами:
1 — корпус; *2* — подвижное кольцо; *3* — окно; *4* — заклепка; *5* — перемычка

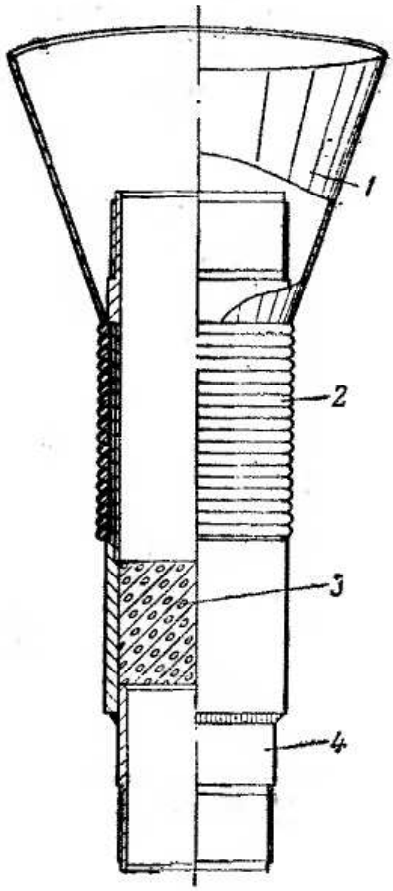


Рис. 131. Устройство брезентового сальника:
1 — брезентовый сальник; *2* — проволочная обмотка; *3* — цементная пробка; *4* — переходник с резьбой

компрессора. По мере прокачки эрлифтная колонна опускается и останавливается на уровне промывочных окон.

Откачка с помощью эрлифта в комбинации с пульсирующим режимом создает резкие перепады давления внутри скважины и за ее контуром, вследствие чего разрушаются породы за стенкой скважины и оплывающий песок вместе с остатками глинистого раствора откачивается через промывочные окна.

В процессе откачек глинистый раствор заменяется чистой водой, поступающей через фильтр и промывочные окна.

По окончании откачки эрлифтная колонна опускается в отстойник фильтра, ударяет по перемычке, сбивает контрольные шпильки

и закрывает промывочные окна предохранительным кольцом (рис. 130).

При каптаже одной скважиной нескольких водоносных горизонтов процесс разглинизации проводится последовательно сверху вниз. Для этого на внешнем контуре фильтровой колонны устанавливают брезентовые сальники по числу фильтров для выполнения указанных выше операций (рис. 131).

Для разобщения водоносных горизонтов в основании каждого звена фильтра устанавливают переходный ниппель, в нижней части второго имеется цементная пробка. После прокачки первого звена фильтра эрлифтная колонна разбивает перемычку, закрывает промывочные окна на первом фильтре и разрушает цементную пробку. Затем переходят к разглинизации следующего звена фильтра.

Для разобщения водоносных горизонтов при прокачке на водоподъемных трубах эрлифта располагают герметический сальник или пакер.

Как показала практика, способ разглинизации фильтров через промывочные окна не всегда эффективен и потому не может считаться универсальным. Глинизация фильтра может происходить по всей его длине, а что является критерием для суждения о достаточности прокачки скважины, остается не ясным. Если откачка прекращается после выноса песка через окна, мы в праве предположить, что песок в скважину будет проникать из зоны, непосредственно прилежащей к промывочному окну, где скорости максимальны, тогда как остальная часть фильтра может оставаться заглинизированной и не прокачанной. Очевидно, проведение расходометрии в скважинах, разглинизированных через промывочные окна, позволит более объективно судить об эффективности этого метода.

Для проверки эффективности способов разглинизации на участке близ станицы Голубицкой Краснодарского края ВОДГЕО были проведены опытные работы [9]. Здесь были пробурены скважины глубиной 55 м роторным способом с промывкой глинистым раствором и установлены фильтры с длиной рабочей части 5 м. Проведенной расходометрией после разглинизации скважины через промывочные окна было установлено, что основной приток воды в скважину происходит на участке, непосредственно примыкающем к промывочным окнам, т. е. в нижней части фильтра.

Приток воды к верхней части фильтра остается незначительным, что наглядно подтверждается графиком на рис. 132. Аналогичные наблюдения были сделаны и на других объектах, где также подтвердилась малая эффективность разглинизации скважин этим способом.

Разглинизация фильтров с помощью гидравлического размыва пласта. Учитывая малую эффективность существующих методов разглинизации, буровые организации Курсксельхозводстрой, трест Молдбурвод, трест Востокбурвод и другие разработали и внед-

рили методы посадки фильтров в скважинах, пробуренных до водоносных горизонтов с промывкой глинистым раствором.

Сущность этих методов заключается в следующем: пробуренная роторным способом скважина закрепляется обсадной колонной, после чего цементируется затрубное пространство. В процессе промывки скважины глинистый раствор заменяется чистой водой. Фильтр можно устанавливать непосредственно в водоносный горизонт, а также в предварительно разбуренный ствол малого диаметра. Такая установка фильтров имеет различные методические приемы.

Согласно методу, разработанному трестом Молдбурвод [66], в скважинах, глубина которых варьирует от 50 до 300 м, при

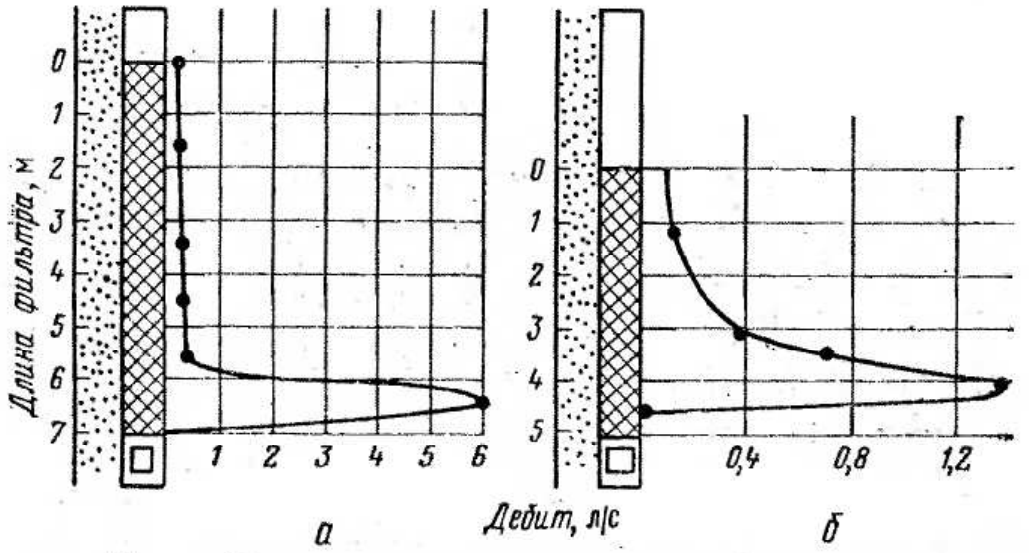


Рис. 132. Дифференциальная кривая расходометрии в скважине, разглинизированной через промывочные окна:
а — скважина в станице Троицкой, *б* — скважина в станице Голубицкой

низких статических уровнях, находящихся в 20—150 м от поверхности земли, фильтры устанавливают следующим образом. До проектной отметки скважину бурят малого диаметра роторным способом с прямой промывкой забоя. На основании комплекса геофизических исследований определяется наиболее перспективный интервал установки фильтра, после чего продолжают бурение до водоносного горизонта, увеличивая диаметр скважины, и устанавливают трубы диаметром 275 или 325 мм. После цементирования затрубного пространства глинистый раствор заменяют чистой водой, затем разбуривают водоносные породы долотом № 10 или № 12 с промывкой чистой водой.

При последующей операции в скважину на колонне диаметром 168—203 мм опускают фильтр, в отстойнике которого вмонтировано устройство для гидравлического подмыва. Колонну спускают на фонарях-центраторах.

Установка фильтра по предлагаемому методу показана на рис. 133.

При посадке фильтра в водоносный горизонт по бурильным трубам с левой резьбой нагнетается вода буровым насосом. Вода, пройдя обратный клапан, подается в пространство за фильтром, размывает глинистую корку и частично породы водоносного горизонта, которые выносятся на поверхность по межтрубному пространству. По достижении проектной отметки, трубы закрепляют на устье. После тщательной промывки засыпают гравий в восходящий поток промывочной воды. Излив воды из скважины должен быть минимальным, чтобы не выносить частицы гравия.

Для экономии труб предлагается вторая модификация данного способа. Вначале на полную глубину бурят скважину малого диаметра, а затем до кровли водоносного горизонта увеличивают диаметр скважины (долото № 18 и 20). Бурение ведется с прямой промывкой забоя глинистым раствором. После этого в скважине глинистый раствор заменяется чистой водой и водоносный горизонт разбуривают с промывкой чистой водой. Спуск фильтра и гравийная обсыпка аналогичны первому варианту.

Учитывая возможность просадки гравийной обсыпки вокруг фильтра, необходимо гравий засыпать на 5—10 м выше рабочей части диаметра.

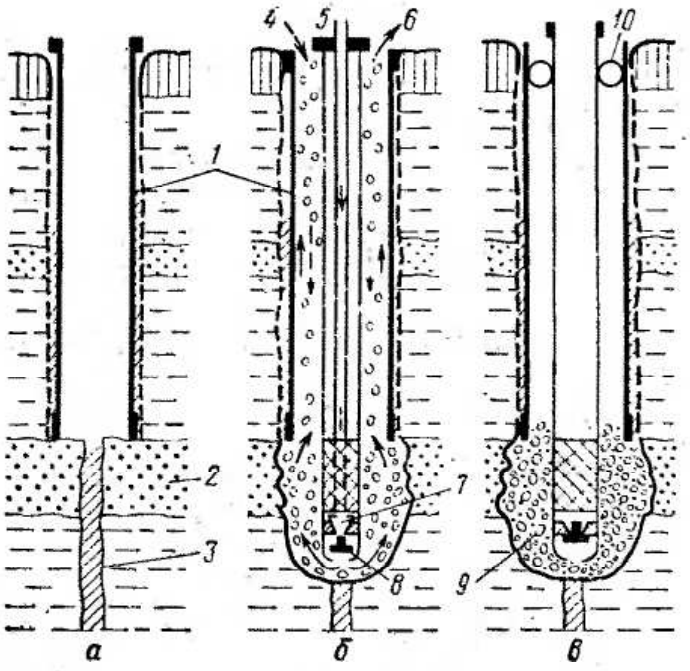


Рис. 133. Схема бурения скважин с применением гидравлического размыва пласта и гравийной обсыпки при глубоком залегании уровня подземных вод:

а — до вскрытия водоносного горизонта, *б* — вскрытие водоносного горизонта размывом с устройством гравийного фильтра, *в* — скважина законченная бурением; *1* — зацементированная эксплуатационная труба диаметром 268—325 мм; *2* — водоносный горизонт; *3* — пионерная скважина диаметром 146—197 мм; *4* — направление засыпки гравия; *5* — бурильные трубы для подачи воды; *6* — направление движения промывочной жидкости; *7* — соединение бурильных труб с донной частью фильтра на левой резьбе; *8* — обратный клапан; *9* — гравийная обсыпка; *10* — сальник

После этой операции над гравием устанавливают цементный мост, а затрубное пространство до поверхности земли засыпают балластным материалом.

Второй варпант обеспечивает увеличение дебита скважин против первого до 38%, однако его можно применять в безнапорных скважинах с низкими статическими уровнями и при достаточной устойчивости пород, залегающих над водоносным горизонтом. Второй вариант не может быть рекомендован для широкого использования и должен быть обусловлен необходимыми требованиями.

В Новосибирском тресте Востокбурвод фильтры в скважинах, пробуренных с промывкой глинистым раствором, устанавливают следующим образом [46]. Бурят до кровли водоносного горизонта и вскрывают его роторным способом. Ствол скважины закрепляют обсадными трубами, цементируют и промывают водой. В случае посадки фильтра впотай его спускают в скважину на бурильных трубах, которые в отстойнике фильтра закрепляют переходником с левой резьбой, а в верхней части — конической заглушкой.

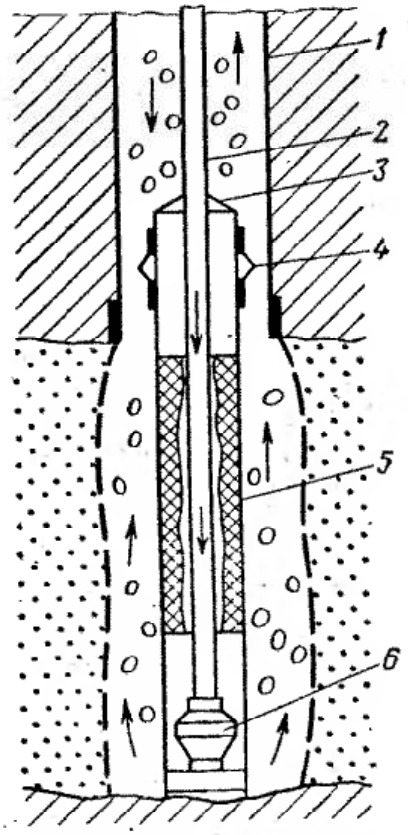


Рис. 134. Схема гидравлической посадки фильтра:
1 — обсадная труба; *2* — бурильные трубы; *3* — заглушки; *4* — направляющие фонари; *5* — фильтр; *6* — переходник с левой резьбой

Для обеспечения равномерного кольцевого зазора фильтр снабжается фонарями-центраторами. До проектной отметки фильтр спускают при помощи нагнетания воды буровыми насосами. По достижении фильтром проектной глубины скважину промывают до полного удаления глинистого раствора. Появление в промывочной воде песка и ее поглощение свидетельствуют о достаточной разглинизации забоя. Гравий засыпают в восходящий поток воды при минимальной производительности насоса. После гравийной обсыпки бурильные трубы извлекают и промывочные окна закрываются стопорным кольцом (рис. 134).

СМУ Курсксельхозводстрой Минводхоза РСФСР с 1964 г. применяет в скважинах, пробуренных с промывкой глинистым раствором, способ посадки фильтров с помощью эрлифта. После бурения до водоносного горизонта устанавливают обсадную колонну, цементируют ее и тщательно промывают водой. Образовавшуюся на забое цементную пробку разбуривают. Когда в обсадные трубы подается песчаная пробка, в стволе скважины создается противодавление водой. При установке фильтра впотай в скважину его опускают на трубах; зазор между обсадной колонной и фильтром должен быть не менее 75—100 мм.

Спускаемая с фильтром колонна является одновременно и водоподъемной для эрлифта. Она проходит через фильтр и при выходе через башмак заканчивается срезом под углом 60°. Внутри водоподъемных труб проходит труба диаметром 32 мм.

При посадке фильтра от промывочного насоса в скважину подается вода и одновременно в работу включается эрлифт. Схема установки фильтра показана на рис. 135. По достижении проектной отметки вспомогательную колонну, имеющую переходник

с левой резьбой, отвинчивают, а отстойник фильтра закрывают деревянной или цементной пробкой. В кольцевом пространстве между фильтром и обсадной колонной устанавливают сальник.

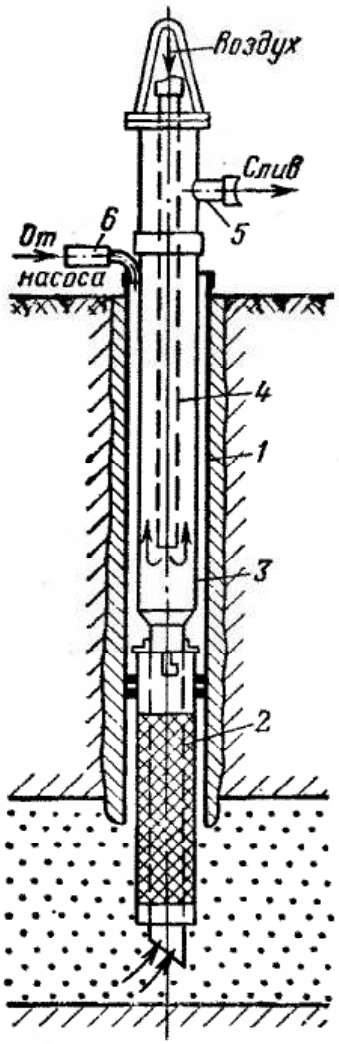


Рис. 135. Схема установки фильтра при помощи эрлифта:

1 — зацементированная обсадная колонна; *2* — фильтр; *3* — водоподъемная колонна; *4* — воздушная колонна; *5* — отвод для воды; *6* — шланг для подачи воды

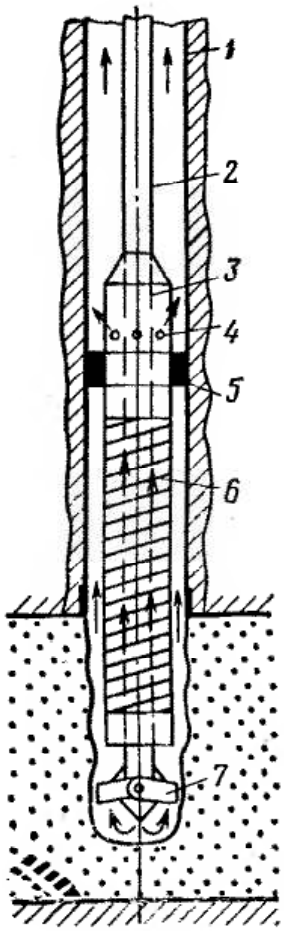


Рис. 136. Схема установки фильтра при одновременном вскрытии водоносного пласта:

1 — зацементированная обсадная колонна; *2* — бурильные трубы для подачи воды; *3* — соединительное устройство; *4* — отверстия для выхода воды; *5* — сальник, *6* — фильтр; *7* — расширитель

Данный способ посадки фильтров хорошо себя зарекомендовал в тех случаях, когда в разрезе отсутствовали линзы и пропластки глин, а водоносный горизонт был представлен чистыми песками. Если в разрезе предполагаются пропластки глин, трест «Востокбурвод» применяет комбинированный способ посадки фильтров с использованием механических расширителей (рис. 136). В пробуренную и закрепленную колонной скважину после ее цементирования и промывки водой спускают фильтр на бурильных трубах,

которые проходят внутри фильтра, где заканчиваются расширителем лопастного типа.

Фильтр с бурильной колонной соединен с помощью такого устройства, которое позволяет разбуривать водоносный горизонт без вращения фильтровой колонны.

Для постоянной подачи воды от насоса в скважину на верхнем конце бурильной колонны устанавливают приспособление для непрерывной подачи воды на забой скважины.

Вращатель труб позволяет наращивать очередную бурильную трубу без подъема инструмента. Лопасти долота раскрываются под действием осевой нагрузки при установке его на забой.

После окончания бурения и спуска фильтра на проектную глубину в бурильные трубы сбрасывают металлический шарик, который перекрывает отверстия в поршне отсоединительного устройства. Под давлением воды поршень срезает шпильки и опускается вниз.

В процессе подъема породоразрушающего инструмента на поверхность шарики опорного подшипника выталкиваются в кольцевую выточку поршня и вместе с отсоединителем поднимаются на поверхность. При этом лопасти долота упираются в башмак фильтра, сжимаются и проходят через фильтр. Фильтр изолируется от водоносного пласта корзинчатым сальником.

Установка фильтров в глубоких скважинах. Трестом Союзшахтоосушение разработан и применяется способ установки фильтров с контуром гравийной обсыпки на глубину 250—700 м.

При этом скважины до песков водоносного горизонта бурят шарошечными долотами с прямой промывкой забоя глинистым раствором. После установки последней эксплуатационной колонны диаметром 400 мм и ее цементирования глинистый раствор в стволе скважины и отстойниках заменяют чистой водой. Для установления мощности и литологического состава водоносные породы вскрывали при бурении пилотной скважины 349-мм долотом с обратной промывкой забоя. Для предупреждения заплыва забоя породой на уровне устья скважины поддерживался напор, который, например для условий Харькова, создавал противодавление в 50—60 м вод. ст.

Разбуренную породу из скважины удаляли при помощи эрлифта при центральном расположении воздушных труб. По достижении проектной отметки долото извлекали из скважины и заменяли расширителем.

Механический расширитель шарнирного типа представлен на рис. 137.

Он состоит из корпуса *1* диаметром 270 мм, длиной 3,5 м. В корпус помещен груз *2*, внутри которого имеется канал для прохода пульпы. К грузу шарнирными тягами присоединены механические рычаги *3*, они также укреплены на корпусе при помощи шарниров, кромки которых армированы твердым сплавом.

При выходе расширителя под башмак обсадной колонны под

действием вращения бурильной колонны и груза рычаги раскрываются. Расширить ствол скважины можно до 900—1000 мм. Скорость вращения бурильной колонны при этом составляет 8—25 об/мин. При разбуривании колонна находится в подвешенном состоянии без опоры на забой. Средняя механическая скорость проходки ствола скважины расширителями 1—1,2 м/ч.

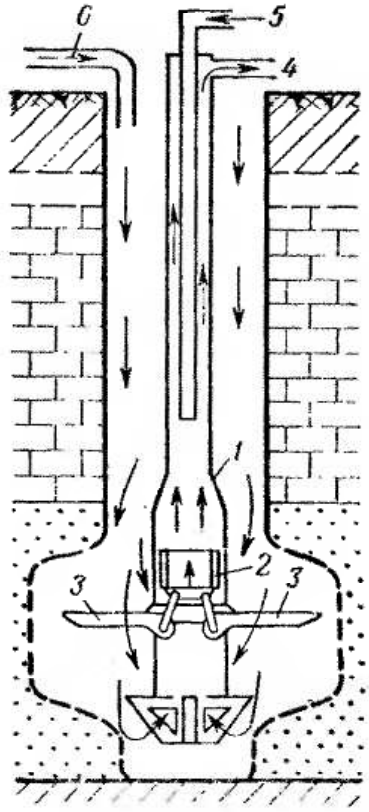


Рис. 137. Схема установки механического расширителя:

1 — корпус; *2* — груз; *3* — рычаги; *4* — отвод пульпы; *5* — подача воздуха; *6* — подача воды

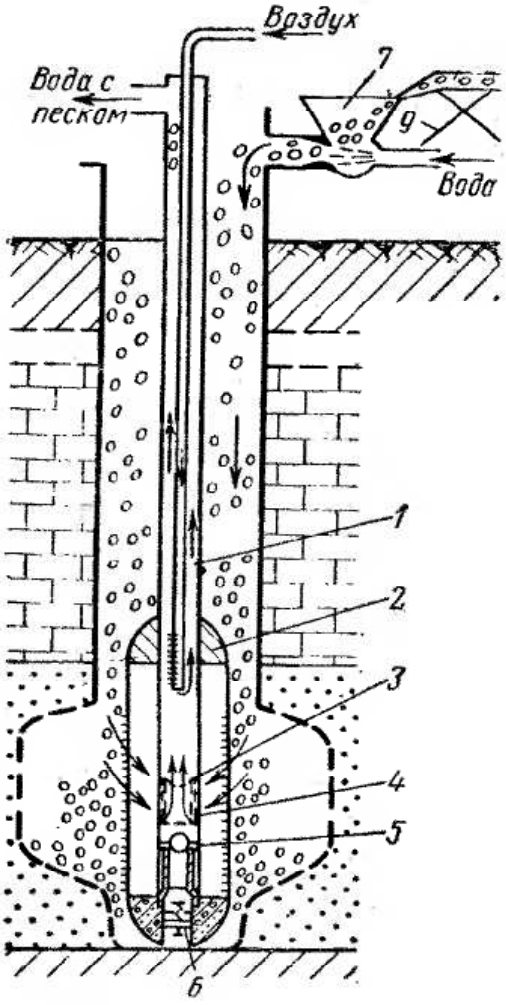


Рис. 138. Схема установки для устройства гравийной обсыпки в расширенном забое глубоких скважин:

1 — бурильные трубы с левым переходником; *2* — деревянная пробка; *3* — специальная муфта; *4* — промывочные отверстия на трубах; *5* — шаровой клапан для открытия промывочных отверстий; *6* — обратный клапан; *7* — смесительная воронка; *8* — гравий; *9* — вибросито

После расширения забоя из скважины, в которой непрерывно поддерживается обратный напор, извлекают породоразрушающий инструмент и заменяют его фильтром, спускаемым на колонне диаметром 254 мм с левым переходником. В основании фильтра вмонтировано приспособление с клапанами, позволяющее при помощи размыва разрушать образовавшуюся на забое песчаную пробку и устанавливать фильтр на проектной отметке. Гравийную смесь закачивают при помощи водяного инжектора.

Схема установки для образования контура гравийной обсыпки показана на рис. 138.

Для ускорения усадки гравия вокруг фильтра и выноса мелких песчаных частиц гравий засыпают при непрерывной работе эрлифта. В этом процессе гравий оседает на забое, а промывочная жидкость, пройдя фильтр, удаляется на поверхность. В случае необходимости вода может быть использована для повторной закачки.

При сооружении скважин в Харькове гравийная смесь состояла из зерен диаметром от 1 до 7 мм, а расход гравия на одну скважину составлял до 30 м³.

Дебит скважин, пробуренных указанным выше методом, колебался в пределах 180—276 м³/ч при удельных дебитах 9,4—31,4 м³/ч·м, что превышает дебит скважин, пробуренных старыми методами, в 2—3 раза и более.

Способы разглинизации фильтров путем химического воздействия на призабойную зону. При бурении скважин роторным способом с прямой промывкой забоя глинистым раствором происходит кольматизация пород водоносных горизонтов, что приводит к резкому снижению их проницаемости. Особенно это относится к мелкозернистым и тонкозернистым пескам, часто вскрываемым глубокими скважинами, где при установке фильтров отмечается низкая производительность.

В ЦНИИ Горосушение был разработан новый способ вскрытия водоносных горизонтов, который позволяет восстанавливать проницаемость и сокращать сроки освоения скважин после установки фильтров [81]. Этот способ заключается в том, что в промывочной жидкости глинистые, коллоидные частицы заменяются карбонатными в виде молотого или сепарированного мела с содержанием карбоната до 95%.

ЦНИИ Горосушением рекомендуется использовать меловые растворы следующих параметров:

Плотность, г/см³	1,18—1,2
Вязкость, с	20—25
Водоотдача за 30 мин, см³	⩽15
Толщина меловой корки, мм	2,5—4

Для приготовления промывочного раствора с такими параметрами потребуется 300—350 кг мела, 90—110 кг гидролизованного полиакриламида, 30—35 кг жидкого стекла, 2—4 кг акрилсульфатов и воды в количестве, определяющем указанные выше параметры.

Промывочные растворы приготовляют с применением обычных глиномешалок. Бурение скважин с использованием меловых растворов не отличается от бурения с промывкой обычными глинистыми растворами.

После установки фильтра скважину необходимо промыть чистой водой, а затем произвести опытную откачку с помощью эрлифта для снятия показателей производительности.

Для восстановления проницаемости пород на участке установки фильтра проводится химическая обработка с применением соляной кислоты концентрацией 31% с добавкой ингибитора, предупреждающего коррозию стальных фильтров. При воздействии соляной кислоты на карбонаты происходит бурная реакция, при которой выделяющийся газ CO_2 взрывает образовавшуюся корку.

Для обработки прифильтровой зоны кислотой ее заливают в ствол и выдерживают в течение суток, либо задавливают ее за контур фильтра сжатым воздухом. Объем потребной кислоты подсчитывается, исходя из объемов отстойника и рабочей части фильтра.

Согласно рекомендациям, для разглинизации стенок скважины на глубину до 75 мм на 1 м фильтра диаметром 150—450 мм требуется 70—170 л кислоты. По окончании обработки проводится повторная откачка эрлифтом.

Как показало опытное бурение с промывкой меловыми растворами, дебит скважин, оборудованных фильтрами, в 2—3 раза выше дебита скважин, пробуренных в аналогичных условиях с промывкой глинистыми растворами.

Разглинизация виброустановками. Ленинградский институт ВНИИГС и трест Промбурвод разработали и внедрили виброустановку ВУР-3 для разглинизации скважин, пробуренных роторным способом с промывкой глинистым раствором [24].

Техническая характеристика ВУР-3

Максимальная глубина обработки скважины, м	200
Масса установки, кг	1300
Габаритные размеры установки, мм:	
основание	1400 × 680
высота	1200
Частота колебаний в 1 мин	400—1000
Наибольший момент дебалансов, кгс·м	1500
Максимальная возмущающая сила, кгс	16 000
Мощность электродвигателя, кВт	13
Максимальная масса рабочего органа (штанги, трубы), кг	2000
Масса вибратора, кг	600

Схема установки показана на рис. 139. В установке в качестве рабочего органа использовались насосно-компрессорные трубы диаметром 73 мм, на которых устанавливали стальные диски с интервалом 50—80 см в количестве, соответствующем длине обрабатываемой части фильтра. Для увеличения эффекта вибрации и передачи гидродинамического давления величина зазора между внутренним диаметром фильтра и наружным диаметром диска рабочего органа должна быть минимальной.

Так, при виброобработках скважин в тресте Промбурвод величина зазоров была следующей:

Внутренний диаметр фильтра, мм	102	125	148
Наружный диаметр диска, мм	94	119	141
Величина зазора, мм	8	6	7

Сущность метода разглинизации состоит в том, что одновременно с промывкой скважины или прокачкой ее эрлифтом на заглинизированный фильтр и водоносный пласт воздействуют гидродинамическими импульсами, которые возбуждаются вибрирующими дисками, закрепленными на рабочем органе (трубах).

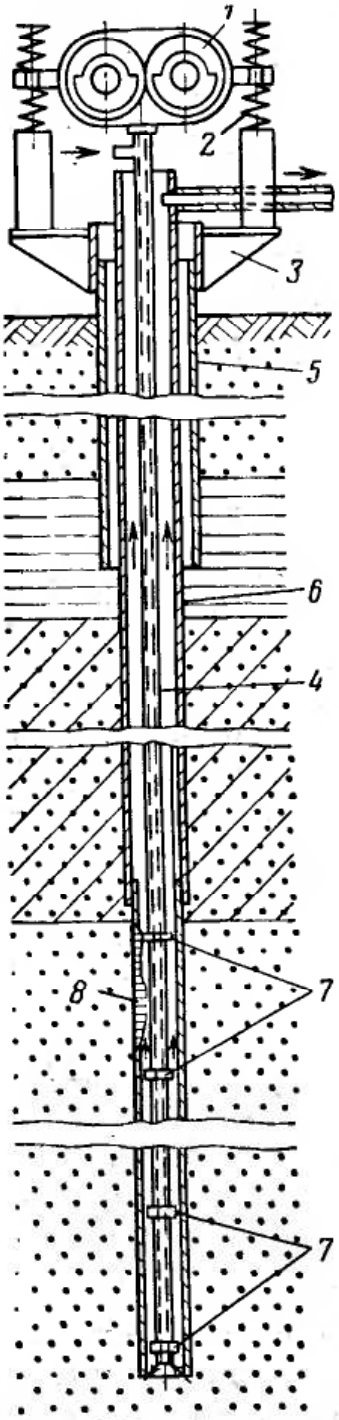


Рис. 139. Схема виброустановки ВУР-3:
1 — вибратор продольно-направленного действия; *2* — пружины-амортизаторы; *3* — рама опорная; *4* — колонна насосно-компрессорных труб; *5* — кондуктор; *6* — эксплуатационная колонна; *7* — диски рабочего органа; *8* — фильтр

Разработанную технологию разглинизации скважин предлагается проводить по следующей схеме. В начале из скважины с помощью эрлифта удаляется глинистый раствор, после этого на 1—2 мин включается вибратор, затем производится откачка эрлифтом с регистрацией выноса глины и песка. По достижении осветления воды вибратор вновь включают в работу. Последовательность операций повторяют до тех пор, пока не будет получен устойчивый дебит без выноса глинистого раствора.

В 1972 г. Ленинградским трестом Промбурвод виброустановка была опробована на 10 скважинах глубиной до 200 м, каптирующих слабопроницаемые водоносные пески сетчатыми фильтрами. В результате проверки было установлено, что вибрационный способ разглинизации позволяет в 2—4 раза сократить срок освоения скважин по сравнению с эрлифтной прокачкой, при этом дебит эксплуатируемых скважин увеличивается в несколько раз.

Испытания показали, что вибрационная обработка скважин в сочетании с эрлифтной прокачкой позволяет эффективно восстанавливать скважины, простоявшие с глинистым раствором в течение нескольких дней.

Для выполнения работ по разглинизации на заводе буровых машин изготовлен самоходный автономный агрегат АВО-1, снабженный компрессором и электрогенератором мощностью 30 кВт, который используется в Ленинградском спецуправлении треста Промбурвод. В заключение необходимо отметить, что виброустановки работали с сетчатыми фильтрами, основу которых составляют перфорированные трубы. В случае разглинизации

скважин, оборудованных каркасно-стержневыми фильтрами, принятая конструкция рабочего органа неприемлема и нуждается в конструкторских доработках.

Разглинизация фильтров при помощи взрыва ТДШ. Для повышения производительности водозаборных скважин после бурения с промывкой глинистым раствором во ВНИИГеофизике разработан и внедрен метод воздействия на заглинизированные фильтры и прифильтровые зоны с помощью взрыва торпед из детонирующего шнура [59].

Торпеда, представленная на рис. 140, состоит из одной, двух или трех ниток детонирующего шнура *3*; взрывного патрона *2* или электродетонатора, приспособленного для спуска и крепления торпеды; направляющих фонарей *5* для центровки торпеды внутри фильтра; кабельной головки для спуска и подъема торпеды, а также подвода тока к взрывному патрону или электродетонатору.

Взрывную очистку можно производить во всех конструкциях фильтров на основе стальных труб и стержневых каркасов с сетчатыми и проволочными покрытиями. Применение этого способа в скважинах, оборудованных фильтрами блочного типа, а также фильтрами из пластических масс, чугуна и других хрупких материалов не допускается.

Не останавливаясь детально на вопросах теории взрыва в подводных условиях, подробно описанных в специальной литературе, рассмотрим кратко механизм действия взрыва ТДШ. При взрыве образуется ударная волна с давлением 500—1000 кгс/см², зависящая от диаметра фильтра и величины заряда.

Воздействие взрывной волны распространяется со скоростью звука 10—20 мкм/с. Действие взрывной

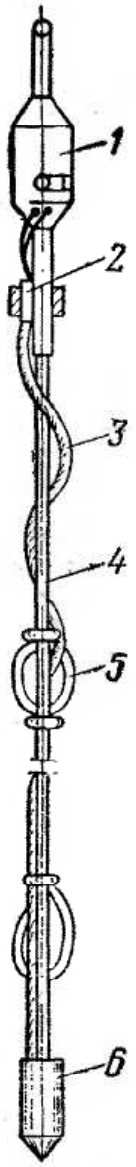


Рис. 140. Торпеда из детонирующего шнура ТДШ-В:
1 — головка; *2* — взрывной патрон; *3* — детонирующий шнур; *4* — трос; *5* — направляющие фонари-центраторы; *6* — натяжной груз

волны направлено радиально от центра скважины, когда происходит движение воды за стенки скважины через перфорацию с воздействием на прилежащие породы. Во второй фазе наблюдается обратный приток воды — из зафильтровой зоны в скважину.

Выбор величины заряда торпеды зависит от конструкции фильтра, его диаметра и материала, из которого он изготовлен (табл. 81).

Согласно исследованиям ВНИИГеофизики, взрыв минимального заряда вызывает в фильтре пластические деформации, что приводит к ослаблению конструкций. Это особенно заметно при воздействии взрыва на фильтры с сетками, в которых наблюдается

Таблица 81

Количество шнуров торпеды ТДШ в зависимости от конструкции фильтра

Конструкция опорного каркаса	Водоприемная поверхность				
	проволочная			сетчатая	
	Диаметр фильтра, мм				
	168	219	219 *	168	219
Стержневая	1	1—2	2—3	1	1
Труба перфорированная или щелевая	1	1—2	2—3		
Труба перфорированная без фильтрующих поверхностей	1—3	3—5			

* Максимальный заряд для каркасных фильтров дается при диаметре проволоки из нержавеющей стали 3 мм.

ее выпучивание против проходных отверстий на каркасе. По этим причинам производить повторные взрывы в сетчатых фильтрах надо с большой осторожностью.

Опытами, проведенными ВОДГЕО, установлено, что в каркасных фильтрах диаметром 150 мм с проволочной обмоткой (диаметр проволоки 3 мм) при взрыве ТДШ (три нитки) не наблюдается деформации водоприемных поверхностей и повторные взрывы с использованием торпед с одной ниткой шнура могут производиться неоднократно.

В настоящее время разглинизация скважин при помощи ТДШ широко применяется в буровых организациях и среди прочих методов является наиболее простой операцией, не требующий применения сложной буровой техники.

Для иллюстрации эффективности разглинизации при помощи ТДШ ниже приведены данные из диссертационной работы Н. К. Кузьминой (табл. 82).

Анализируя применяющиеся в настоящее время способы разглинизации водоносных горизонтов, представленных крупнозернистыми породами, можно сделать вывод, что при установке фильтров с дырчатыми и щелевыми каркасами все перечисленные способы (в том числе и простейшие — тартание желонкой, прокачка эрлифтом и др.) могут дать положительный результат.

Значительно осложняется разглинизация водоносного горизонта, представленного мелкозернистыми и тонкозернистыми песчаными фракциями, обладающими слабой водоотдачей. В этих условиях в настоящее время скважины стали оборудовать гравийными фильтрами кожухового или блочного типа, для которых большинство способов разглинизации может оказаться не только неприменимым, но даже вредным.

Таблица 82

Повышение производительности заглинизированных скважин с помощью взрыва ТДШ

Месторасположение скважин	№ скважины	Дебит, м³/ч	
		до взрыва	после взрыва
Краснодарский край (СМУ треста Промбурвод)	3 037	17	21,5
	10 563	5,2	20,8
	3 044	9	16
	12 714	10	10
	3 062	0	45
Краснодарский край (трест Водоканализация)	42	40	57
	33	15	45
	41	12	35
Дагестан (СМУ треста Промбурвод)	2 663	5	75
	2 654	3	27
	2 677	2,5	22,5
	2 687	0,5	8,5
	2 613	4	8
	2 675	0	3,6
	2 616	0	4
Иссык-Куль		0	15
Коченево		0	7
Кремнево		0	40
Болотная		0	0
Востокбурвод (Омская область совхоз «Целинный»)		120	1700

Например, в скважине, оборудованной мелкогравийным или песчаным фильтром блочного типа, при освоении пласта начинают производить тартание желонкой или прокачку эрлифтом. В этом случае глинистые и коллоидные частицы вместе с мельчайшими частицами песка должны пройти гравийный скелет, связанный цементирующими или склеивающими веществами в проницаемую решетку. Эти частицы, оседая в теле фильтра, в его поровых каналах сложной конфигурации, будут резко повышать входные сопротивления и снижать водозахватную способность.

В фильтрах блочного типа может оказаться малоэффективной и пакерная промывка, так как установлено, что механический кольматаж гравийных обсыпок представляет практически необратимый процесс. Следовательно, для таких условий наиболее эффективными способами разглинизации будут обрушения забоя при затрубной промывке фильтра.

Применение промывочной жидко ти, обработанной поверхностно-активными веществами, при всех перечисленных способах разглинизации скважин должно оказать всегда положительное влияние.

Предупреждение глинистого кольматажа фильтров защитными пластами. При бурении глубоких эксплуатационных или разведочных скважин, как правило, применяется роторный способ с прямой промывкой забоя глинистым раствором. Кроме того, в глубоких скважинах малого диаметра (127—254 мм) не исключается возможность их искривления. В этих условиях кольматация фильтров может происходить не только в результате отложения глинистого раствора в теле фильтров, но и под влиянием проникновения глин в водоприемные поверхности при спуске фильтров на забой скважины.

В работах Северо-Кавказского территориального геологического управления (СКТГУ) эти явления подтверждены экспериментально. При спуске сетчатых фильтров глина набивалась в зазор между сеткой и каркасом трубы, а при спуске проволочных — между обмоткой и каркасом.

Чтобы убедиться в глинизации фильтров вне зависимости от промывочной жидкости, использовали воду. После подъема фильтров была установлена глинистая кольматация их, резко снижающая производительность скважин. Для устранения этого явления группой сотрудников СКТГУ в 1971 г. был предложен метод защиты фильтров при помощи специальных паст, которыми покрывают фильтры перед спуском в скважину [81].

Защитные пасты состоят из смеси вяжущих растворов и наполнителей, не вступающих между собой в химическую реакцию. Пасты способны распадаться в воде в заранее заданное время. Для их приготовления в качестве вяжущих используют водные растворы формальдегидной смолы МФ-19-62, дикстриновой крупки и силиката натрия. Комбинируя состав и содержание указанных выше компонентов, можно создавать пасты с различным временем распада (табл. 83).

Таблица 83

Техническая характеристика защитных паст для фильтров буровых скважин

Параметры и компоненты паст	Глубина скважин, м		
	до 75	до 150	до 500
Время распада, ч:			
в глинистом растворе	3	4—5	6—8
в воде	1	1,5—2	3—4
Содержание, %:			
воды	40—41	24	33
силиката натрия	1—2	1—2	2—3
декстриновой крупки	13	13—14	20
талька	45	—	40—45
мела	—	62	—
Время хранения пасты при влажности воздуха 50—60%, мес	1	1	1

Фильтры, защищенные такими пастами, при влажности воздуха 80—85% могут храниться в течение 1—1,5 мес. На внутреннюю поверхность сетчатых фильтров пасты наносят по принципу центрифугирования, а на внешнюю поверхность путем втирания. На проволочные фильтры паста втирается с наружной поверхности; расход пасты на 1 м фильтра:

Диаметр фильтра, мм	89	108	127	146	168	243
Расход пасты, кг	2,3	2,8	3,3	3,7	4,4	6,1

Для разглинизации фильтров с защитными пастами рекомендуется удалить глинистый раствор из затрубного пространства через промывочные окна, а затем произвести свабирование или прокачку скважины с помощью эрлифта.

Эффективность защиты фильтров от глинистого кольматажа пастами проверялась в 1972 г. в Краснодарской гидрогеологической экспедиции на 29 скважинах и в подразделениях объединения Россельзаводстрой Минводхоза РСФСР. Для иллюстрации приведем данные (табл. 84) из работы Ю. С. Федорова [81].

Таблица 84

№ скважины	Фильтр *		Глубина установки фильтра, м	Продолжительность разглинизации, станко-смена		Результаты расходометрии	
	диаметр, мм	длина, м		свабирование	прокачка	работающая часть фильтра, м	не работающая часть фильтра, м
Не защищенные фильтры							
633	127	78	347	76	11	29	49
05	89	23	180	23	6	19	4
Фильтры, защищенные пастой							
631	127	84	350	4	8	63	21
06	127	24	176	8	1	20,5	3,5

* Фильтр трубчатый, перфорированный с проволочной обмоткой.

Приведенный пример наглядно подтверждает сокращение сроков освоения скважины и значительное увеличение активно работающей части фильтров.

Установка фильтров при бурении скважин роторным способом с обратной промывкой забоя чистой водой

Скважины, разбуриваемые роторным способом с обратной промывкой забоя чистой водой, обычно большого диаметра: от 500 мм и более. Как правило, такие скважины оборудуются фильтрами гравийного типа с однослойной обсыпкой с каркасами различного типа. Однако опыт эксплуатации скважин с отбором воды из песчаных отложений подтверждает, что наиболее длительная эксплуатация скважин с большим дебитом в водах неустойчивого химического состава обеспечивается при установке фильтровых каркасов большой скважности с контуром гравийной обсыпки толщиной 200—300 мм на сторону [51].

В скважинах, пробуренных с обратной промывкой, перед установкой фильтров необходимо соблюдать требование промывки ствола скважины чистой водой, так как при бурении не исключена проходка глинистых слоев, в результате чего может происходить обогащение промывочной воды глинистыми частицами и они могут осаждаться на стенках скважины и гравийных частицах, что ухудшает работу фильтров.

При данном способе бурения, как правило, фильтры устанавливают на колонне того же диаметра, что и фильтр. Необходимо учитывать, что колонна труб опускается в незакрепленный ствол скважины и может отклоняться от оси вследствие врезки направляющих фонарей в породу. Исходя из этих соображений, рекомендуется следующий порядок установки фонарей-центраторов на фильтровой колонне: верхний устанавливают на 0,3—0,5 м выше рабочей части фильтра; промежуточные фонари на рабочей части фильтра — через 8—10 м; нижний фонарь — на отстойнике фильтра.

Для обеспечения равномерной обсыпки по межтрубному зазору рекомендуется устанавливать промежуточные фонари и на надфильтровых трубах через 15—20 м.

Фонари изготовляют из стальной полосы шириной 50—60 мм и толщиной 5—7 мм или из прутковой стали диаметром 12, 14, 16 мм с последующей наваркой стальной полосы (рис. 141, *а*).

Некоторые организации применяют конструкции фонарей, которые по окружности связаны полосовым железом в виде обруча (рис. 141, *б*). Как показала практика, при спуске фонарей указанной конструкции происходит подрезка породы незакрепленных стенок скважины, в результате чего уменьшается ее глубина. Следовательно, такие фонари не могут быть рекомендованы.

В практике бурения скважин на глубину до 450 м с обратной промывкой в Югославии для спуска асбоцементных труб и фильтров направляющие фонари изготовляли из полосовой стали.

Сборка фильтровой колонны и установка фонарей производятся по мере их спуска в скважину.

При устройстве центрирующих фонарей методом электросварки нарушенные участки антикоррозионной защиты должны быть восстановлены путем покрытия их антикоррозионным материалом. Целесообразно применение промежуточных соединительных патрубков, на которые заблаговременно привариваются направляющие фонари.

Перед спуском фильтра из пробуренного ствола скважины извлекают породоразрушающий инструмент (долото, трубы); снимают ротор, если диаметр спускаемого фильтра больше диаметра проходного отверстия ротора, и уточняют положение забоя.

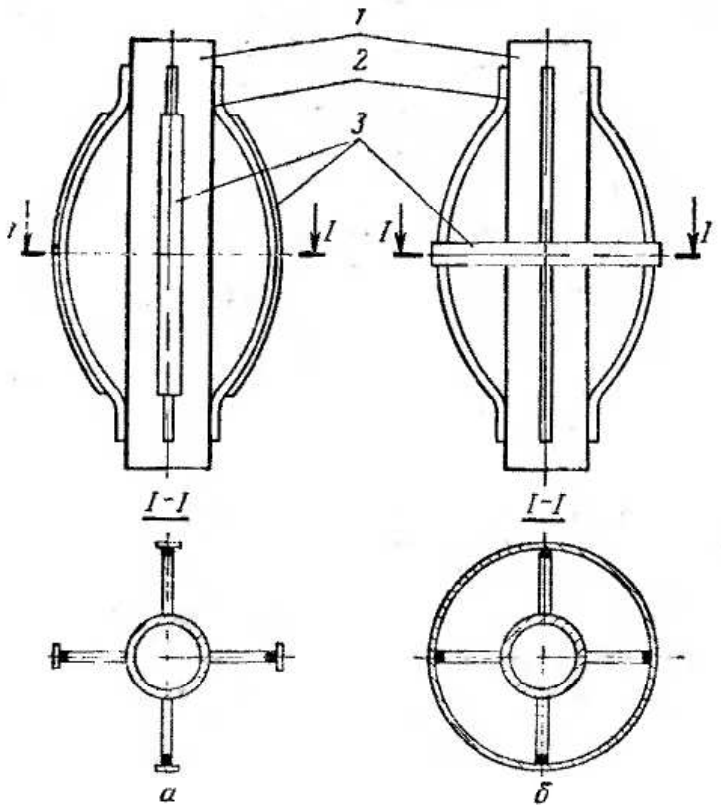


Рис. 141. Схема установки фонарей на фильтрах при бурении с обратной промывкой:
а — правильная; *б* — неправильная; *1* — труба; *2* — пруток стальной; *3* — сталь полосовая

Чтобы исключить заплывание скважины породой, необходимо в период подготовки фильтровой колонны и спуска ее не допускать снижения уровня воды в скважине. В случае снижения уровня надо периодически подкачивать воду.

Длина отстойников в фильтрах должна быть ограничена и принята конструктивно равной 0,5—2 м. Отстойник служит лишь местом размещения центрирующих фонарей при установке каркаса фильтра в незакрепленный ствол скважины и не предназначается для отстоя пород в пескующих скважинах.

Бурение скважин большого диаметра связано с установкой фильтров, при этом между колонной фильтра и стенкой скважины может образоваться зазор шириной от 200 до 400 мм. Эти условия будут приближаться к тем, когда частицы гравия при

свободном падении на забой в нестесненном пространстве, подчиняясь закону гравитации, будут осаждаться в соответствии с их формой и плотностью, что может приводить к расслоению обсыпки и последующему пескованию скважины. В связи с этим необходимо учитывать не только способ засыпки гравия, но и размер порций гравия в каждой операции.

Учитывая большой объем засыпаемого в скважину гравия, необходимо всемерно механизировать работы по обсыпке фильтра гравием. Для этого могут быть использованы бадьи емкостью 250—500 л, которые поднимают над устьем и автоматически сбрасывают гравий в скважину.

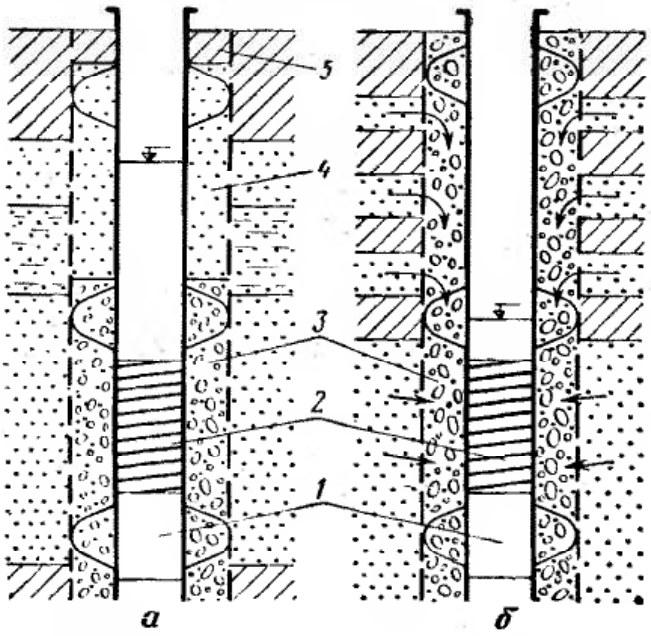


Рис. 142. Схема установки фильтра при каптаже одного или нескольких водоносных горизонтов:

а — при каптаже одного горизонта; *б* — при каптаже нескольких водоносных горизонтов; *1* — отстойник; *2* — фильтр; *3* — гравийная обсыпка; *4* — балластный слой; *5* — глиняный замок

При сооружении скважин большого диаметра распространена обсыпка фильтров гравием при помощи бульдозера. Для этого гравий самосвалами ссыпается на подготовленный стеллаж, а затем ножом сталкивается в скважину. Нередко также гравий засыпают непосредственно с самосвалов в желоб, сужающийся к скважине, по которому гравийная масса «стекает» в межтрубное пространство.

При засыпке больших объемов гравийной массы следует иметь в виду, что односторонняя засыпка гравия может отжать фильтровую колонну в сторону и привести к пескованию скважины при эксплуатации. По этой причине для обеспечения центрального положения фильтровой колонны в скважине целесообразно засыпать гравий с двух сторон.

Когда фильтр устанавливается для каптажа одного водоносного горизонта, обсыпку необходимо поднимать на 3—5 м выше, на случай ее пополнения при просадке. Остальное пространство можно засыпать породой, используя при этом буровой шлам.

Для скважин питьевого назначения в устье скважины устраивается глиняный замок на глубину 1,5—2 м.

Когда по разрезу скважин вскрываются водоносные горизонты малой мощности в виде линз и пропластков, которые необходимо также дренировать, гравийную обсыпку целесообразно устраивать вдоль всего ствола скважины до поверхности земли.

Сквозная обсыпка будет служить дреной и отводить воду при вертикальной фильтрации в зону фильтра (рис. 142).

Если обсыпка не выводится на поверхность, положение гравия в затрубном пространстве скважины проверяется путем замера ее глубины.

По окончании работ по устройству гравийной обсыпки фильтра необходимо проверить глубину скважины, так как в результате частичного просыпания гравия внутрь фильтра, как правило, образуется пробка. В практике были случаи полного заполнения отстойника и рабочей части фильтра мелкими фракциями гравия, которые, однако, легко удалялись при прокачках эрлифтом.

После установки фильтров сразу следует прокачать скважину для удаления мелких песчаных и глинистых частиц из обсыпки. Откачку рекомендуется проводить с помощью эрлифтов или водоструйных насосов с постепенным увеличением дебита.

§ 39. ПЕСЧАНЫЕ И ГРАВИЙНЫЕ ОБСЫПКИ, ИХ ПОДГОТОВКА И УСТРОЙСТВО В СКВАЖИНАХ

Применение гравийных обсыпок обусловливается конструкциями запроектированных фильтров, а подбирают их на основании расчетов.

Гравий и песок, которые используют для устройства фильтров, должны отвечать следующим требованиям: не содержать известковых включений (типа Евпаторийской смеси), примесей пыли и глины, иметь форму, приближающуюся к шару.

Применение известковой и гранитной крошки в фильтрах запрещается, так как она имеет неопределенные формы и размеры пор, шероховатую поверхность, затрудняет подбор и расчет. Кроме того, создаваемые шероховатые поверхности способствуют более быстрому накоплению механических и химических осадков в обсыпке.

В фильтрах, оборудованных крошкой, часто наблюдается пескование, которое не удается ликвидировать длительными откачками, когда образуются провальные воронки вокруг скважин.

В случае применения кислотной обработки для восстановления дебита скважин известковая крошка разрушается.

Гравий, добываемый в карьерах, подлежит промывке, сушке и рассеиванию по фракциям.

Для отбора воды из песчаных отложений наиболее эффективным является гравий, гранулометрический состав которого находится в пределах от 2 до 12 мм. В случае отбора воды из тонкозернистых и мелкозернистых песков применяется крупный речной песок с диаметром фракций от 0,5 до 2 мм; где $D_{50} = 1$ мм.

В настоящее время при устройстве гравийных обсыпок в основном применяется гравитационный способ, при котором гравий оседает на забой под влиянием силы тяжести. Если применяются гравийные обсыпки однородного состава с $k_н = 2$, гравий осаж-

дается на забой без расслоения. Однако из-за отсутствия специализированных карьеров и неорганизованной калибровки гравия по диаметрам большинство буровых организаций применяют разнозернистый гравий с коэффициентами неоднородности от 7 и более.

Практикой установлено, что гравийные обсыпки с большим коэффициентом неоднородности могут приводить к расслоению и, как следствие, к пескованию. Расслоение разнозернистого гравия зависит от ряда факторов [80]:

формы и плотности частиц; коэффициента неоднородности; высоты столба воды в скважине; величины межтрубного зазора; способа обсыпки и массы гравия, засыпаемого в единицу времени.

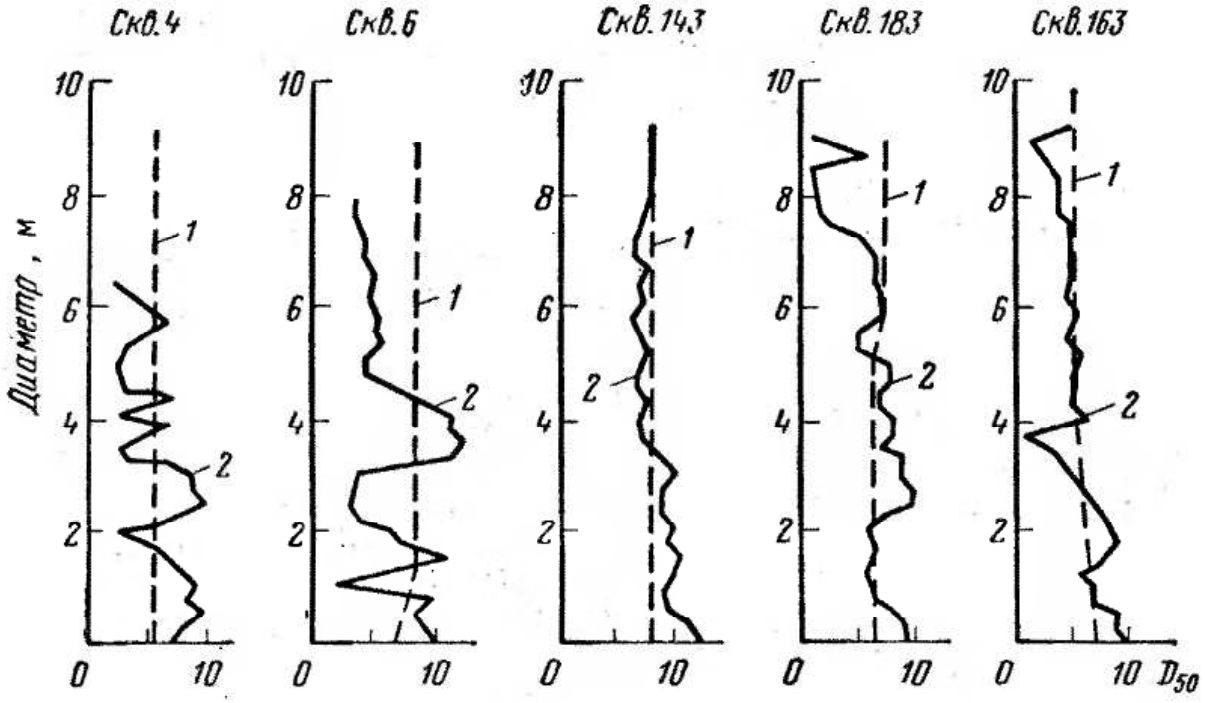


Рис. 143. График изменения коэффициента расслоения гравия:
1 — расчетный коэффициент межслойности; *2* — фактический коэффициент межслойности в результате расслоения гравия

Совокупность этих факторов приводит к переформированию гравийных обсыпок на забое вокруг фильтров, чем нарушаются принятые коэффициенты межслойности, обеспечивающие условия надежной работы фильтров без пескования.

В настоящее время гравийная обсыпка производится следующими способами:

1) загрузка совковыми лопатами; 2) при помощи вспомогательных емкостей; 3) с автосамосвалов; 4) при помощи бульдозеров.

В 1970—1973 гг. в Черкасской гидрогеологической экспедиции при участии ВНИИВОДГЕО проводились лабораторные и полевые работы по изучению расслоения разнозернистого гравия с $k_н = 2{,}06 \div 3{,}45$ и $D_{50} = 2{,}0 \div 2{,}9$ мм, а также образцов гравийной смеси с $k_н = 6{,}0 \div 8{,}5$ и $D_{50} = 3{,}0 \div 4{,}4$ мм.

Таблица 85

Сравнение характеристик гравия до и после засыпки

№ скважины	D_{60}, мм		$k_н = \frac{D_{60}}{D_{10}}$		$k_ф$, см/с		$\frac{k_{ф2}}{k_{ф1}}$	Коэффициент расслоения	Пористость, %		Наименование материала обсыпки
	до засыпки	после засыпки	до засыпки	после засыпки	$k_{ф1}$	$k_{ф2}$			расчетная	фактическая средняя по колонне	
143	2,9	2,5—3,7	2,06	1,45—5,62 / 1,19	0,617	0,514—2,94 / 1,660	2,69	0,86—1,28	39,45	39,45	Мелкий волгоградский гравий
163	2,0	0,45—2,75	3,45	1,65—3,37 / 2,6	0,394	0,017—1,34 / 0,685	1,74	0,23—1,37	37,2	39,9	То же
173	2,5	1,35—2,90	3,0	1,76—7,9 / 2,6	0,510	0,115—1,755 / 0,888	1,61	0,54—1,12	38,0	38,0	»
183	2,8	0,25—3,9	3,54	1,57—17,3 / 2,3	0,57	0,010—2,94 / 1,424	2,5	0,09—1,4	37,0	37,0	»
5	2,9	0,31—3,7	3,33	1,68—6,6 / 2,4	0,786	0,016—2,71 / 1,322	1,68	0,09—1,28	37,3	40,1	»
4	4,4	1,2—7,2	6,45	2,27—13,83 / 3,9	0,567	0,083—8,70 / 1,577	2,78	0,27—1,64	—	—	Смесь гранитного отсева с крупнозернистым волгоградским песком
6	3,0	1,1—7,4	6,0	2,31—9,33 / 4	0,282	0,045—7,20 / 1,042	3,7	0,37—2,47	—	—	

Примечание. В знаменателе—средняя характеристика после засыпки.

При эксперименте гравийная обсыпка в скв. 4, 6, 163, 183 проводилась с помощью бульдозеров с интенсивностью подачи гравия от 5 до 38 кг/с, а в скв. 143 и других гравийная обсыпка сооружалась при помощи автосамосвалов при непрерывной подаче гравия с интенсивностью 4,5—5 кг/с.

График изменения коэффициентов расслоения гравийных обсыпок приведен на рис. 143.

Под коэффициентом расслоения понимается отношение среднего диаметра гравия вокруг фильтра после обсыпки к среднему диаметру гравия до обсыпки в исследуемом интервале, т. е.

$$W = D_{к50}/D_{50}.$$

Сравнение характеристик гравия до засыпки и после нее дано в табл. 85.

Из анализа материалов по применению гравийных обсыпок разнозернистого состава следует.

1. При сооружении обсыпок происходит расслоение гравия и тем большее, чем больше коэффициент неоднородности и меньше окатанность частиц.

2. Наименьшее расслоение наблюдается при непрерывной засыпке гравия.

3. При использовании разнозернистого гравия и засыпке его с перерывом в контуре гравийной обсыпки (в последних ее объемах) образуются слои высотой до 0,5—1 м, в которых наблюдается наибольшее расслоение, что может приводить к пескованию и усадке гравия при прокачках. Поэтому необходимо создавать некоторый запас гравия над верхним краем рабочей части фильтра высотой 4—5 м.

4. При сооружении скважин большого диаметра можно рекомендовать применение разнозернистой обсыпки при условии, если межслойный коэффициент, умноженный на коэффициент расслоения, не превышает 20 или $D_{90}/D_{50} \leqslant 20$, где D_{90} и D_{50} — диаметры частиц, соответствующие пропуску 90 и 50% породы.

Из приведенных исследований вытекает, что при существующих методах производства работ по обсыпке фильтров гравием разнозернистого состава не удается полностью избежать расслоения обсыпки и значительное ее улучшение может быть достигнуто путем принудительной закачки гравия на забой при помощи эрлифта и эжекторов.

ГЛАВА VI

РЕМОНТ СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ ФИЛЬТРАМИ, И МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Опыт эксплуатации крупных водозаборов нашей страны (в Воронеже, Риге, Вильнюсе, Курске, Оренбурге и др.) подтверждает, что долголетняя работа скважин и профилактические ремонты их в значительной степени зависят от правильного проектирования на основе гидрогеологических исследований, но еще в большей степени от качественного их сооружения. Установлено, что продолжительность работы скважин на воду зависит от ряда факторов: геологического строения; способа бурения; конструкции скважины; конструкции фильтра; способа установки фильтра; способа и сроков освоения скважины после установки фильтра; гидрохимического состава подземных вод; типа насосного оборудования и режима эксплуатации; профилактического осмотра и ремонта.

Совершенно очевидно, что в природных условиях будет действовать совокупность указанных выше факторов с различной степенью интенсивности. Этим, в частности, объясняется тот факт, что в пределах водозабора в одних геологических и гидрогеологических условиях, при одинаковых конструкциях скважин и фильтров, способах бурения и освоения никогда не получают равнозначных параметров, характеризующих работу рядом стоящих скважин (дебит, понижение уровня, сопротивление фильтра, приток воды по длине фильтра) и др.

§ 40. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ СКВАЖИН

Рассмотрим кратко влияние перечисленных факторов на продолжительность работы буровых скважин.

Геологическое строение. Установлено, что наиболее благоприятные условия работы фильтров обеспечиваются в водоносных горизонтах, представленных среднезернистыми, крупнозернистыми или разнозернистыми гравелистыми песками и галечниками мощностью от 5 м и более.

Водоносные горизонты, представленные тонко- и мелкозернистыми песками малой мощности с частым переслаиванием глинистыми прослоями, обладают слабой водоотдачей. Эксплуатация скважин в этих условиях может сопровождаться выносом глинистой части пород, замутнением воды с весьма медленным отстаиванием.

Смена фильтров в данных условиях, как правило, не приводит к положительным результатам. Оплывание слоев, представленных илистыми или глинистыми разностями, понижает проницаемость пород на участке установки фильтра.

В водоносных горизонтах, представленных однородными песками большой мощности, перебуривание скважин или смена фильтров при условии большой подработки забоя, как правило, должно приводить к положительным результатам.

Способ бурения. В настоящее время водозаборные скважины можно бурить тремя основными способами: ударно-канатным, роторным с прямой промывкой забоя глинистым раствором и роторным с обратной промывкой забоя чистой водой. Каждый из этих способов имеет специфические особенности, влияющие на дебит скважины и продолжительность работы.

До недавнего времени считалось, что ударно-канатный способ бурения в наименьшей степени влияет на структуру и литологическое строение водоносных горизонтов. Однако проведенный анализ показал, что образование пробок в стволе скважин и их ликвидация при помощи обычных поршневых желонок приводит к вертикальному смещению и обрушению пород и, следовательно, к заведомо неправильной характеристике пород водоносных горизонтов.

При этом способе бурения изменяется гранулометрический состав, фильтрационные характеристики и мощность отдельных пластов и пропластков горных пород. Опыт показывает, что мелкие пропластки из разреза исчезают, а более мощные (от 2 м и более) увеличиваются (рис. 144).

В подтверждение приведем данные по изменению литологического строения пород скважины Тускуланского водозабора в Вильнюсе, перебуренной по старому стволу после извлечения труб и фильтра. Диаметр скважины 400 мм, способ бурения — ударно-канатный.

Наибольшее нарушение фильтрационных свойств водоносных горизонтов наблюдается в тех случаях, когда объем выбуренных пород во много, а иногда в десятки раз, превышает геометрический объем выработки. При этом часто образуются провальные воронки (рис. 145).

Роторный способ бурения с прямой промывкой забоя глинистым раствором, как показала практика, относится к числу наихудших способов бурения при вскрытии водоносных горизонтов, представленных рыхлыми породами. Проникновение глинистого раствора в породы, недостаточно удовлетворительные методы и способы разглинизации искусственно занижают дебиты скважин, вследствие чего в мелко- и тонкозернистых песках получаются малодебитные и даже безводные скважины.

Эксплуатируются такие скважины нередко эрлифтами, с большими понижениями уровня, появляется пескование, что приводит к высоким затратам энергии при добыче воды. При эксплуатации пескующих скважин центробежными насосами наблюдается

преждевременный их износ. Ремонт таких скважин, как правило, малоэффективен.

Роторный способ бурения с обратной промывкой в отличие от двух указанных выше является наиболее прогрессивным; боль-

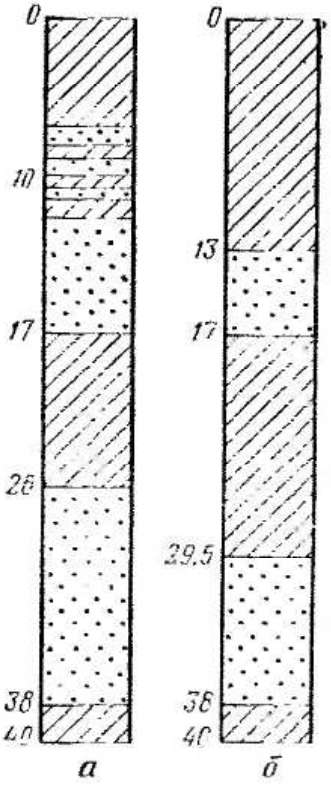


Рис. 144. Изменение строения пород в разрезе при перебуривании скважин на водозаборе в Вильнюсе:
а — после первоначального бурения; *б* — после повторного бурения

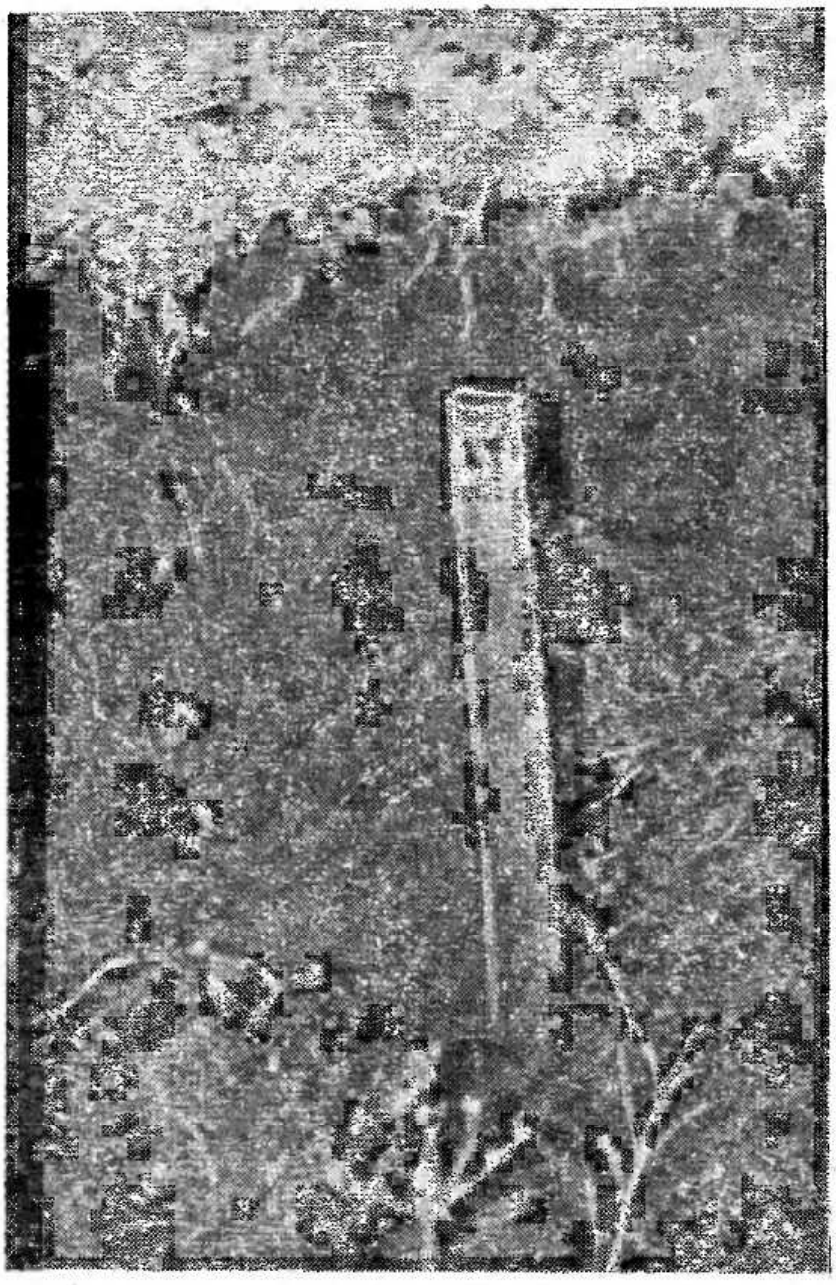


Рис. 145. Образование провальной воронки при бурении дренажной скважины ударным способом (г. Ульяновск)

шие скорости бурения, минимальная подработка забоя, сохранение подлинных фильтрационных характеристик горных пород. Сооружение гравийных обсыпок большой мощности при правильном подборе гравия обеспечивает скважинам долголетнюю работу без пескования.

Конструкция скважины. В связи с развитием роторного способа бурения с прямой промывкой забоя глинистым раствором, особенно при сооружении скважин для сельскохозяйственного водоснабжения, глубина которых часто находится в пределах 100 м и более, многие буровые организации в целях экономии труб стали оборудовать скважины одноколонными конструкциями. Фильтры в этих скважинах устанавливают на трубах того же диаметра. Когда скважины простояли много лет в грунтах, в которых гидроокись железа проникала в окружающие ствол породы, или когда в скважинах зацементировано затрубное пространство, извлечение труб невозможно, как и невозможна смена фильтров. Для поддержания дебита в этих случаях необходимы механические, гидравлические чистки и обработка химическими реагентами.

При установке фильтров впотай обеспечиваются условия для более успешной смены фильтров. Как показала практика ремонта скважин на предприятиях Украины, извлечение фильтров из скважин, установленных впотай, также сложно. При нагрузках до 95—100 тс, как правило, фильтры не извлекаются. Наиболее эффективным оказался способ обуривания фильтров специальной колонковой трубой с одновременной промывкой забоя. Такой метод успешно применялся в скважинах, где разность между диаметрами фильтра и рабочей колонной составляла 102 мм и более [63].

Конструкция фильтров оказывает большое влияние на дебит и срок эксплуатации скважин. Фильтры с сетками в большой степени подвержены механическому заклиниванию и процессам электрохимической коррозии, в связи с чем они имеют большие входные сопротивления.

Такие конструкции фильтров при восстановлении их производительности различными методами, как правило, не дают высоких результатов. Применение ТДШ в скважинах с продолжительным сроком работы (5 лет и более) может приводить к разрыву сеток, даже в случае применения торпеды с одной ниткой. В таких конструкциях фильтров для повышения дебита следует рекомендовать комбинированные реагентные обработки с применением пневмовзрыва или вибраторов. При реагентных обработках необходимо предусматривать антикоррозионную защиту, а также проводить кислотные обработки с добавкой ингибиторов.

Наиболее прогрессивными конструкциями фильтров следует признать щелевые и проволочно-каркасные с контуром гравийной обсыпки. Такие конструкции фильтров позволяют практически использовать все известные методы восстановления производительности скважин: как механические, так и химические. Опорные каркасы фильтров, надежно защищенные антикоррозионными покрытиями и имеющие водоприемные поверхности из нержавеющей стали (штампованный лист, проволочная обмотка) могут работать 20—30 лет без заметных следов разрушения.

Извлечение каркасно-стержневых фильтров из скважин на защитных сооружениях в Ульяновске после 18—20 лет эксплуатации подтвердило их устойчивость против коррозионного разрушения. Проволока из нержавеющей стали не имеет никаких следов повреждения. На опорных каркасах из стальных стержней глубина коррозионных пленок составляет около 1,5—2 мм. На этих конструкциях фильтров была выполнена антикоррозионная защита лаком БФ-2. При применении более надежных покрытий (полиэтиленовых, полиамидных) следует ожидать более эффективные результаты защиты против коррозионного воздействия воды.

Способы установки фильтров в большой степени связаны со способом бурения скважины. При бурении ударно-канатными станками фильтры устанавливают под защитой обсадных колонн. При устройстве фильтров гравийного типа следует обращать внимание на установку фонарей-центраторов, обеспечивающих равномерную толщину обсыпки по всему периметру фильтра. От этого может в значительной степени зависеть пескование скважины.

Необходимо отметить, что при бурении скважины под отстойник фильтра разбуриваются подстилающие породы, обычно глины, без крепления их трубами. В этих условиях происходит обогащение воды, находящейся в стволе скважины, глинистыми частицами. Засыпка гравия в такой ствол будет приводить к уплотнению обсыпки и искусственному повышению входных сопротивлений фильтра. Во избежание этого рекомендуется промыть скважину от глинистого раствора перед установкой фильтра или дать отстояться жидкости в скважине в течение 1—2 сут, после чего насыпать на забой гравийную подушку высотой 0,5—0,7 м и установить фильтр в скважину под гравийную обсыпку.

Установку фильтров в скважинах, пробуренных роторным способом с промывкой глинистым раствором, следует отнести к наиболее трудной и ответственной операции. Как известно, бурение шарошечными долотами сплошным забоем приводит к нарушению структуры пород, что затрудняет ведение правильной геологической документации.

Пески, слабосцементированные песчаники, пропластки и линзы глин — все смешивается на забое и выносится на поверхность промывочной жидкостью, которая представляет собой глинистый раствор. Только проведение комплекса геофизических исследований позволяет определить зоны залегания водоносных и неводоносных пород (пески — глины). Однако и при этих исследованиях без применения боковых грунтоносов нельзя определить фильтрационные характеристики пород проходимых водоносных горизонтов.

При бурении рыхлых пород с коэффициентами фильтрации от 10 до 15 м/сут и менее другие методы наблюдений, например поглощение промывочной жидкости, обычно буровыми мастерами не учитываются вследствие незначительного поглощения. По этим причинам при роторном бурении с промывкой глинистым раствором фильтры часто устанавливают неудачно, в связи с чем они

работают с малой производительностью, либо пескуют по причинам неправильного подбора проходных отверстий.

Как подтверждает практика, особенно трудно устанавливать ярусные фильтры, где пескование скважин является частым явлением. К таким районам следует отнести Краснодарский, Ставропольский край и др. По данным Гипрокоммунводоканала, в скважинах водозабора в Краснодаре песчаные пробки достигали 100—150 м с образованием провальных воронок вокруг скважин.

Роторный способ с промывкой глинистым раствором чаще всего используется для бурения глубоких скважин (150—300 м и более). Вследствие малого зазора между незакрепленным стволом скважины и фильтром, возможного искривления ствола скважины по глубине при спуске фильтров на забой их водоприемные поверхности могут заполняться глинистыми породами, поэтому снижается водоприемная способность фильтров. Если учесть, что на таких глубинах в большинстве случаев применяют сетчатые фильтры, то малая дебитность или пескование скважин довольно частое явление.

Способы восстановления дебита таких скважин очень ограничены. Применение глинокислотных ванн с установкой вибраторов может оказаться эффективным. Если водоносный горизонт представлен бесструктурными рыхлыми тонкозернистыми песками, не обладающими хотя бы слабой цементацией и способностью к образованию устойчивых каверн вокруг фильтров, то пескование может происходить неограниченное время. Так как в настоящее время используются центробежные погружные насосы, которые выходят из строя вследствие абразивного воздействия песка, в ряде случаев целесообразно отказаться от эксплуатации таких скважин и бурить новые.

Если в кровле водоносных горизонтов имеются устойчивые породы (мел, мергель, песчаники, плотные глины, опоки), то в процессе прокачки могут образовываться бесфильтровые скважины. При этом следует учитывать, что для формирования таких скважин потребуются длительные эрлифтные откачки с установкой мощных компрессорных установок.

Способы и сроки освоения скважин. По окончании бурения в скважинах производится откачка. Как правило, при этих откачках происходит пескование, что вынуждает буровые организации применять эрлифты с низким коэффициентом полезного действия и небольшой производительностью. Рекомендации о прокачке скважин с дебитом, превышающим на 20—50% будущий эксплуатационный, как правило, не выполняются. Поэтому в начальный период эксплуатации возникает пескование, занос рабочей части фильтра породой, а также износ насосного оборудования. По этим причинам, например в тресте Союзшахтоосушение, для доосвоения скважин после эрлифта повторяют откачку погружными электронасосами (бывшими в употреблении, с расчетом на их списание или ремонт).

В настоящее время в ряде организаций треста Промбурвод и других проводятся работы по созданию водоструйных насосов, производительность которых может быть доведена до 60 м³/ч. Это может оказать буровикам большую помощь в освоении скважин.

Оставленный после бурения глинистый раствор за контуром фильтра цементирует породы и гравийные обсыпки и уплотняет их тем больше, чем больше время между установкой фильтра и его прокачкой. В практике работ известны случаи, когда прокачки скважин после бурения проводились с перерывом в течение месяца и более и это приводило к малой дебитности. В таких скважинах применение различных способов интенсификации — повторной прокачки, свабирования, подрыва торпед — не восстанавливало проницаемости, соответствующей гранулометрическому составу пород водоносного горизонта. Из сказанного следует, что нельзя допускать разрыв между бурением и прокачкой скважин.

При освоении скважин, пробуренных ударным способом или роторным с обратной промывкой, необходимо строго соблюдать режим откачек. Чтобы за контуром фильтра образовался естественный фильтр из частиц гравия или песка по принципу обратного фильтра (с переходом от крупных частиц к мелким), необходимо начинать откачку с малых дебитов и малых понижений уровня, при которых будет происходить отсос мелких частиц. Если начинать откачку с максимальных расходов, в поток будут увлекаться как мелкие, так и крупные частицы, что неизбежно приведет к уплотнению пород за фильтром. Как показал опыт, такая механическая заклинка пород представляет необратимый процесс, в результате которого резко снижается производительность скважин и она не может быть восстановлена ни одним из существующих методов [77].

Влияние гидрохимического состава воды на производительность и время эксплуатации скважин является одним из главных факторов (см. гл. III). Как показывает опыт, в ряде районов страны (Прибалтийские республики, Калининградская область, Белорусская ССР, Северо-Восточные области Европейской части СССР), относящихся к зонам избыточного увлажнения и распространения моренных отложений, а также к комплексу аллювиальных отложений речных долин Волги, Камы, Оки и других, подземные воды гидрокарбонатно-кальциевого и гидрокарбонатно-сульфато-кальциево-натриевого типов содержат железо в пределах от 1—2 до 10—15 мг/л и более. При отложении его происходит кольматаж не только фильтров и прифильтровых зон, но и насосного оборудования.

Наблюдения за эксплуатацией водопонизительных скважин в котлованах Сталинградской ГЭС показали, что водоприемные решетки на насосах АТН-8 и АТН-10 зарастали в течение 3 мес (рис. 146), а полное зарастание водоподъемных труб происходило в течение 8 мес (рис. 147).

Следует еще раз отметить, что в водах неустойчивого химического состава необходимо устанавливать фильтры с максимальными скважностью и размерами проходных отверстий. Конструкции фильтров должны обладать механической и коррозионной устойчивостью, поскольку в этих скважинах в процессе эксплуатации потребуется проводить механические, взрывные и реагентные обработки.

Для эксплуатации скважин в настоящее время используются погружные электронасосы, насосы с вертикальным валом типа АТН, эрлифты и в небольшом количестве поршневые насосы.

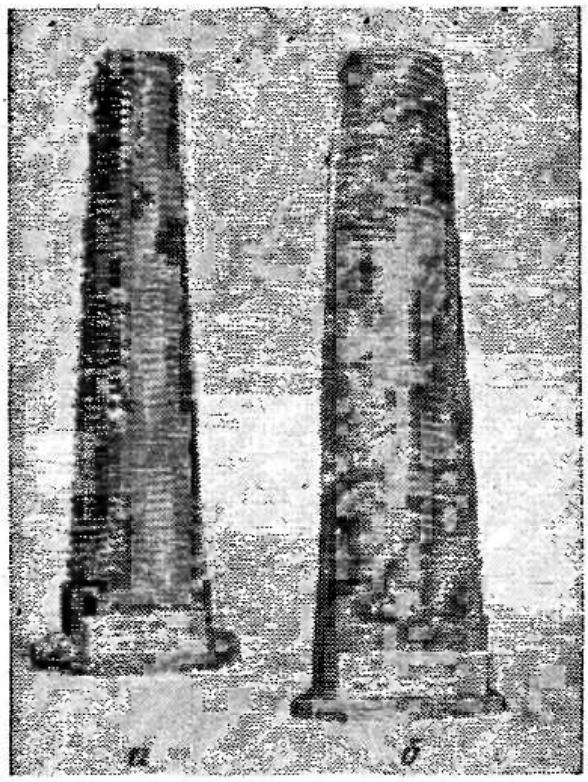


Рис. 146. Зарастание водоприемных решеток насоса АТН:
а — перед установкой; *б* — спустя 3 мес

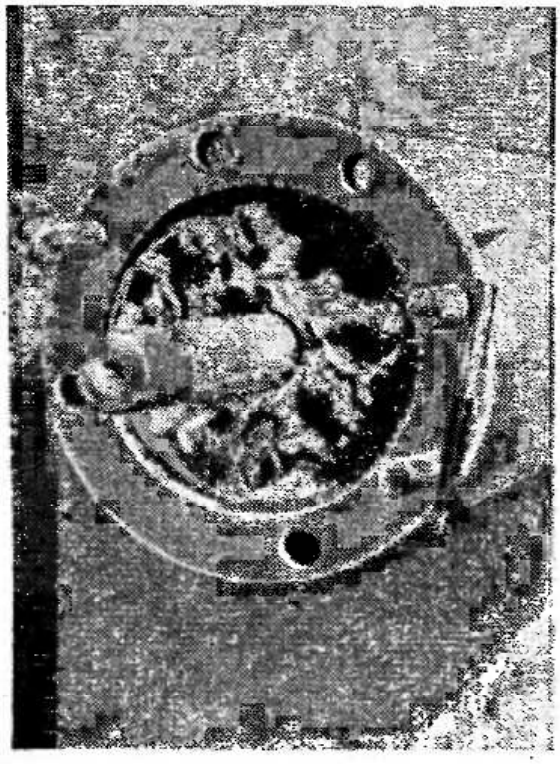


Рис. 147. Зарастание проходного отверстия между валом и водоподъемной колонной насоса АТН-8

Идеальным случаем считается непрерывная работа скважины, когда устанавливается динамическое равновесие между притоком и отбором воды. Периодический отбор воды, связанный с частым включением и отключением насосов, может приводить к гидравлическому удару, который отражается не только на насосном оборудовании, но и на прифильтровой зоне скважин. Это может приводить к уплотнению и разрушению гравийных обсыпок. Такие явления подробно рассмотрены А. Д. Гуриновичем [5]. Поэтому при подборе насосного оборудования следует учитывать в конструкциях приспособления для смягчения гидравлических ударов, соответствующие емкости для накопления воды, сети и величину водопотребления с таким расчетом, чтобы чрезмерно не завышать

производительность насосных установок и эксплуатировать их более планомерно.

При эксплуатации скважин, в воде которых содержится железо в окисной форме, особенно неблагоприятно отражается отбор воды эрлифтами. Как известно, при подаче воздуха от компрессоров в водоподъемные трубы эрлифта образуется водовоздушная смесь, кислород которой способен переводить окисное железо в закисное. При остановках эрлифта столб воды обрывается, создавая избыточный напор в скважине, под влиянием которого происходит утечка воды из скважины в пласт. Вследствие этого в прифильтровой зоне могут накапливаться железистые соединения, понижающие пропускную способность фильтра. Кроме того, при эксплуатации эрлифтов наблюдается зарастание солевыми отложениями водоподъемных труб, что может стать причиной снижения производительности скважин. Аналогичные явления происходят в скважинах и при сифонном водоотборе (в Ульяновске, Риге и др).

Профилактический осмотр скважин — залог успешной и бесперебойной эксплуатации скважин. Он должен проводиться на основе первичных данных по сооружению скважины. Вначале при исправном насосном оборудовании проводится прокачка скважины при двух — трех ступенях понижения, когда замеряют дебит и понижение уровня.

При наличии законтурного пьезометра замеряют уровни центральной и пьезометрической скважин для определения сопротивления фильтра по величине разрыва уровней. Если пьезометра нет, замеряют время восстановления уровня воды в скважине после прекращения откачки.

При нормальной эксплуатации один раз в течение года необходимо проверять состояние забоя скважины и в случае заноса рабочей части фильтра очищать его от песчаной пробки. Если будет установлено снижение производительности скважины при отсутствии запескованности фильтра, то можно утверждать, что причиной этого является биологический или химический кольматаж. В этом случае потребуется реагентная обработка скважины.

Таким образом, продолжительность работы скважин зависит от ряда факторов, нарушение которых приводит к преждевременному выходу скважин из строя.

Рассматривая вопросы ремонта скважин, необходимо отметить, что долговременная работа их определяется, прежде всего, качеством бурения. Если скважины пробурены с нарушением технологии и долгое время находились в эксплуатации, то нельзя рассчитывать на эффективное восстановление дебита с применением любых способов.

При эксплуатации скважин, оборудованных фильтрами, снижение производительности и выход из строя происходят в основном по двум причинам:

пескование скважин;

повышение входных сопротивлений в фильтрах под влиянием механического, гидрохимического и биологического кольматажа.

Пескование скважин — один из самых тяжелых дефектов, который приводит к снижению дебита, преждевременному износу насосного оборудования, запескованию сборных резервуаров и разводящей сети, повышению стоимости их эксплуатации. При систематическом песковании скважин нередко наблюдается образо-

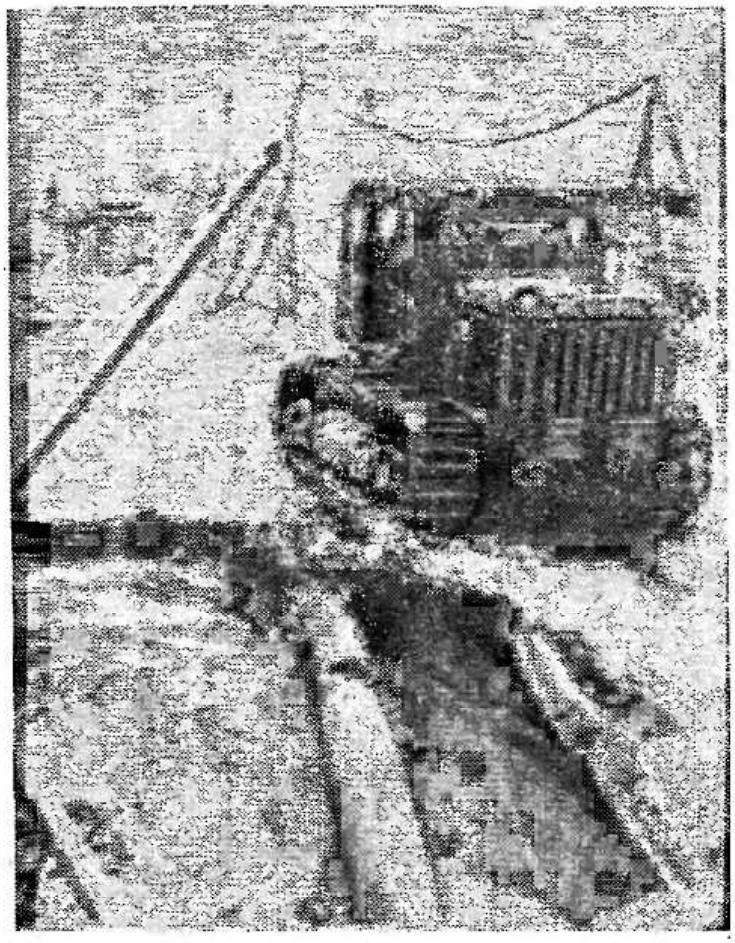


Рис. 148. Воронка обрушения вокруг водопонизительной скважины, образовавшаяся под влиянием пескования (котлован Волгоградской ГЭС)

вание воронок обрушения, размеры которых в некоторых случаях измеряются несколькими десятками кубических метров. В практике известны случаи провала построек вблизи скважин (водозаборы Воронежа, водопонизительные скважины Волгоградской ГЭС, дренаж в Ульяновске и другие объекты). Пример приведен на рис. 148. При образовании воронок и смешении пород вдоль оси выработки может происходить перетекание воды из одного водоносного горизонта в другой, загрязнение нижезалегающих водоносных горизонтов и утечка воды с образованием заболоченных территорий.

Вопросы ремонта запескованных скважин представляют сложную инженерную задачу, решение которой требует не только высокой квалификации технического персонала, но и проведения сложного комплекса обследований с применением машин и оборудования.

Во ВСЕГИНГЕО создана диагносцировочная машина СКВ-69 [47], которая по замыслу авторов должна выполнять при ремонте скважин операции: определять геологический разрез, интервалы залегания водоносных пластов, конструкцию скважины, тип и качество сооружения фильтра, диаметр и длину фильтра и обсадной колонны, наличие и качество цементного кольца за обсадной колонной; оценивать правильность установки фильтра, обсадной колонны и кондуктора; устанавливать причину выхода скважин из строя; определять зарастание и коррозию фильтра, водопропускную способность фильтра по его длине до и после ремонта; причину пескования скважин и литологию призабойной и прифильтровой зоны; обеспечивать правильный метод ремонта; эффективно контролировать качество ремонта скважины. При современном оснащении станция СКВ-69 может выполнять только электрический каротаж.

Прежде всего необходимо отметить, что запескованность скважины возникает вследствие ряда причин и может определяться:

1) некачественностью сальника при установке фильтра впотай;

2) повреждением пробки отстойника;

3) накоплением песка в отстойнике в процессе эксплуатации;

4) несоответствием номера сетки или шага намотки спирали гранулометрическому составу пород водоносного горизонта;

5) неравномерностью слоя обсыпки или отсутствием направляющих фонарей;

6) несоответствием подбора гравийной обсыпки составу водоносных пород;

7) повреждением водоприемной поверхности фильтра при спуске в скважину;

8) разрушением фильтра под влиянием коррозии.

Если недостатки фильтров, перечисленные в пунктах 1, 2, 3, относительно простые и могут быть исправлены с применением любого бурового станка или треноги с лебедкой, то неисправности, перечисленные в пунктах 4, 5, 6, 7, требуют проведения сложных работ с применением специального оборудования (домкратов грузоподъемностью 150—300 т, вибраторов различных конструкций и других механизмов).

До проведения инструментального обследования нельзя установить характер повреждения фильтра. Очистка занесенной песком скважины с помощью желонки или эрлифта в водоносных породах плывунного характера при больших напорах часто бывает не эффективной. В таких случаях прибегают к созданию противодавления путем подкачки воды насосами. Если установ-

лено, что поврежден сальник, то его цементируют или устанавливают вспомогательный сальник в межтрубном пространстве между надфильтровой трубой и рабочей колонной. В случае повреждения пробки отстойника в очищенный ствол скважины с противодавлением воды на забой опускают матерчатый мешок с цементом либо на забой заливают цементный раствор при помощи вспомогательной трубы. Для определения повреждения отдельных частей фильтра может потребоваться применение пакеров.

При неправильно подобранных фильтрах в песках с большим коэффициентом неоднородности ($k_н = 8 \div 15$) происходит накопление песка в фильтрах вследствие недостаточной прокачанности скважин перед вводом в эксплуатацию. Это чаще всего возникает в тех случаях, когда строительная прокачка проводится эрлифтами с малой производительностью (до 20—40 м³/ч), а скважина эксплуатируется центробежными погружными насосами с дебитом в 2—3 раза большим. В связи с этим образуются песчаные пробки, которые вследствие недостаточной величины погружения насосов под статический уровень не выносятся током воды на поверхность.

Замер глубины скважины позволяет быстро установить этот недостаток. Промерять глубину наиболее целесообразно штангами или утяжеленным патроном с желонкой, спускаемым на канате. С помощью груза, подвешенного на тросе, невозможно определить породу, которой занесен фильтр; желонка позволяет оценить состояние забоя и отобрать образец породы в фильтре. По этому образцу можно установить причины заноса фильтра и характер его повреждения:

а) если песок мелкий илистый с диаметром частиц во много раз меньше размера проходных отверстий установленной сетки, то причиной заноса является несоответствие номера сеток или гранулометрического состава гравийных обсыпок составу водоносных слоев;

б) если песок разнозернистый с частицами, диаметр которых превышает размер проходных отверстий сетчатых или щелевых фильтров, то причиной заноса является прорыв сетки или повреждение поверхности фильтра;

в) если песок разнозернистый с гравием и галькой, размеры которых превосходят размеры отверстий фильтра (сетчатого или щелевого), причем фильтр занесен на высоту, превышающую отметку надфильтровой трубы, то причиной заноса является подача породы по кольцевому зазору между надфильтровой и обсадной трубами.

Чтобы окончательно установить причину заноса фильтра, необходимо его очистить. Большинство организаций, производящих буровые и ремонтные работы, применяют традиционный способ очистки фильтров желонками, опускаемыми на забой на штангах или канате. Как показывает практика, такой способ очистки фильтров часто является причиной порчи и выхода из строя скважин. Очистка желонкой особенно опасна для скважин, оборудован-

ных фильтрами с двойной поверхностью фильтрации (сетка или проволока на трубе и т. д.). При работе желонкой осадки утрамбовываются, уплотняются и забиваются через перфорационные отверстия в зазор между сеткой и каркасной трубой, в результате чего может произойти выпучивание сетки и, как следствие, ее разрыв. При очистке щелевых фильтров желонкой порода может также уплотняться и заклиниваться в щелях.

Как показывает практика и по рекомендациям Я. С. Суреньянца, целесообразно при заносах фильтров применять поршневые желонки (рис. 149), при действии которых происходит отсасывание породы. Несмотря на эффективность, поршневые желонки еще не получили достаточно широкого распространения для очистки фильтров.

В неглубоких скважинах во избежание накопления осадков в фильтрах рекомендуется наращивать всасывающую трубу ниже заборного клапана приемной трубы, доходящей почти до дна фильтра. В таких установках диаметр всасывающей трубы, опущенной в фильтр, принимается в 2—3 раза меньше диаметра фильтра. При этом частицы грунта, попадающие в фильтр, всасываются с большими скоростями и выносятся на поверхность.

При эксплуатации скважин в напорных водоносных горизонтах, представленных мелкозернистыми песками, иногда наблюдается полный занос фильтра породой. В этом случае очистить его можно с помощью обратной промывки. Сущность этого способа состоит в следующем. Скважину наглухо закрывают фланцем с двумя отверстиями: одно для пропуска труб, а в другое вваривают патрубок для соединения со шлангом насоса.

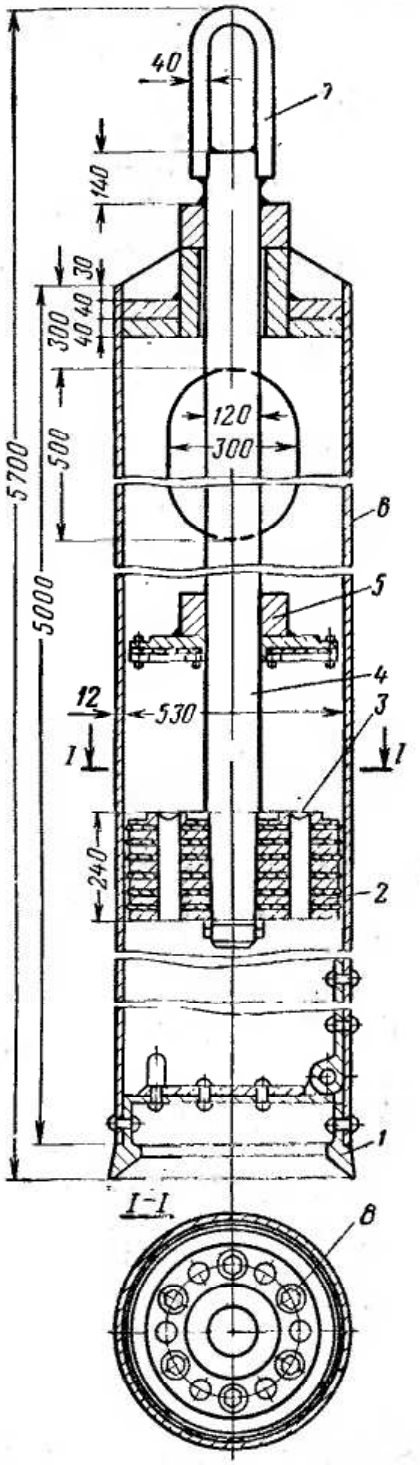


Рис. 149. Поршневая желонка:

1 — башмак; *2* — манжета; *3* — шариковые клапаны; *4* — шток поршня; *5* — ограничитель; *6* — корпус; *7* — серьга; *8* — болт

К фланцу над отверстием, предназначенным для труб, приваривают муфту, в которую закладывают сальниковую набивку. Перед очисткой фильтра трубы через сальник опускают в скважину до осадка, а патрубок второго отверстия соединяют шлан-

гом с насосом. При таком способе очистки в зависимости от глубины скважины можно применять различные насосы: поршневые и центробежные.

Схема установки показана на рис. 150. Вода в скважину нагнетается в пространство между обсадной и бурильной колоннами, а порода выносится вместе с водой по бурильной трубе. По мере прокачки фильтра и его освобождения от песка труба продвигается к забою через сальник.

В водоносных горизонтах с напором выше поверхности земли вода в скважину нагнетается насосом до тех пор, пока не обнажится верхняя рабочая часть фильтра. Дальнейший вынос породы

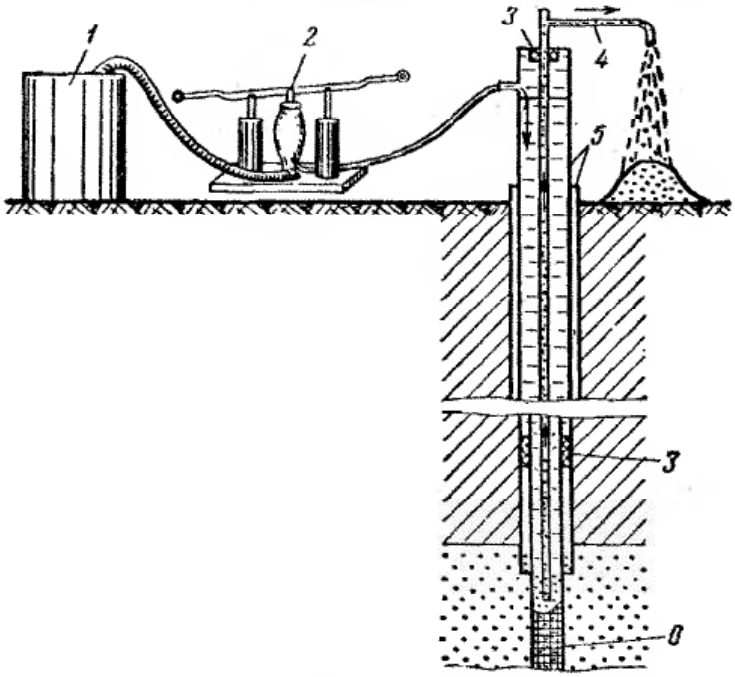


Рис. 150. Схема установки для очистки фильтров от песка в напорных водоносных горизонтах:
1 — емкость для воды; *2* — насос; *3* — сальники; *4* — отводящая труба; *5* — обсадные трубы; *6* — фильтр

из фильтра происходит под влиянием собственного напора, создаваемого водоносным горизонтом. В этом случае при диаметре рабочих колонн 200—350 мм используются вспомогательные бурильные или газовые трубы диаметром 32—38 мм.

Из всех известных способов очистки фильтров от заносов следует рекомендовать прокачку их эрлифтом. Этот способ наиболее эффективен, так как позволяет очистить фильтры в сжатые сроки, кроме того исключаются повреждения фильтров независимо от материала, из которого они изготовлены (сталь, дерево, пластические массы, фарфор, керамика, стекло и др.). С помощью эрлифта свободно удаляются как мелкие частицы, так и гравий, галечник. При извлечении же гравия из фильтра с помощью желонки возникают трудности.

Во многих руководствах, например в [78], приведены схемы монтажа эрлифтных установок. Очищать фильтры рекомендуется

при параллельном расположении водоподъемной и воздушной труб. Практика показала, что монтаж эрлифтной установки по схеме «рядом» имеет следующие недостатки:

а) в процессе сборки эрлифта при частом свинчивании и развинчивании газовых и воздушных труб ослабляются резьбы, а в связи с этим и обрываются трубы; для ремонта требуется поднимать водоподъемную и воздушную колонны и исправлять повреждения;

б) при образовании песчаных пробок в стволе скважины происходит занос водоподъемных и воздушных труб с уплотнением песка; в этих случаях спрессовавшиеся пробки невозможно продавить с помощью компрессора и тогда для запуска эрлифта требуется поднимать колонны и очищать их;

в) в плывунных породах водоподъемная и воздушная колонны могут заклиниваться и для их освобождения приходится применять различные методы (размыв водой, прокачиваемой по трубам, которые опускают в межтрубное пространство, применение вибраторов с установкой на водоподъемной колонне и др.); для очистки фильтров используют водоподъемные колонны диаметром 75—150 мм с применением воздушных труб диаметром 32—75 мм; воздух подается от компрессоров (3—6 м³/мин) под давлением, соответствующим глубине скважины.

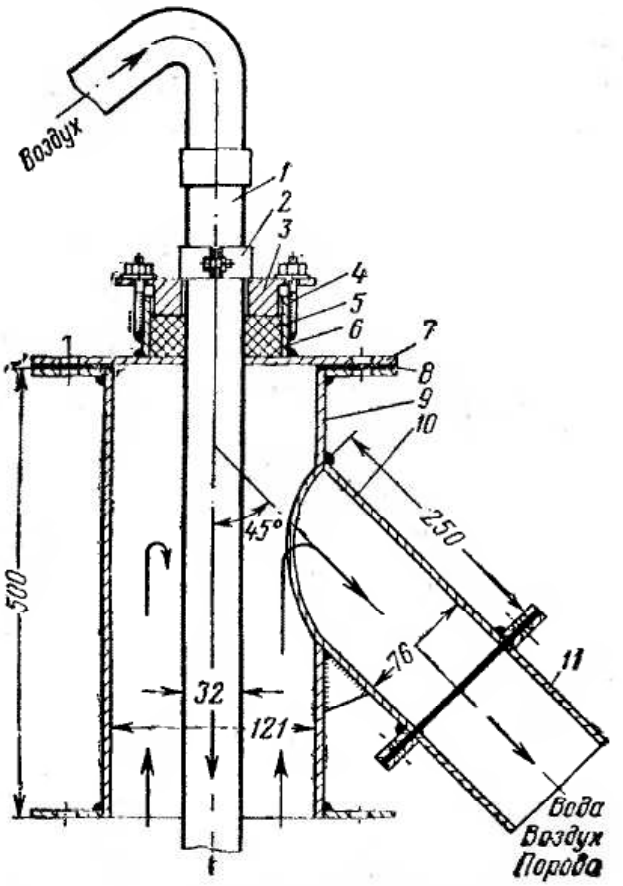


Рис. 151. Эрлифтная головка для прокачки скважин с помощью эрлифта:
1 — воздушная труба; *2* — хомут; *3* — зажимной фланец; *4* — болт; *5* — сальниковая набивка; *6* — корпус сальника; *7* — фланец; *8* — резиновая прокладка; *9* — водоподъемная труба; *10* — отводной патрубок; *11* — патрубок для шланга

Эрлифтная головка (рис. 151), применяемая при монтаже эрлифта с центральным расположением труб, позволяет прокачивать скважины в любых условиях. При больших заносах скважины породой, когда с помощью компрессора невозможно выдавить песчаную пробку, достаточно ослабить сальник и подтянуть лебедкой воздушную трубу до верхнего края пробки, чтобы эрлифт начал работать. Когда прокачиваются скважины больших диаметром, оборвавшиеся воздушные трубы будут всегда находиться внутри водоподъемных труб диаметром 100 мм и поймать оборвавшийся конец труб ловильным инструментом несложно.

В указанных случаях не возникает необходимости извлечения колонны водоподъемных труб, так как неполадки устраняются с помощью эрлифтной установки. При спаривании колонн можно полностью извлечь из скважины воздушные трубы и опустить их в зазор между эксплуатационной и водоподъемной колоннами.

При опускании воздушной колонны в межтрубное пространство легко и просто ликвидируется и эта неполадка с помощью компрессора. Указанная головка применима для эрлифтов с водоподъемными колоннами диаметрами 152, 102, 76 и 51 мм. Для этого к нижнему фланцу головки необходимо прикрепить переходной фланец, соединяемый с фланцем водоподъемной колонны. Описанная эрлифтная головка, предложенная автором, с успехом применяется в течение многих лет при прокачке скважин в различных гидрогеологических условиях.

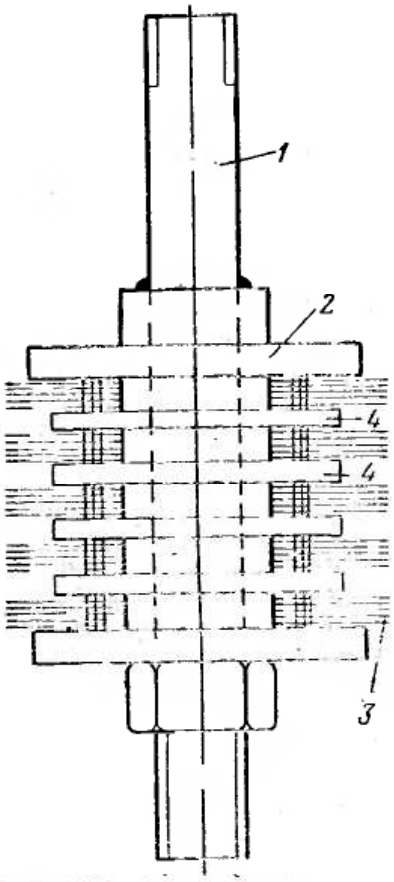


Рис. 152. Ерш для механической очистки фильтра:

1 — труба; *2, 4* — фланцы; *3* — щетина из проволоки

Слежавшиеся осадки в фильтрах можно рыхлить с помощью воздушной трубы, опускаемой в фильтр ниже края водоподъемных труб. Вначале производят рыхление, а затем откачку воды. Иногда на забой параллельно эрлифту спускают газовую трубу для подвода струи воды, разрыхляющей осадки. Опыт показывает, что при центральном расположении воздушной трубы эрлифта подводка воды для рыхления осадков не обязательна, так как эту операцию можно выполнить с помощью воздушной трубы. После очистки фильтра проводится опытная прокачка скважины с замером понижения уровня.

Сопоставление кривых дебита по данным первой и второй откачек (до очистки и после нее) позволит судить о результатах очистки. Если при откачках ранее нормально работавшей скважины будет обнаружен повторный заплыв фильтра породой, можно сделать вывод о повреждении фильтрующей поверхности; для исправления ее необходим ремонт, вплоть до смены фильтра.

Недостаточная или слабая подача воды скважиной при чистом забое свидетельствует о зарастании фильтра под влиянием физико-химических процессов. Для восстановления дебита старых скважин имеется много различных предложений, основанных на применении механических и химических средств. Нередко эти способы используют в комбинации как дополняющие друг друга.

При зарастании внутренних поверхностей фильтров и проходных щелей в них для очистки следует применять ерши-щетки—

металлические болванки длиной 0,5—1 м, на которых укреплена щетина из металлической проволоки (рис. 152). Ерш опускают в фильтр на тросе или штангах. При очистке ершом (вверх и вниз) металлическая щетина соскребает осадки с внутренней поверхности фильтра и части проходных отверстий; наиболее хорошо очищаются щелевые отверстия, совпадающие с направлением движения ерша в скважине (вертикальным или круговым).

Нередко ерши-щетки комбинируют со специальными наконечниками, через которые подается вода под большим давлением. Вода, выбрасываемая с большой силой из малых отверстий, смывает осадки, находящиеся на внутренней поверхности трубы и в проходных отверстиях. Для чистки фильтров от механического засорения полезно применять приспособления, создающие гидравлический удар и вакуумирование в скважине.

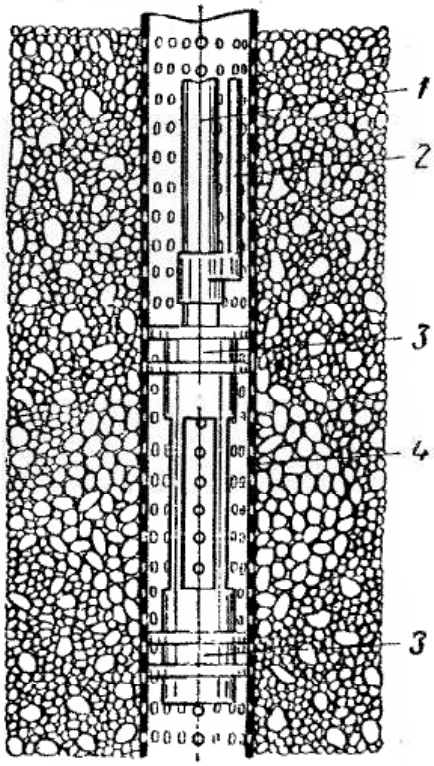


Рис. 153. Наконечник для позонной прокачки фильтров с помощью эрлифта:
1 — водоподъемная труба; *2* — воздушная труба; *3* — цилиндр с двумя сальниками и приемными окнами; *4* — фильтр

Иногда для прокачки фильтров используют прибор, который состоит из цилиндра с уплотняющими сальниками или манжетами на концах (рис. 153). В верхней части цилиндра вмонтированы водоподъемная и воздушная трубы, а в его теле между манжетами расположены всасывающие окна. Цилиндр опускают в фильтровую трубу и устанавливают на определенной высоте. Для прокачки фильтра применяется компрессор. Подаваемый воздух образует смесь с водой, которая при движении вакуумирует полость фильтра и одновременно выносит на поверхность частицы грунта, закупоривающие фильтр, и прилегающие к нему породы. По мере прокачки фильтра цилиндр продвигается. При таком способе применяются компрессоры с подачей небольшого объема воздуха, так как отсек фильтра, находящийся между двумя манжетами, не может обеспечить подачу необходимого количества воды для непрерывной работы эрлифта.

§ 41. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕБИТА ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Практика эксплуатации подтверждает, что производительность водозаборных скважин постепенно снижается вследствие проявления различных видов кольматажа: механического, химического и биологического (см. гл. III). Этот процесс неизбежен для

всех скважин, однако скорость его течения зависит от гидрогеологических условий, химического состава подземных вод, типа и конструкций фильтра, а также от условий эксплуатации. В связи с этим сроки экономической эксплуатации скважин могут колебаться от 2—3 до 10—20 лет и более.

Появление закупоривающих фильтры отложений связано с выпадением из воды химических соединений, образующихся в результате нарушения химического равновесия, а также с образованием продуктов коррозии металлических фильтров.

Если химический кольматаж фильтров скважин, обусловленный коррозией, можно избежать благодаря применению антикоррозионных покрытий или использованию коррозионноустойчивых материалов, то нарушение химического равновесия в подземных водах при водоотборе неизбежно, поэтому неизбежно снижение производительности скважин. В этих условиях необходимо предусматривать профилактические мероприятия для восстановления дебита скважин.

До настоящего времени мероприятия по восстановлению дебита скважин в процессе эксплуатации не нашли должного применения, и, как правило, водохозяйственные организации предпочитают ремонту и восстановлению дебита перебуривание скважин. Очевидно, такой подход нельзя признать рациональным. Фильтры водозаборных скважин, как и фильтры любого другого назначения, требуют регенерации. Однако если при промышленном фильтровании, как правило, с достаточной точностью известны параметры кольматажа и степень его проникновения в пористые фильтрующие среды, то в скважинах состав кольматирующих соединений весьма разнообразен, а размеры закольматированной зоны за контуром фильтра обычно не известны.

В связи с этим ВОДГЕО были проведены исследования состава осадков и натурные наблюдения зон кольматажа, позволяющие более обоснованно выбирать способы химических обработок скважин, снизивших производительность.

Извлечение фильтров из старых буровых скважин на различных объектах и фильтров водопонизительных скважин на котловане Волгоградской ГЭС, Лебединском карьере КМА, водозаборах Дзержинска, Риги и других подтвердило, что вне зависимости от толщины образовавшихся осадков в состав отложений, закупоривающих фильтры и прифильтровые зоны, входят следующие компоненты: $Fe(OH)_3$, $Mn(OH)_2$, $Mn(OH)_4$, $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$, $SiO_2 \times \times nH_2O$, FeS, $FeCO_3$, органические соединения и тонкодисперсные механические примеси. Эти соединения наиболее распространены, но в зависимости от количественного соотношения и времени их образования они могут иметь различную плотность и фильтрационные показатели.

Размеры зон кольматажа в скважинах с разными фильтрами, как правило, существенно различны (см. гл. III). Независимо от толщины зоны кольматажа вокруг фильтров во всех случаях

резко возрастают входные сопротивления, что обусловливает значительное уменьшение производительности скважин.

Структура и характер отложений сцементированных пород в зоне установки фильтров подтверждают, что все механические и гидромеханические способы очистки фильтров через ствол не могут удалить осадки на его внешней поверхности и в зоне прилегающих пород. Применение взрывного способа также малоэффективно, поскольку при взрыве растрескиваются зацементированные зоны, образуются микротрещины без нарушения связи химических осадков с частицами горных пород.

Не останавливаясь на возможности применения других гидромеханических методов восстановления дебита скважин (ультразвукового, при помощи ударных волн, основанных на гидравлическом эффекте и др.), находящихся на стадии экспериментальных исследований, можно утверждать, что на данном этапе наиболее эффективно воздействие химических реагентов на закольматированные фильтры и прифильтровые зоны и, в частности, соляной, серной, уксусной, сульфаминовой кислот, а также полифосфатов или их смесей с различными добавками (муравьиной, плавиковой и др.).

При воздействии химических реагентов кольматирующие соединения в результате реакций растворяются и благодаря этому восстанавливаются размеры проходных отверстий в фильтрах и проницаемость прифильтровых зон скважин.

В настоящее время в отечественной практике наиболее полно разработаны и применяются следующие виды обработок для восстановления дебита скважин:

кислотные;

полифосфатные;

комбинированные, в которых сочетаются обработки реагентами с гидромеханическими (взрывными, вибрационными и др.).

Выбор того и иного метода зависит от ряда условий: химического состава осадков, конструкции фильтров, минерального состава обсыпок, конструкции оголовков скважин и их расположения в сооружениях (колодцы, галлереи и др.).

Кислотной обработкой фильтров буровых скважин предусматриваются следующие цели:

а) повышение производительности скважин, дебит которых снизился вследствие выпадения осадков, закупоривших проходные отверстия фильтров;

б) уменьшение механических усилий при извлечении старых фильтров путем растворения зацементированной зоны пород вокруг фильтров.

Обработка фильтров кислотами должна проводиться при соблюдении следующих условий.

1. По скважинам, намечаемым к обработке, необходимо представить геолого-техническую документацию (геологический разрез, конструкция скважины и гранулометрический состав пород,

окружающих фильтр), а также полный химический анализ эксплуатируемых вод и анализ осадков, закупоривающих фильтр.

2. Каркасы обрабатываемых фильтров должны быть изготовлены из антикоррозионных материалов (нержавеющая сталь, простая сталь с полимерными покрытиями, пластические массы, керамика, дерево и др.).

3. Применение ингибированных кислот или других стабилизаторов, которые обеспечивают растворение окислов без воздействия на чистые металлы, при обработке фильтров из простых стальных труб.

Для очистки фильтров в качестве основного растворителя применяют техническую соляную кислоту, под воздействием которой соли переходят в растворимое состояние по следующим уравнениям:

$$Fe(OH)_3 + 3HCl = FeCl_3 + 3H_2O,$$

$$CaCO_3 + 2HCl = CaCl_2 + H_2O + CO_2,$$

$$MgCO_3 + 2HCl = MgCl_2 + H_2O + CO_2,$$

$$FeCO_3 + 2HCl = FeCl_2 + H_2O + CO_2,$$

$$FeS + 2HCl = FeCl_2 + H_2S,$$

$$CuS + 2HCl = CuCl_2 + H_2S.$$

Образующиеся в результате указанных реакций растворенные продукты и газы удаляются из скважины при последующей откачке.

Для промывки фильтров используют техническую соляную кислоту концентрацией от 18 до 35,2%. Количество кислоты, необходимое для обработки фильтров, зависит от объема фильтра, его диаметра, длины и предполагаемой зоны кольматации. При заливке кислоты необходимо учитывать возможность ее разбавления, так как известно, что кислота под влиянием своей большой плотности при вытеснении воды из фильтра смешивается с ней.

Для предупреждения коррозионного влияния кислоты на конструктивные элементы фильтров рекомендуется пользоваться ингибированными кислотами. Для обработки скважин хозяйственно-питьевого водоснабжения органами саннадзора разрешается использовать ингибитор Катапин К в разведенном виде при соотношении 1 : 2500. Катапин К является одним из наиболее эффективных ингибиторов, который не выпадает в осадок после нейтрализации кислоты.

При обработке скважин соляной кислотой и растворении железистых соединений происходит нейтрализация соляной кислоты. Когда концентрация в растворе водородных ионов pH $< 4{,}5$, трехвалентное железо $Fe(OH)_3$ находится в растворе, но при увеличении

pH железо будет коагулировать, переходить в осадок и откладываться в порах прилежащих к фильтру пород.

Для предупреждения этих явлений были проведены работы [3], которые подтвердили, что при введении 0,5—0,8% триполифосфата в качестве стабилизирующей добавки, порог коагуляции железа сдвигается с pH = 6,1 ÷ 6,8 до pH = 10,65 ÷ 12,95, откуда следует, что выпадение $Fe(OH)_3$ в осадок может происходить только в щелочной среде, что практически в подземных водах не бывает.

Известно, что в пресных питьевых водах pH колеблется в пределах 6—8. Кроме того, при введении триполифосфата в соляную кислоту не требуется добавлять ингибиторы, так как фосфаты замедляют процессы коррозии. Некоторые осадки на фильтрах содержат большое количество алюмосиликатов (глин) и гель

Таблица 86

Техническая характеристика и стоимость реагентов, применяемых для восстановления производительности водозаборных скважин

Наименование реагентов	ГОСТ, ТУ, МРТУ	Основное вещество	Содержание основного вещества, %	Цена * за 1 т руб.—коп.
Кислота соляная, башенная (отход производства)	ТУ-38-103-141—72	HCl	⩾ 24,5	5—00
Кислота соляная из абгазов хлорорганических производств:	МРТУ-6-01-193—68	HCl		
сорт I			30	12—30
сорт II			27,5	5—00
Кислота соляная синтетическая:	ГОСТ 5.1691—72	HCl		
марка А			35	40—60
марка Б			33	33—70
марка В			32	26—00
Кислота соляная техническая	ГОСТ 1382—69	HCl		
сорт I			27,5	22—30
сорт II			27,5	20—90
Триполифосфат натрия технический из термической фосфорной кислоты:	ГОСТ 13493—68	P_2O_5		
сорт I			56,5	363—00
сорт II			54,0	300—00
Триполифосфат натрия для горнорудной промышленности:	ТУ-6-08-282—74	P_2O_5		
сорт I			53,5	276—00
сорт II			51,5	230—00
Кислота фтористоводородная (плавиковая)	ГОСТ 2567—73	HF	40,0	325—00

* Выписка из прейскуранта № 05—10 Госкомитета цен Совета Министров СССР, Прейскурантиздат, 1974.

кремнекислоты, которые связывают осадки в крепкие, конгломератообразные структуры. В этих случаях для их растворения к раствору соляной кислоты необходимо добавлять 6—8% плавиковой кислоты. Такая комбинация кислот носит название глинокислоты [75]. При воздействии плавиковой кислоты на эти осадки растворение протекает по следующим уравнениям:

$$SiO_2 + 6HF = H_2SiF_6 + H_2O,$$

$$Al_2O_3 + 12HF = 2H_3AlF_6 + 3H_2O.$$

При действии глинокислоты на карбонатные соединения реакция протекает следующим образом:

$$CaCO_3 + 2HF = CaF_2 + 2H_2O + CO_2.$$

При действии глинокислоты на глинистые соединения и карбонатные осадки могут образовываться труднорастворимые соединения. В этих условиях потребуется проводить обработку в две фазы: вначале обрабатывать скважины соляной кислотой для удаления карбонатов, а затем вторично проводить глинокислотную обработку.

В табл. 86 приведены техническая характеристика и стоимость реагентов, применяемых при кислотных обработках.

Методы кислотной обработки

Выбор метода кислотной обработки скважин зависит от конструкции фильтров, химического состава отложений, расположения скважины в системе (подземная галерея, смотровой колодец) и др. В настоящее время применяются два основных метода:

кислотная ванна;

задавливание кислоты за контур фильтра сжатым воздухом.

Кислотная ванна может применяться в скважинах, где статический уровень находится на глубине 50—60 м и более. В этих условиях компрессоры с давлением 6—7 кгс/см² для задавливания кислоты на контур не применимы. В скважинах, где гравийные обсыпки фильтров выведены до поверхности земли, задавливаемая кислота поднимается по затрубному пространству, заполняет приемные колодцы раствором и выделяющимися газами. В указанных выше условиях скважины необходимо обрабатывать при помощи кислотных ванн.

Метод кислотной ванны заключается в том, что в скважину по трубкам заливают реагент, который под влиянием большой плотности и процессов диффузии проникает за контур фильтра и растворяет осадки. При этом способе обработки скважин необходимо учитывать диаметр фильтра, его длину и размер зоны кольматажа.

Для определения количества кислоты, необходимой для кислотной ванны, можно ориентировочно пользоваться данными табл. 87.

Таблица 87

Количество кислоты, необходимое для заполнения фильтра и порового пространства

Диаметр фильтра, м		Количество кислоты на м фильтра, л	Объем кислоты (в л), необходимый для заполнения порового пространства (на 1 м) при толщине зоны кольматации, мм		
наружный	внутренний		100	200	500
112	100	7,85	16,5	48,9	240
168	150	17,66	21	58	262
219	200	31,40	25	65,5	280
273	250	49,06	29,3	74,3	303
325	300	70,66	33,3	82,5	324

Примечание. Объем порового пространства принят равным 25% от объема пород принятой зоны.

При кислотных ванных процесс растворения осадков протекает медленно, как правило, не контролируется понижение концентрации реагента и время окончания обработок.

Обычно кислоту заливают в скважину и через 1 сут откачивают. В некоторых случаях кислоту перемешивают при помощи крыльчатки или перфорированного диска, опускаемого на штангах. Это ускоряет растворение осадков и активизирует работу реагента.

Обработка скважин методом кислотной ванны в общем случае обеспечивает незначительное приращение удельных дебитов скважин по абсолютной величине и несущественное уменьшение показателя обобщенного сопротивления фильтров и прифильтровых зон. По данным расходометрии отмечается улучшение фильтрационных свойств призабойной зоны в первоначально более проницаемых зонах фильтра.

Задавливание кислоты за контур фильтра сжатым воздухом было предложено автором в 1952 г. и опубликовано в 1954 г. [30]. Данный метод впервые был опробован на одном из водозаборов в Дзержинске в 1958 г. [32]. Схема оборудования скважины для кислотной обработки представлена на рис. 154, а конструкция — на рис. 155.

Для монтажа оголовка к обсадной трубе *1* приваривается фланец *2*, к которому с помощью болтов и резиновой прокладки прикрепляется фланец оголовка *3*. Последний имеет три отверстия, из которых отверстие *4* предназначается для соединения с компрессором, отверстие *5* — для выпуска воздуха и газов, отверстие *6* по центру фланца предназначается для пропуска заливочных

(эрлифтных) труб диаметром 76 мм. Для герметизации отверстий на фланце приварена муфта *7*, куда закладывается сальниковая набивка *8*, которая зажимается уплотнительным кольцом *9*. На патрубке, который ввинчивается в отверстие *5*, имеется вентиль

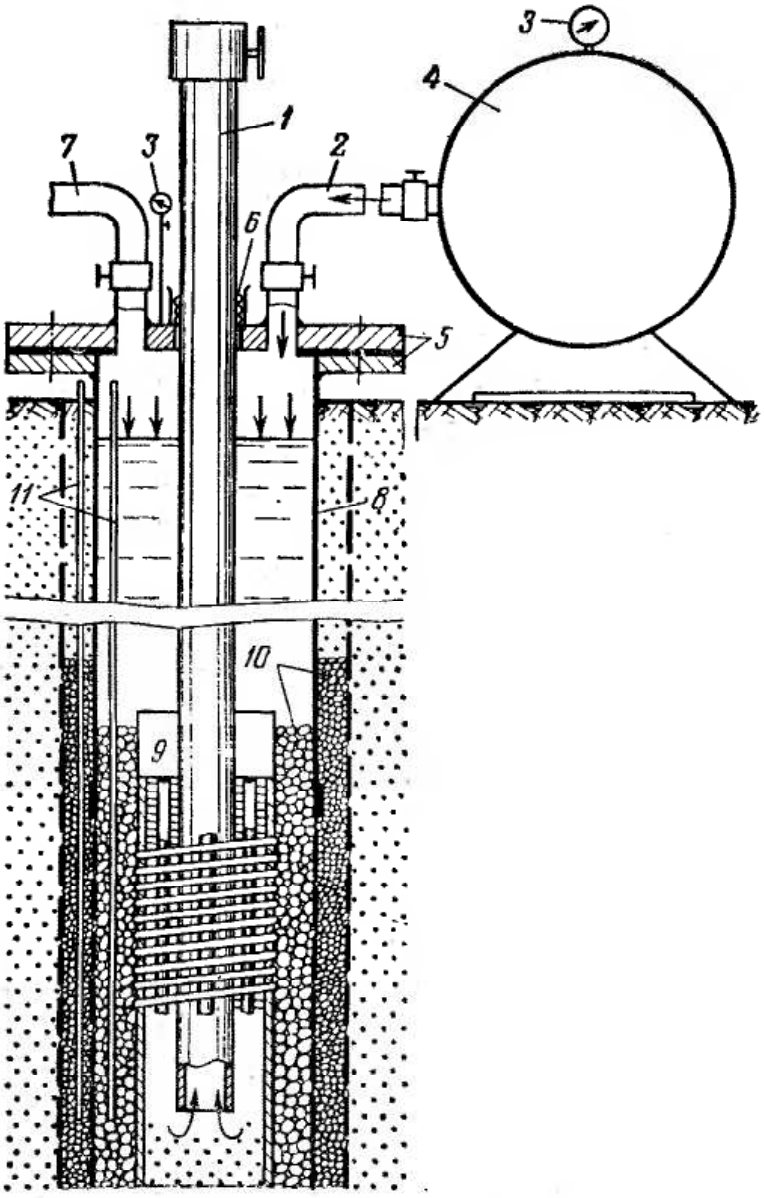


Рис. 154. Схема установки для обработки скважины кислотой по методу задавливания сжатым воздухом:

1 — труба для заливки кислоты; *2* — шланг; *3* — манометры; *4* — воздухосборник; *5* — фланцы; *6* — сальник; *7* — труба для отвода газа; *8* — обсадная труба; *9* — фильтр; *10* — обсыпка; *11* — пьезометры

для сброса газов и манометр, который фиксирует давление, создаваемое при нагнетании воздуха, и тем самым определяется положение уровня отжатой воды в скважине.

После монтажа оборудования производится опробование собранной схемы. Для этого в скважину нагнетают компрессором воздух до 1 кгс/см^2 и наблюдают за манометром. Падение давления

указывает на недостаточную герметичность монтажной схемы. Утечки воздуха должны быть ликвидированы. После этого в скважину заливают раствор соляной кислоты самотеком из емкости, расположенной над устьем скважины, или путем закачки с помощью насоса.

Цикл обработки заключается в следующем. После заливки раствора кислоты в скважину задвижку *10* на заливочных трубах перекрывают и компрессором нагнетают воздух для отжатия уровня воды до определенного заданного положения, после чего компрессор отключают, вентиль на патрубке *4* перекрывают. Затем вентиль газоотводной трубки *5* открывают и выпускают воздух и газы.

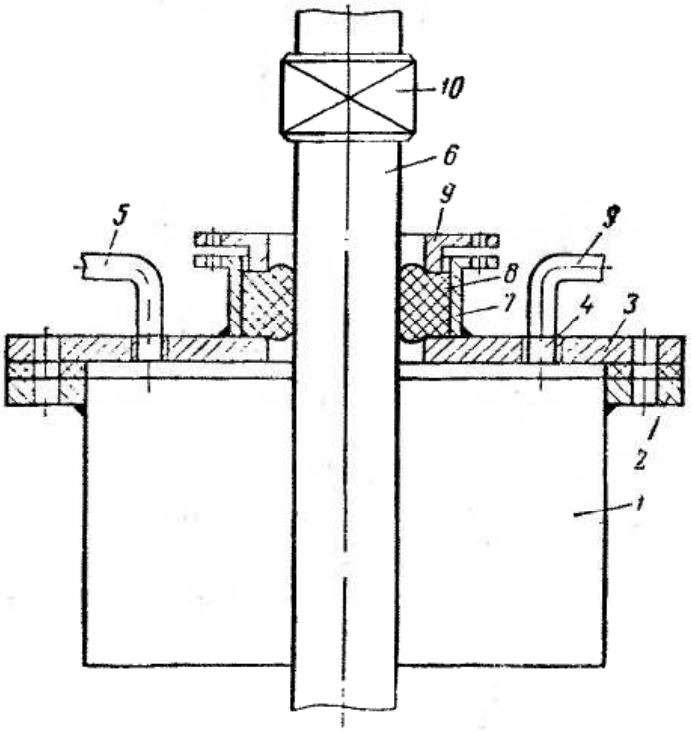


Рис. 155. Конструкция оголовка скважины

Раствор, отжатый за контур, возвращается в фильтр скважины, где, смешиваясь с кислотой, не вошедшей в реакцию, повышает свою концентрацию. Интервал между циклами по задавливанию кислоты за контур принимается 5—10 мин.

При взаимодействии раствора соляной кислоты с отложениями, которые переходят в растворенное состояние, число циклов при обработке обычно составляет 8—10, а время обработки — одна рабочая смена.

Если устье скважины расположено в месте, труднодоступном для производства работ и обеспечения условий техники безопасности, необходимо наращивать специальный оголовок и выводить его выше поверхности земли. Оголовок изготовляют из патрубка того же диаметра, что и устье скважины. На концах патрубка приваривают два фланца: одним патрубок крепят к устью скважины, а на другой прикрепляют крышку с сальником для пропуска заливочных труб.

Свободное положение заливочной трубы в водоподъемной, опущенной через сальник, позволяет регулировать высоту ее подъема в тех случаях, когда в фильтре после обработки образовалась пробка из пород и осадков.

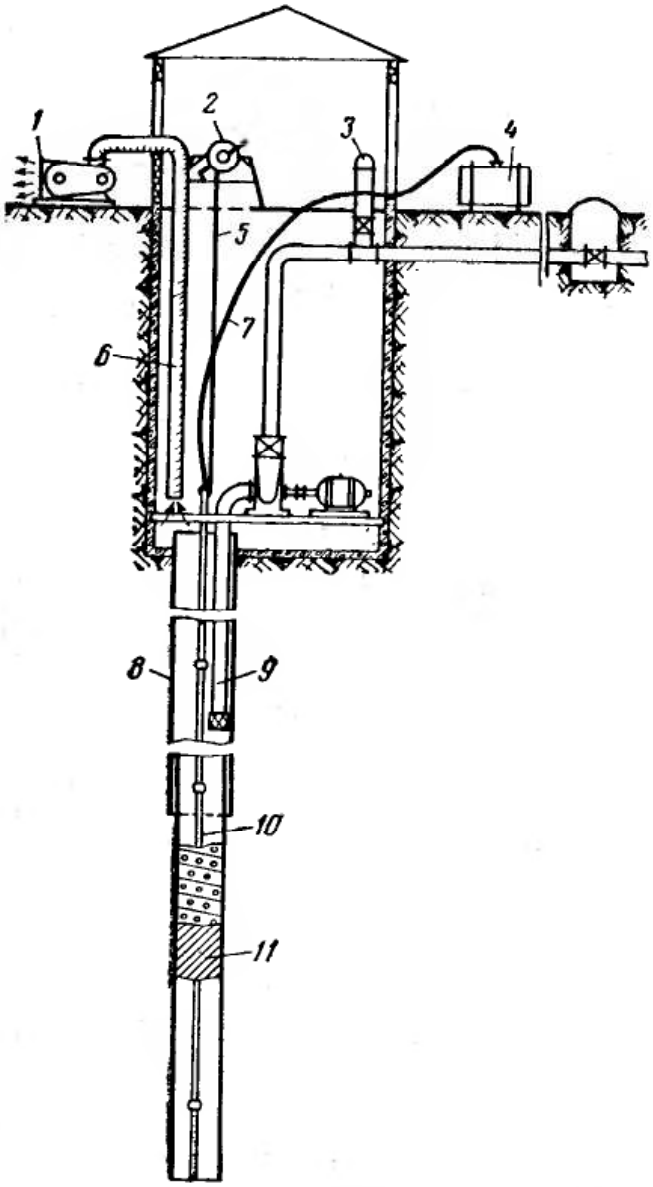


Рис. 156. Схема установки для кислотной обработки, расположенной на дне шахтного колодца:

1 — вентилятор; *2* — лебедка; *3* — выбросная труба; *4* — емкость для кислоты; *5* — трос; *6* — всасывающая труба вентилятора; *7* — шланг; *8* — рабочая колонна; *9* — приемная труба; *10* — труба для заливки кислоты с перфорированными наконечниками; *11* — фильтр

После очистки с помощью эрлифта демонтируют оголовок, воздушные и водоподъемные трубы. Опыт показал, что после кислотной обработки в пространстве между зеркалом подземных вод и верхним фланцем оголовка остается объем, который может быть заполнен газом высокой концентрации, способным вызвать отравление. Для того, чтобы полностью освободиться от газов, перед снятием оголовок необходимо продуть воздухом от компрессора, открыв воздушный кран. Воздух, который будет циркулировать в этом пространстве, снизит концентрацию находящегося там газа или совсем вытеснит его. Проведенная операция обеспечивает безопасность при снятии оголовка с устья скважины, однако проводить ее необходимо в противогазе.

Особое внимание должно быть обращено при обработке скважин, находящихся в глубоких шахтах (рис. 156). При воздействии кислоты на осадки выделяющиеся газы будут собираться в оголовке скважины, а также могут накапливаться и на дне шахты, проникая по затрубному пространству скважины. Такие явления наблюдались, когда гравийная обсыпка вокруг фильтров была выполнена до устья скважины. Для удаления газов на поверхности устанавливают вентиляторные установки, заборный рукав которых опускается до дна шахты.

Проведение солянокислотных обработок на скважинах питьевого водоснабжения разрешено органами Министерства здравоохранения СССР. Однако иногда возникают опасения из-за растекания кислоты за контур фильтра на большие расстояния и возможности попадания ее в соседние скважины при групповом их расположении. Эти опасения представляются необоснованными, что подтверждается анализом процесса обработок и данными фактических наблюдений.

Результаты наблюдений, проведенные на Рижских водозаборах при обработках фильтров HCl, показывают, что при закачке кислоты за контур гравийных фильтров в объеме от 1000 до 2000 кг она нейтрализуется накопившимися в фильтрах осадками и при откачке сравнительно небольших объемов воды скважины полностью очищаются от остатков кислоты, что подтверждается данными табл. 88.

Таблица 88

Остаточное содержание кислоты и количество откачанной воды для полного удаления HCl из скважин, оборудованных фильтрами гравийного типа диаметром 800 мм после обработки

№ скважины	Количество залитой кислоты, кг	Время обработки, ч	Число задавливаний	Остаточная кислота после обработки, %	Количество воды, откачанной из скважин для полного удаления кислоты, м³
23	840	2	8	0,73	12,0
27	1050	2	7	0,08	6,0
103	2100	2	15	0,00	6,0
117	1960	2	12	0,16	3,0
119	1920	2,5	11	0,04	2,0
122	1890	3	12	0,00	0,0
124	1400	3	10	0,00	0,00
126	1260	2,5	11	0,30	1,50

Примечание. Для обработки скважин применялась техническая соляная кислота с исходной концентрацией 27,5%.

В настоящее время кислотные обработки скважин начинают приобретать массовый характер. Они применялись при восстановлении дебита скважин на водозаборах и дренажах Дзержинска, Риги, Ульяновска, Вильнюса, Каменки-Днепровской, а также на объектах сельскохозяйственного водоснабжения в подразделениях объединения Россельхозводстрой, проводящих работы в Новосибирской, Омской, Белгородской областях и др. Общее число скважин, где применялись солянокислотные обработки, превышают 1000.

Для выяснения влияния реагентных обработок на производительность скважин и на приток воды к фильтрам ВОДГЕО были

проведены эксперименты с использованием методов расходометрии на нескольких десятках скважин водозабора Риги, дренажах Каменки-Днепровской, Знаменки и др. Исследования подтвердили, что приток воды в скважину происходит на локальных участках фильтра с большей его нагруженностью в верхней части.

Для анализа работы фильтров различных конструкций и в разных эксплуатационных условиях и выяснения влияния кислотных обработок на изменение притока воды рассмотрим данные расходометрии по скважинам водозабора Балтэзерс [42].

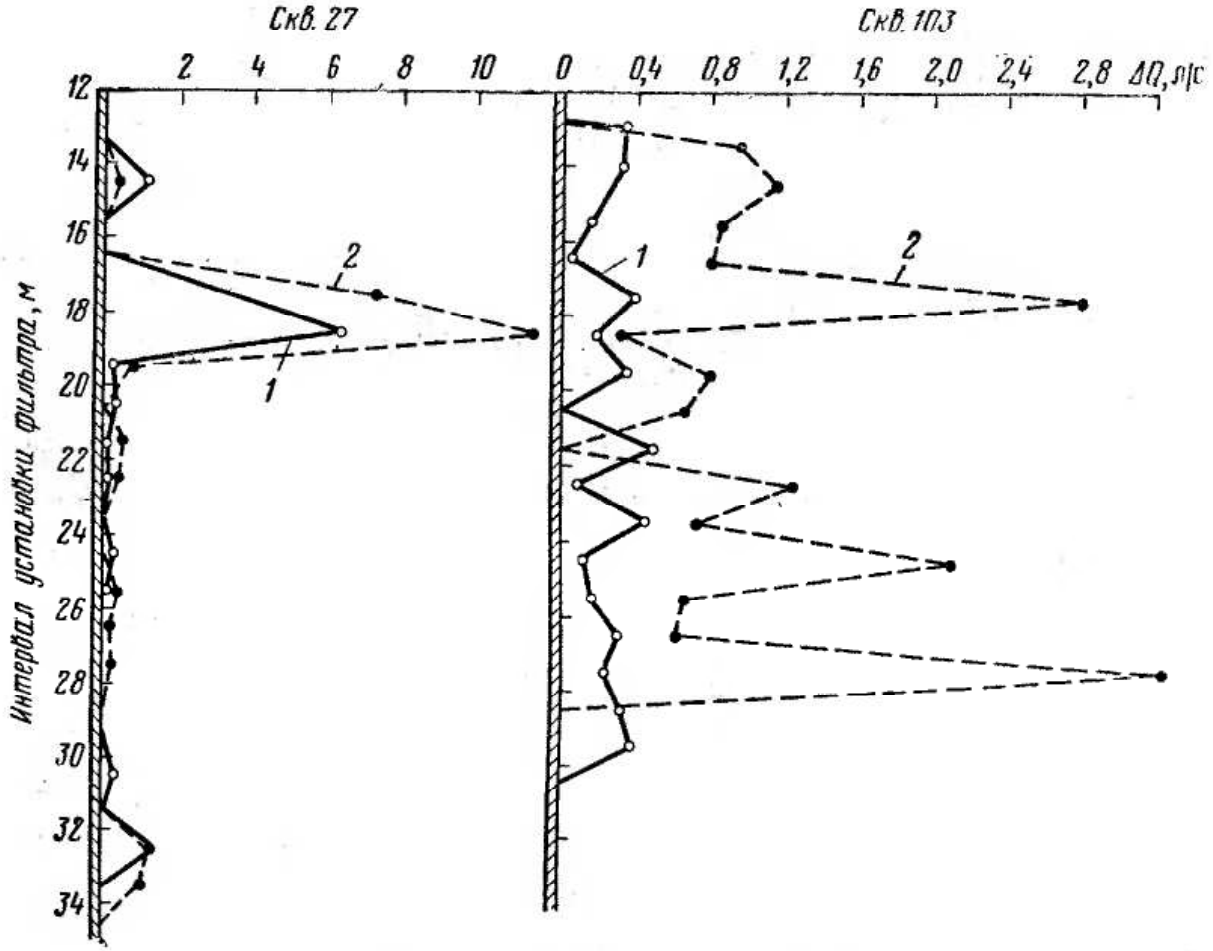


Рис. 157. Графики расходометрии по скважинам, оборудованным гравийными фильтрами, до (кривая *1*) и после (кривая *2*) кислотной обработки

На рис. 157 приведены графики расходометрии по скв. 27 и 103, в которых установлены фильтры с рыхлой гравийной обсыпкой. Из рассмотрения графиков следует, что при одинаковых условиях сифонного отбора из скважин приток воды по высоте фильтра крайне неравномерен. Аналогичная картина наблюдается и по фильтрам блочного типа, установленным в скв. 25 и 109 (рис. 158).

Кроме того, в этих опытах было установлено, что при задавливании кислоты за контур фильтра проницаемость его по всей длине не восстанавливается.

Кислота выходит за контур фильтра по наиболее проницаемым участкам, и поэтому после кислотных обработок на этих участках

происходит наибольшее растворение осадков и максимальное приращение водопритока. При существенной фильтрационной неоднородности призабойной зоны основная часть фильтра остается закольматированной (см. рис. 157, скв. 27).

Из аналогичных наблюдений, которые были сделаны и по другим скважинам, следует сделать важный для практики вывод: перед началом кислотных обработок для более равномерного растворения закупоривающих осадков и увеличения скорости взаимодействия кислоты с породой необходимо диспергировать

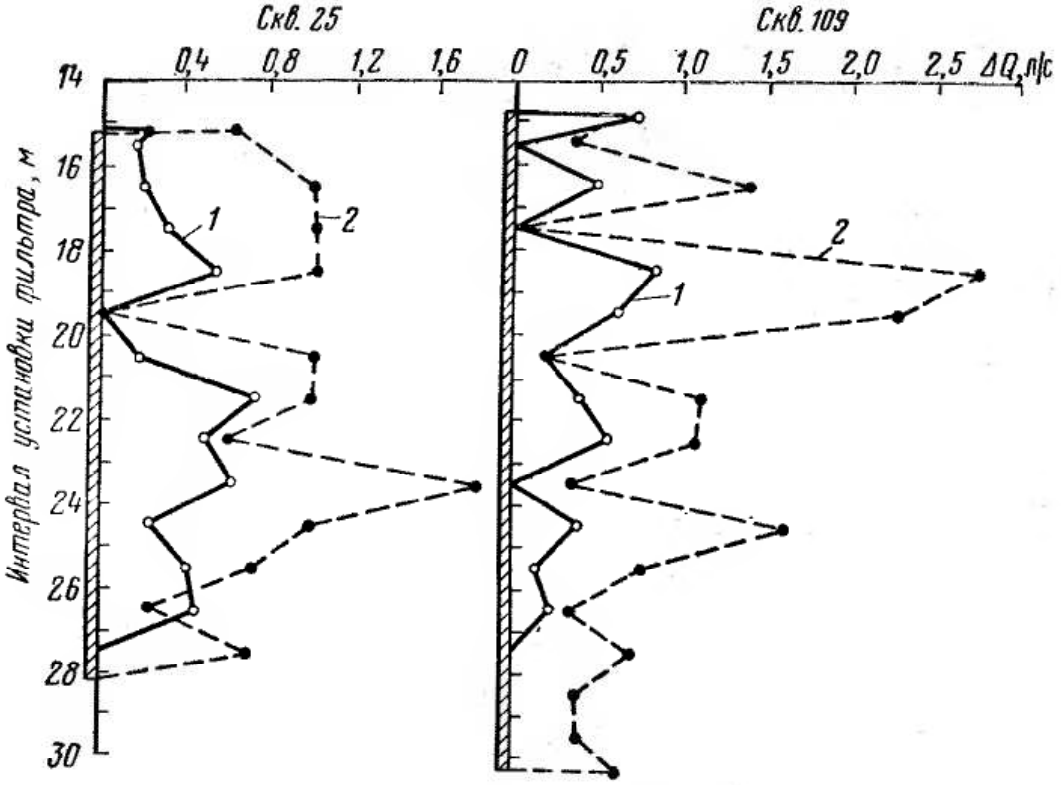


Рис. 158. Графики расходометрии по скважинам, оборудованным фильтрами блочного типа, до (кривая *1*) и после (кривая *2*) кислотной обработки

сцементированную зону фильтра взрывным или другим гидромеханическим методом.

Заключительным этапом кислотной обработки скважин являются откачки, которые способствуют удалению из фильтров и ствола скважины накопившихся осадков, солей, находящихся в растворенном состоянии, а также остатков кислоты и ингибиторов, не вошедших в реакцию. Откачку рекомендуется проводить сразу после окончания солянокислотной обработки, чтобы предупредить вторичное выпадение в осадок гидроокиси железа.

При заносе фильтра песком для снижения входных скоростей и замедления пескования в процессе откачек необходимо стремиться к полному открытию рабочей части фильтра по возможности в короткие сроки. Для освобождения верхней части ствола

скважины от остатков кислоты рекомендуется в конце прокачек провести промывку, используя воду, откачиваемую эрлифтом из нижней части скважин.

Чтобы оценить эффект солянокислотной обработки, определяют дебит скважины при двух-трех понижениях. В процессе откачки необходимо следить за выносом пород из скважины, проводить химическое опробование воды на содержание в ней HCl и определять дебит скважины для подсчета суммарного объема откачиваемой воды.



Рис. 159. Защитная одежда рабочих при кислотных обработках

Прокачка скважины после кислотной обработки считается законченной, когда откачиваемая вода станет чистой, т. е. будет иметь естественный химический состав. Как показала практика, откачку в течение одной рабочей смены ориентировочно можно считать достаточной для очистки скважины от остатков кислоты.

Из скважин питьевого назначения в конце откачки отбирают пробы воды на химический и бактериологический анализы. После заключения органов санитарного надзора скважину можно подключить в сеть.

Обрабатывать скважины соляной кислотой необходимо согласно «Правилам безопасности при эксплуатации водопроводно-канализационных сооружений», изданным Госстройиздатом (1970 г.), так как несоблюдение их может привести к тяжелому отравлению. Необходимо иметь в виду, что отравление может наступать не только вследствие вдыхания паров соляной кислоты, но и под действием других газов, в частности сероводорода, который может выделяться из воды при растворении сульфидных соединений в процессе обработки скважин соляной кислотой.

Соляная кислота является ядовитой жидкостью. Попадание концентрированной кислоты на кожу вызывает ожоги, а вдыхание ее паров — удушье и отравление. Все соединительные узлы монтажной схемы оборудования должны быть герметичными,

недопускающими утечек. Трубу для выпуска воздуха и газов из скважины необходимо выводить в подветренную сторону. Кислоту для залива должны подготовлять рабочие, одетые в специальные резиновые или шерстяные костюмы, резиновые сапоги, перчатки и противогазы (рис. 159).

При необходимости разбавления соляной кислоты водой для снижения ее концентрации следует заливать кислоту в воду, находясь с наветренной стороны. Бочки с кислотой надо держать под навесом или накрывать брезентом во избежание нагревания от солнца, так как при этом в них поднимается давление и при отвинчивании пробок происходит сильное разбрызгивание кислоты. Вокруг заливочной емкости должна быть сооружена площадка с подведенным к ней прочным пологим настилом для закатывания бочек. Место работ не должно загромождаться подсобным и посторонним оборудованием.

Для безопасности ведения работ при обработке скважин, устья которых расположены в шурфах или галлереях, патрубки оголовков следует наращивать и выводить через смотровые колодцы на дневную поверхность. Чтобы оказать срочную помощь потерпевшему, на месте ведения работ необходимо иметь чистую воду (не менее 100 л), раствор двууглекислой воды (не менее 0,5 л), раствор борной кислоты (не менее 0,5 л) и вату.

При проведении работ в помещениях и шахтах должна быть обеспечена нормальная вентиляция.

Полифосфатные обработки

Растворяющее воздействие соляной кислоты на осадки часто сопровождается выделением газов H_2S и CO_2, которые требуют соблюдения строгих правил по технике безопасности. Кроме того, в южных районах нашей страны для обсыпки фильтров часто применяется гравий, содержащий известковистые включения (например Евпаторийская смесь).

Гравий может растворяться под действием кислот, что будет приводить к его просадке и вызывать пескование скважин. Большие неудобства связаны также с транспортными перевозками и хранением соляной кислоты.

Указанные выше причины привели к необходимости поисков других химических реагентов, способных растворять железистые и карбонатные соединения. Применение фосфатов в ВОДГЕО было начато для стабилизации воды при законтурном заводнении нефтяных скважин [12], а позднее для восстановления дебита скважин [4].

В работах по регенерации скважин рассматривалась возможность применения солей фосфорной кислоты двух видов: гексаметафосфата натрия $Na_2[Na_4(PO_3)_6]$ и триполифосфата натрия

$Na_5P_3O_{10}$. Воздействие этих солей на железистые и карбонатные отложения представлены следующими уравнениями:

$$Na_2[Na_4(PO_3)_6] + Fe(OH)_3 = Na_2[NaFe(PO_3)_6] + 3NaOH,$$

$$Na_2[Na_4(PO_3)_6] + 2FeCO_3 = Na_2[Fe_2(PO_3)_6] + 2Na_2CO_3,$$

$$Na_2[Na_4(PO_3)_6] + 2CaCO_3 = Na_2[Ca_2(PO_3)_6] + 2Na_2CO_3,$$

$$3Na_3P_3O_{10} + 5Fe(OH)_3 = Fe_5(P_3O_{10})_3 + 15NaOH,$$

$$2Na_5P_3O_{10} + 5CaCO_3 = Ca_5(P_3O_{10})_2 + 5Na_2CO_3$$

$$2Na_5P_3O_{10} + 5FeCO_3 = Fe_5(P_3O_{10})_2 + 5Na_2CO_3.$$

Исследованиями было установлено, что для восстановления дебита скважин полифосфаты могут быть более успешно использованы в двух вариантах: в качестве монореагента и в качестве добавки к соляной кислоте для стабилизации, предупреждающей выпадение железа в осадок при кислотных обработках.

Лабораторными исследованиями (В. Т. Гребенниковым) было установлено, что при содержании 7% триполифосфата в водном растворе растворяется до 32% железистого кольматанта и что оптимальная концентрация триполифосфата натрия находится в пределах 8—12%. В работах ВОДГЕО в основном использовался триполифосфат натрия. Этот реагент представляет собой порошок белого цвета, хорошо растворимый в воде и кислотах.

Раствор для обработки скважин готовят на поверхности в емкостях, перемешивание в которых осуществляется при помощи лопастных мешалок. Для этого рассчитывается объем емкости, куда засыпают 8—12% порошка триполифосфата. После растворения его сливают в скважину по шлангу.

При проведении обработок в Ульяновске применяли и другой способ — приготовляли раствор триполифосфата в стволе скважины. Для этого определяли объем столба воды, находящийся в скважине, а затем количество порошка для данного объема воды. Чтобы триполифосфат быстрее растворялся, в скважину до забоя опускали воздушные трубы диаметром 1—1,5″, которые соединяли шлангом с компрессором.

С помощью рессивера подбирают такое давление, при котором воздушная эмульсия не поднимается до устья скважины на 1,5—2 м. После этой операции в устье скважины засыпается порошок, который растворяется в процессе воздушного борбатирования. По окончании растворения триполифосфата устье скважины герметически закрывается фланцем, после чего производится пульсирующее задавливание раствора за контур фильтра сжатым воздухом. Такие операции проводят последовательно несколько раз из расчета необходимого количества триполифосфата для растворения осадка в фильтре и прифильтровой зоне скважины.

Примеры обработки скважины триполифосфатом приведены в табл. 89.

Таблица 89

Данные об эффективности восстановления производительности скважин триполифосфатом

Местоположение, № скважины и тип фильтра	Дебит, л/с		Понижение уровня, м		Удельный дебит, л/с·м		Увеличение удельного дебита q_2/q_1	Показатель обобщенного сопротивления		Примечание
	до обработки Q_1	после обработки Q_2	до обработки S_1	после обработки S_2	до обработки q_1	после обработки q_2		до обработки	после обработки	
Вертикальный дренаж в Каменке, скв. 45, фильтр каркасный с обсыпкой	5,21	7,30	2,19	1,98	2,37	3,68	1,5	4,15	0,17	Задавливание реагента с помощью вибратора
Там же, скв. 17, фильтр каркасный с обсыпкой	1,22	1,60	0,64	0,48	1,19	2,33	1,75	—	—	Задавливание реагента сжатым воздухом
Вертикальный дренаж в Ульяновске, скв. 222А, фильтр каркасный с обсыпкой	1,56	4,62	14,70	9,87	0,1	0,47	4,7	159,2	30,0	То же
Водозабор «Балтэзерс», Рига, фильтры блочного типа, клеевые. Скв. 61	—	—	—	—	2,29	4,95	2,2	31,0	13,0	»
Скв. 64	—	—	—	—	1,49	2,50	1,7	96,0	53,4	»
Скв. 92	—	—	—	—	2,05	3,22	1,6	—	—	»

Примечание. Объем реагента, разведенного в воде, составлял от 600 до 1400 л.

Комбинированные способы

Как уже отмечалось, в процессе отложения осадков в прифильтровой зоне с течением времени наблюдается их уплотнение и изменение кристаллической структуры, что влияет на растворение осадков при воздействии на них кислот. В некоторых гидрохимических условиях наряду с гидроокисью железа и карбоната кальция выпадают соли кремнекислоты, которые могут создавать достаточно плотные конгломератообразные структуры, препятствующие воздействию кислоты на осадки.

В этих случаях для увеличения поверхности контакта кислоты с цементирующими осадками и обеспечения более глубокого проникновения кислоты за контур скважин целесообразно перед началом кислотных обработок разрушить структуру осадков. В настоящее время для разрыхления сцементированных пород в прифильтровых зонах можно применять шнуровые торпеды, пневматические снаряды, вибрационные, электрогидравлические и ультразвуковые установки.

В ВОДГЕО при проведении комбинированных способов регенерации скважин были исследованы способы, сочетающие применение химических реагентов с вибраторами, торпедами ТДШ и пневмовзрывом.

Теоретические исследования кинетики растворения кольматанта фильтров и прифильтровых зон скважин показывают, что интенсивность процесса существенно увеличивается с ростом скорости движения реагента в порах (отверстиях фильтра). При задавливании реагента в скважины сжатым воздухом возможность варьирования скоростью движения растворителя ограничена, поэтому интенсивность растворения полностью определяется скоростью диффузии. Процесс растворения может быть существенно ускорен созданием в скважине переменного по знаку гидродинамического давления, что в наилучшей степени обеспечивается использованием вибраторов.

В ряде случаев при глубоком залегании подземных вод и установке фильтров в верхней зоне водоносного пласта существенно ограничивается избыточное давление при задавливании реагента сжатым воздухом и, следовательно, степень воздействия реагента на фильтр и профильтровую зону. В рассматриваемых условиях вибрирование может использоваться в качестве возбудителя гидродинамических давлений, вызывающих задавливание реагента в профильтровую зону скважины.

Применение вибраторов. Для предварительной оценки эффективности этого метода восстановления производительности скважин были проведены полевые экспериментальные исследования в скважинах Каменского вертикального дренажа и водозабора в Черкассах. Для обработки использовался вибратор, описание которого дано в гл. V.

В скв. 45 в качестве реагента использовали триполифосфат натрия, а в скв. 1429 — соляную кислоту. В скв. 45 в два этапа было залито 600 л 10%-ного триполифосфата, а общая продолжительность работы вибратора составила 71 мин при амплитуде колебания дисков 11 мм и частоте 690 колебаний в 1 мин.

В скв. 1429 было залито 1000 кг соляной кислоты концентрацией 27,5%. Продолжительность обработки вибратором составляла 80 мин. Вибратор включался периодически с перерывами на 5—7 мин. В этом опыте амплитуда колебания дисков составляла 11 мм при частоте 815 колебаний в 1 мин.

Эффективность обработки оценивалась сравнением удельных дебитов, величины обобщенного сопротивления скважин до и после обработки, а также методом расходометрии. Данные об эффективности виброреагентной обработки приведены в табл. 90.

Таблица 90

Удельные дебиты и сопротивление фильтров до и после виброреагентной обработки

№ скважины	Дебит скважины, м³/ч		Понижение уровня, м		Удельный дебит скважины, м³/ч·м		Показатель сопротивления фильтра и прифильтровой зоны	
	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
45	18,8	26,3	2,19	1,98	8,62	13,2	4,15	0,17
1429	3,6	17,1	6,00	5,94	0,66	2,9	6,5	1,28

Таким образом, исследования показали перспективность применения вибрационных колебаний в качестве возбудителя пульсации гидродинамического давления, существенно интенсифицирующих процесс растворения кольматанта. Однако конструкция рабочего органа для вибрационной обработки скважин должна быть модифицирована — уменьшена его масса без снижения интенсивности давления, создаваемого рабочим органом в зоне фильтра.

Применение шнуровых торпед. Для восстановления производительности скважин, снизившейся в процессе эксплуатации, институтом ВНИИГеофизика длительное время рекомендовался метод взрыва торпед ТДШ [97]. Сущность его кратко изложена в гл. VI. По сообщению Н. К. Кузьминой, эффективность этого метода весьма высока (табл. 91).

Аналогичные работы по методике ВНИИГеофизики проводились ВОДГЕО на водозаборах Дзержинска, Ульяновска, Каменки-Днепровской. Действительно, подтвердилась высокая эффективность метода на начальном этапе эксплуатации скважин.

Таблица 91

Увеличение дебита скважин после очистки фильтров взрывом ТДШ

№ скважины	Месторасположение скважины	Дебит скважины, м³/ч	
		до взрыва	после взрыва
1	Горьковская область, пос. Решетиха	15	30
7		18	45
18		2	20
6		2	20
10		12	78
206	Ульяновск, глубокий дренаж	0,9	16,3
205		3,2	18
4	Тамбовская область, Кирсанов	3,6	7,2
6		0	12
1		0	0
9	Московская область, Краснозаводск	50	100
12		50	150
1	Оренбургская область, Курайли	3	18
2		2	18

Кроме того, по скважинам Ульяновска было отмечено, что применение только одной нитки взрывчатого вещества в торпеде ТДШ способно разрушить гравийные обсыпки при полной целостности фильтровых каркасов. Толщина обсыпки в этих фильтрах колебалась от 50 до 90 мм. Особенно часто разрушались фильтры с двойным контуром гравийной обсыпки, где ее толщина варьировала от 35 до 50 мм.

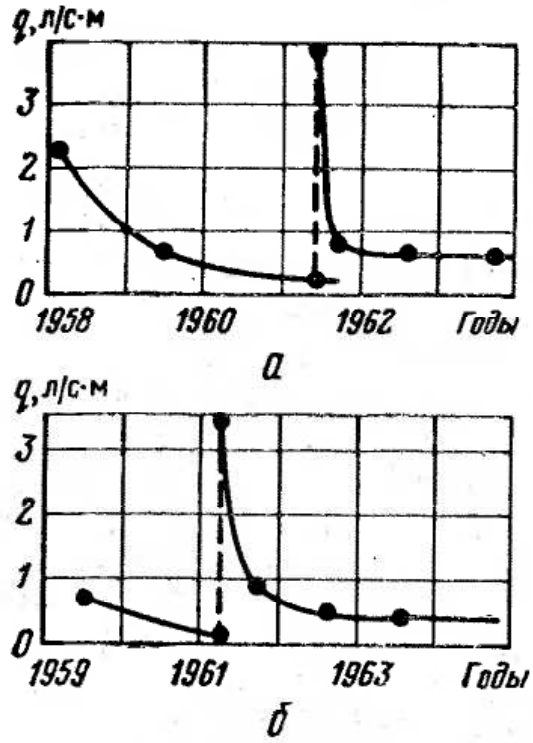


Рис. 160. Графики изменения удельных дебитов скважины после взрыва:
а — скв. 205; *б* — скв. 206

Последующие наблюдения за эксплуатацией скважин выявили малую устойчивость дебита скважин после взрыва во времени. На рис. 160 приведены графики изменения удельных дебитов скважин, из которых следует, что дебит скважин снизился в течение нескольких месяцев.

Приведенные данные позволяют сделать некоторые выводы и объяснить причины быстрого снижения дебита восстановленных скважин. При выпадении из воды солей окружающие фильтр породы превращаются в своеобразный конгломерат, в котором частицы связываются в водонепроницаемые структуры. После взрыва торпеды ударная волна, проникая за стенку скважины,

вызывает рыхление пород, образуя огромное количество трещин, которые обеспечивают большой приток воды к скважине. Поскольку в этом процессе не происходит растворение солей, они по-прежнему остаются в поровом пространстве и являются катализаторами для последующего отложения осадков во вновь образованных трещинах. Судя по скорости снижения дебита в скважинах после взрыва ТДШ, есть все основания предположить, что в результате взрыва возникают трещины небольших размеров (микротрещины), которые зарастают при отборе воды в течение короткого времени.

С нашей точки зрения, применение ТДШ будет более эффективным в комбинации с кислотной обработкой, при которой солевые отложения в порах растворяются и удаляются из пород прифильтровой зоны.

В ВОДГЕО проводились исследования по разработке комбинированных методов восстановления производительности скважин, сочетающих взрыв ТДШ с последующей реагентной обработкой. Такие методы применялись на дренажных скважинах в Ульяновске. Результаты обработки приведены в табл. 92.

Таблица 92

Восстановление производительности скважин комбинированными методами

№ скважины	Дебит, л/с		Понижение уровня, м		Удельный дебит, л/с·м		Показатель обобщенного сопротивления		Увеличение удельного дебита
	до обработки Q_1	после обработки Q_2	до обработки S_1	после обработки S_2	до обработки q_1	после обработки q_2	до обработки ζ_1	после обработки ζ_2	
Взрыв ТДШ									
200	5,0	7,6	8,34	3,86	0,59	1,92	53,2	10,72	3,3
210	5,26	8,8	8,76	3,95	0,60	2,2	43,3	6,46	3,7
230	3,7	7,2	12,5	5,10	0,30	1,4	64,5	7,30	4,7
124А	2,31	6,6	11,1	4,06	0,2	1,64	109	6,95	8,2
1102А	2,12	6,25	11,3	3,94	0,18	1,56	123,2	7,59	8,3
Обработка соляной кислотой после взрыва									
200	7,6	9,61	3,86	3,08	1,92	3,12	10,72	3,85	1,6
210	8,8	9,4	3,95	2,51	2,2	3,74	6,46	0,65	1,7
230	7,2	7,8	5,1	3,1	1,4	1,95	7,30	0,63	1,4
124А	6,6	7,5	4,06	3,0	1,64	2,51	6,95	1,81	1,5
1102А	6,25	6,6	3,94	3,2	1,56	2,08	7,59	3,91	1,3

Примечания: 1. При обработке скважин применялась соляная кислота 20%-ной концентрации в объеме от 540 до 1200 л с добавкой 0,8—1% триполифосфата натрия.

2. Торпеда использовалась с одним шнуром длиной от 5 до 10 м.

Из данных таблицы следует, что при взрыве первоначальный удельный дебит скважин возрастает в 3,3—8,3 раза, тогда как последующая обработка скважины соляной кислотой увеличивает его в среднем в 1,5 раза. Это объясняется следующим. При взрыве ТДШ в зоне кольматажа образуется большое количество микротрещин, что резко увеличивает приток воды в фильтр. Однако эти трещины, по-видимому, невелики по размерам. При дополнительном воздействии кислотой по этим трещинам происходит большой контакт кислоты с поверхностью отложившихся осадков, что в результате растворения приводит к большему раскрытию пор. С увеличением размера пор в прифильтровой зоне дополнительно возрастает дебит и увеличивается продолжительность эксплуатации скважин после обработки.

Наряду с положительными результатами применения комбинированных методов были случаи пескования скважин после проведения таких обработок. Объясняется это сооружением некачественных обсыпок малой толщины (от 30 до 50 мм) и тем, что величина взрыва ТДШ, при котором образуется взрывная волна с давлением в 500—1000 кгс/см^2, может быть излишней. По этим причинам в 1975 г. были проведены комбинированные обработки с применением установки пневмовзрыва, позволяющей регулировать силу взрыва в пределах 25—120 кгс/см^2.

Сравнивая первоначальные удельные дебиты с дебитами, полученными после взрывных и реагентных обработок, нетрудно убедиться в том, что комбинированные способы увеличивают производительность скважин в 6—12 раз, а показатель обобщенного сопротивления снижается в несколько десятков раз.

Поскольку комбинированные обработки начаты недавно, еще нельзя окончательно судить об их эффективности. Для этого, очевидно, потребуются длительные наблюдения.

Применение ВПВ. Воздействие пневмовзрывом на прифильтровую зону скважин при помощи установки, снабженной специальным снарядом, было предложено Азгеологоуправлением в 1964 г. и впервые опробовано в Азербайджане (автор В. Г. Склянский).

Этот способ, как и ТДШ, относится к гидромеханическим с той лишь разницей, что он позволяет регулировать силу взрывной волны в пределах от 25 до 100—120 кгс/см^2, а также регулировать прострел фильтра по длине путем одиночных или залповых взрывов. Схема установки приведена на рис. 161.

Установка комплектуется из стандартных элементов за исключением пневмоснаряда и лебедки. Основным элементом ее является трехступенчатый компрессорный агрегат АК2-150, который выпускается Мелитопольским компрессорным заводом. Производительность компрессора 2 м^3/мин при давлении 150 кгс/см^2.

Не останавливаясь детально на технической характеристике установки и отдельных ее узлах, которые подробно изложены во временной инструкции, опубликованной АзНИИ водных

проблем в 1975 г., рассмотрим пневмоснаряд, при помощи которого в скважине создаются импульсные давления, используемые для очистки фильтров.

Схема пневмоснаряда представлена на рис. 162. Он состоит из двух основных частей — рабочей камеры и разряжающего устройства, содержащего золотник с возвратной пружиной и дифференциальный клапан. Последний при помощи пружины регулируется на заданное давление, по достижении которого сбрасывается сжатый воздух под золотником в скважину. Под давлением сжатого воздуха в рабочей камере золотник опускается и открывает окна, через которые происходит выхлоп сжатого воздуха

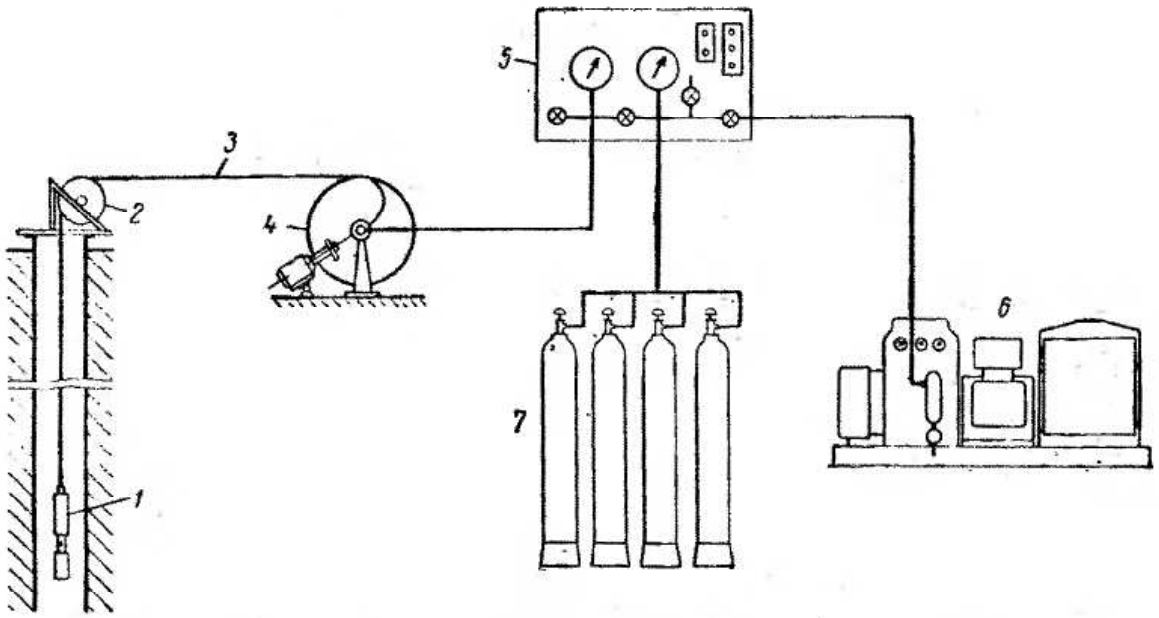


Рис. 161. Схема установок АВПВ-150/50 и АВПВ-150/150:
1 — пневмоснаряд; *2* — направляющий блок; *3* — рукав РВД; *4* — лебедка; *5* — щит управления; *6* — компрессор АК2-150; *7* — воздухосборник

в скважину. В результате этого в жидкости распространяется волна давления, разрушающая и диспергирующая кольматирующие соединения на стенках фильтра, в его проходных отверстиях и в пространстве за фильтром.

Дальнейшее расширение пузыря газа вызывает радиально расходящееся движение жидкости, форма которой за фильтром определяется формой проходных отверстий фильтра (щель, круглые отверстия). В результате динамического воздействия струи происходит дальнейшее разрушение и размыв кольматирующих соединений.

При пульсации воздушного пузыря наблюдается знакопеременное изменение давления жидкости. Сравнивая способ восстановления производительности скважин при помощи ТДШ со способом ВПВ, следует отметить большую безопасность, регулируемое управление взрывом как по силе, так и по глубине скважины.

Согласно рекомендациям, установка ВПВ с компрессором АК2-150 может применяться в скважинах глубиной до 150 м

в фильтрах диаметром от 100 до 400 мм. Фильтр обрабатывают в течение двух — трех рейсов пневмоснаряда снизу вверх и обратно с подачей воздушного импульса при спуске снаряда через 250—300 мм. В проводимых нами работах при длине фильтров 10 м за один рейс производилось 25—30 взрывных импульсов.

Описанная установка применялась для восстановления дебита скважин, эксплуатирующих воды меловых отложений долины р. Северский Донец (40 скважин), где средний коэффициент эффективности $k_{эф} = 1{,}54$.

При восстановлении водозаборных скважин в аллювиальных отложениях р. Днепра при глубине их 30 м, оборудованных каркасными фильтрами без гравийной обсыпки $k_{эф} = 2{,}1$ (по 11 скважинам). В 60 скважинах дренажа, забирающих воду из аллювиальных отложений долины р. Волги в районе Ульяновска, в сложных гидрохимических условиях средний коэффициент эффективности $k_{эф} = 2{,}2$.

Восстановление дебита дренажных скважин в Ульяновске с помощью пневмовзрыва в комбинации с реагентными обработками соляной кислотой, которая задавливалась за контур фильтра сжатым воздухом, подтвердило наши предположения по значительному увеличению удельных дебитов. После пневмовзрыва в двух скважинах удельный дебит по сравнению с первоначальным увеличился в 1,8—2 раза,

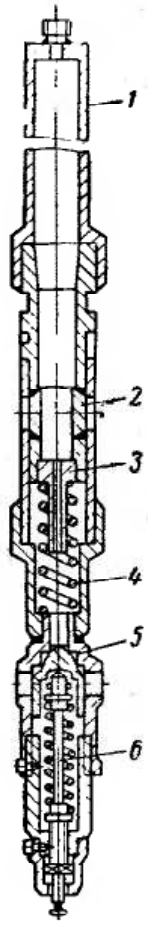


Рис. 162. Схема пневмоснаряда для обработки фильтров сжатым воздухом:

1 — рабочая камера; *2* — выхлопные окна; *3* — золотник; *4* — возвратная пружина; *5* — дифференциальный клапан; *6* — пружина клапана для регулирования давления

а после кислотной обработки их с использованием 200 и 400 л HCl — в 4,—7,1 раза. Работы по этому перспективному методу комбинированных обработок продолжаются.

В заключение остановимся кратко на анализе гидромеханических способов воздействия на фильтры и прифильтровые зоны для восстановления производительности скважин. Из известных способов в настоящее время предлагаются: шнуровые торпеды, гидравлические, ультразвуковые, пневмовзрывные и вибрационные установки.

На первом этапе эти способы предлагались как самостоятельные, позволяющие резко повышать производительность скважин, однако их эффективность оказалась малопродолжительной. Опыты и наблюдения, проведенные автором на различных водозаборных и дренажных сооружениях в течение последних лет, позволили заключить, что ни один из способов восстановления производительности (химической, гидромеханической или комбинированный)

не возвращает скважинам их первоначальных дебитов в процессе эксплуатации. Так, дебиты скважин после взрыва в них шнуровых торпед (водозаборы Дзержинска и Ульяновска) увеличивались, а спустя 4—5 мес снижались до первоначальных. Удельный дебит дренажных скважин в Ульяновске после пневмовзрывной обработки также снижался со средней скоростью 0,8—1,0 л/с в месяц.

По данным ВИОГЕМ, дебит скважин Лебединского карьера, обработанных электрогидравлическими установками, также интенсивно снижался в процессе эксплуатации.

В процессе фильтрации вследствие отложения солей происходит обрастание зерен породы, увеличивается их поверхность, сокращается пористость и нередко соли полностью закрывают поры пород и обсыпок. В этих условиях прилежащие к фильтру породы образуют конгломератообразные структуры различной степени прочности и крепости.

При воздействии гидромеханических способов эти агрегатные структуры разрушаются, создается большое количество трещин, в результате чего производительность скважин увеличивается в несколько раз по сравнению с дебитом, полученным перед обработками. Однако не происходит очищения зерен от гидроокисных и карбонатных пленок. При возобновлении эксплуатации скважин воды, содержащие растворенные соли, протекают по трещинам и зернам, которые обладают каталитическими свойствами, в результате чего происходит повторное снижение проницаемости пород в прифильтровой зоне.

Как подтверждают наблюдения, темп снижения дебита новых скважин в несколько раз меньше, чем старых, подвергавшихся различным способам восстановления.

Такое рассуждение, подкрепленное данными натурных наблюдений, позволяет прийти к выводу о необходимости комбинированных методов обработок скважин, при которых гидромеханические способы будут разрушать структуру, а химические обработки растворять солевые отложения и тем самым восстанавливать структуру и размер пор горных пород. Следовательно, после комбинированных обработок будет восстанавливаться проницаемость и в большей степени увеличиваться срок эксплуатации скважин.

§ 42. СМЕНА ФИЛЬТРОВ

Восстановление дебита скважин, оборудованных фильтрами, путем механической и химической очисток не может производиться бесконечно. Повторные кислотные обработки, как правило, не восстанавливают первоначального дебита скважин, поэтому замена фильтров, а в последующем перебуривание скважин — неизбежные процессы.

Вопрос о том, как влияет замена фильтров на дебит скважины и сколько раз его менять в одной и той же скважине, предста-

вляет большой практический интерес. Известно, что длина фильтров по отношению к общей глубине скважины, как правило, незначительна, поэтому использование старых стволов скважин с установкой в них новых фильтров, способных обеспечить подачу воды, позволяет экономить большие материальные и денежные средства.

Замена фильтра — трудоемкая работа. Подъем фильтров производят так же, как и бурение новых скважин, но при этом необходимы мощные механизмы (гидравлические домкраты, полиспасты и вибраторы). При высокой агрессивности подземных вод, при которой фильтры подвергаются разрушению, в процессе их подъема возможны обрывы и значительные осложнения: занос фильтра породой, поступление песчаной пробки в обсадные трубы и др. Во избежание этого устройства для подъема целесообразно закреплять в нижней части фильтра.

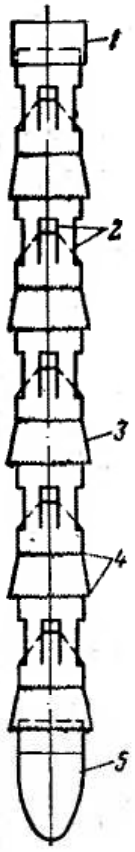


Рис. 163. Снаряд для извлечения фильтров:
1 — муфта; *2* — окна с отогнутыми пластинами; *3* — конусный пояс; *4* — линия сварки; *5* — направляющий наконечник

Обычно фильтры поднимают с помощью приспособления, именуемого «грушей». Это устройство представляет собой конусную деревянную пробку, насаженную на штанги и укрепленную в нижней части фланцем. Приспособление опускают в фильтр на соответствующую глубину, после чего обсыпают его сверху гравием. При натяжении штанг гравий расклинивает «грушу» между стенками фильтра, и тогда его можно извлечь на поверхность. Как показала практика, очень часто при использовании такого приспособления происходит обрыв фильтров по линии заклинивания «груши» с фильтром. Во избежание этого в буровой конторе в Литве было предложено и успешно использовано приспособление, позволяющее распределить усилие, создаваемое «грушей», на ряд поясов.

Приспособление (рис. 163) изготовляют из отрезка трубы, в которой на разной высоте прорезаны окна. Газоаппаратом прорезают трубу в трех местах, а концы отгибают в виде козырьков. На внешней поверхности трубы ниже каждого ряда окон наваривают пояса из полосовой стали с последующей проточкой фаски на конус. При наличии козырьков гравий, засыпаемый во внутреннюю часть трубы, будет ударяться об их поверхность, проникать в межтрубное пространство и образовывать несколько гравийных поясов. При натяжении приспособления усилия будут распределяться на все принятые пояса, благодаря чему обеспечивается гарантия подъема фильтров без разрыва.

Это приспособление может быть рекомендовано для широкого внедрения. Его опускают в фильтр на трубах диаметром 100—

150 мм, оно позволяет создавать большие усилия при подъеме. После извлечения фильтра скважину углубляют до первоначальных отметок с помощью существующей или вспомогательной обсадной колонны.

При подработке забоя для повторного спуска фильтра следует учитывать литологические особенности строения водоносного горизонта, а также характер возможной цементации пород в прифильтровой зоне. Как известно, пространство, которое образуется при подъеме фильтра, заполняется прилегающей к фильтру породой. В процессе эксплуатации эта порода может изменять свою структуру под влиянием суффозионных процессов, а также обога-

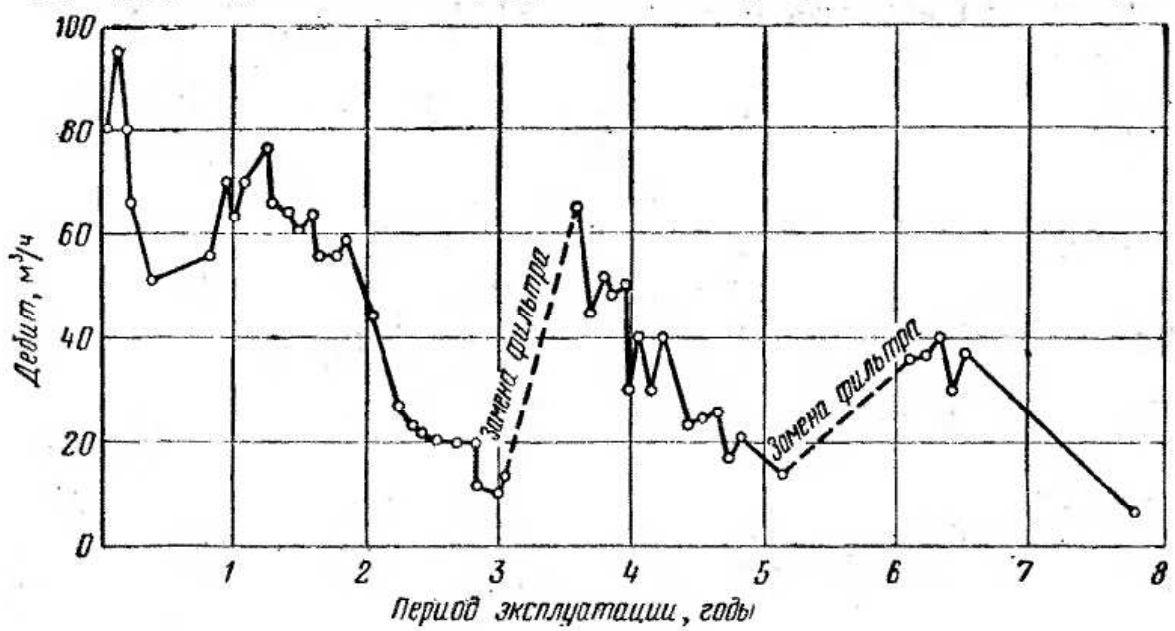


Рис. 164. График влияния смены фильтра на дебит скв. 17

щаться солями различного химического состава, образуя вокруг фильтра зацементированную зону.

Для разрушения ее на участке установки фильтра необходимо при подработке забоя производить рыхление и обрушение. Объем извлеченной с забоя породы должен в несколько раз (3—5) превосходить объем выбуренного пространства. Однако это обязательное требование может находиться в противоречии с литологическими особенностями строения водоносного горизонта. Исследованиями установлено, что при чрезмерной подработке забоя происходит вертикальное перемещение пород вдоль оси скважин, что может обогащать участок установки фильтра породами с меньшей водопроницаемостью.

Если подработка забоя ведется с расчетом на обрушение пород, то в ряде случаев замена фильтров будет безрезультатной (этот вопрос подробно рассмотрен в разделе о влиянии подработки забоя на установку конструкций фильтров).

Для примера приведем данные фактических наблюдений по скв. 17, пробуренной на водозаборе Вильнюса, отражающие влияние замены фильтра на дебит (рис. 164). За 7 лет в скважине

3 раза заменяли фильтр. В период первоначальной установки фильтра дебит скважины составлял 95 м³/ч, и она работала около 3 лет; при повторной замене фильтра дебит скважины составлял 76 м³/ч, а продолжительность работы — около полутора лет; в результате смены фильтра в третий раз дебит увеличился до 40 м³/ч, а период ее работы также не превышал полутора лет.

Необходимо отметить, что все 3 раза в скважине были установлены сетчатые фильтры, одинаковые по диаметру и длине.

Снижение дебита скв. 17 есть результат ухудшения водопроводимости пород под влиянием обрушения и смещения слоев водоносного горизонта.

Сопоставление геологических разрезов скважин по данным первичной и повторной проходки показывает обычно смещение границ слоев, слагающих водоносный горизонт, поэтому конструкцию фильтра необходимо изменять применительно к новым условиям, образовавшимся в результате перемещения пород под влиянием повторной проходки скважины.

В настоящее время для подъема труб и извлечения фильтров применяются домкраты различной грузоподъемности: 100, 200 и 300 т. Для иллюстрации приведем техническую характеристику гидравлического домкрата ГДУТ-300, выпускаемого Тульской ремонтно-механической базой треста Союзшахтоосушение:

Грузоподъемность, т	300
Число цилиндров	2
Диаметр цилиндров, мм	325/273
Рабочий ход штока, мм	550
Высота домкрата в нерабочем состоянии, мм	1050
Подача насоса, л/мин	15
Мощность двигателя насоса, кВт	11,5
Скорость вращения двигателя, об/мин	1470
Масса агрегата, т	1,5

Однако, как подтверждает опыт буровых организаций, подъем труб домкратами представляет собой сложную операцию, при которой трубы часто обрываются.

Из-за сложности и трудоемкости работ по извлечению труб и фильтров из скважин возникла необходимость в применении вибротехнических средств, разработка которых успешно проводилась в Гидропроекте, ВНИИстройдормаше, ВНИИГСе и других организациях.

Вибратор ВО-10, разработанный Гидропроектом, предназначается для извлечения и погружения обсадных труб диаметрами 168, 219 и 273 мм и длиной соответственно 50, 40 и 30 м.

Вибромолот С-835, спроектированный ВНИИстройдормашем, используется для погружения и извлечения колонн труб диаметрами 168, 219, 273 мм и длиной до 50 м (рис. 165).

Вибромолот ВБС-1, разработанный ВНИИГСом, применяется для погружения и извлечения труб диаметрами 219, 273, 325, 351 и 426 мм.

Таблица 93

Характеристика вибрационных машин для извлечения труб и фильтров

Параметры	Вибратор ВО-10	Вибромолот С-835	Вибромолот ВВС-1
Число двигателей	2	2	1
Мощность двигателя	10	7,5	22
Момент эксцентриков, кгс·см	570	420	3000
Скорость вращения дебалансов, об/мин	1200	1450	
Максимальное возмущающее усилие, кгс	9200	10 000	27 000
Частота ударов молота в 1 мин	—	480	400—900
Масса ударной части, кг	—	670	2400
Габаритные размеры, мм:			
длина	1710	960	1700
ширина	1098	720	960
высота	1940	1180	860
Масса вибратора, кг	1670	1130	2400
Мощность электростанции, необходимая для запуска вибратора, кВт	50	30	50
Допускаемое тяговое усилие при извлечении, тс	10	15	Лебедки станков УКС-20, УКС-30

Примечание. Вибратор ВО-10 и вибромолот С-835 имеют проходные отверстия, позволяющие контролировать состояние забоя скважины.

Таблица 94

Скорость подъема труб с помощью вибраторов и домкратов

Диаметр труб, мм	Техническая скорость извлечения труб, м/смена	
	гидравлическими домкратами ГД 100/500 и ГД1-300	вибраторами ВО-10
254	4,3	8,4
305	3,8	9,5
406	3,4	6,9

Основные сведения по этим машинам приведены в табл. 93, а более подробное описание — в [44]. Согласно сообщениям Казахского гидрогеологического треста, в практике работ по бурению гидрогеологических скважин ударным способом для извле-

чения труб применялись вибраторы ВО-10 и вибромолоты С-835 наряду с гидравлическими домкратами.

Для того, чтобы проиллюстрировать эффективность применения вибротехники, достаточно сослаться на опыт извлечения труб диаметром 254 мм при глубине скважины 150 м. Указанные трубы безуспешно поднимали с помощью гидравлических домкратов ГД1-300 в течение 30 смен, а с помощью вибратора ВО-10 колонна была поднята на 3 м за 5 ч, после чего извлечена с применением лебедки станка УКС-30.

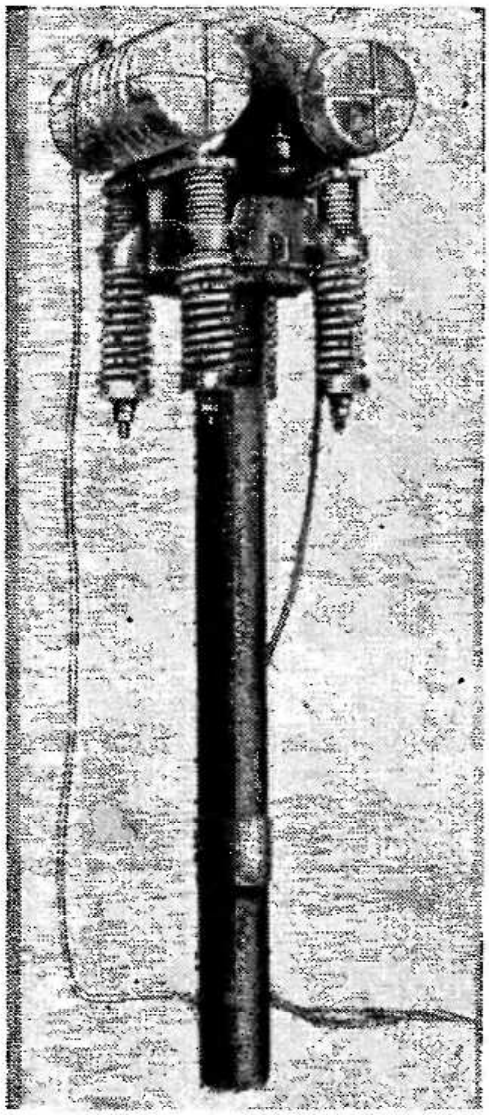


Рис. 165. Вибромолот С-835

Сравнение скоростей подъема труб с помощью вибраторов и домкратов приведено в табл. 94.

Применение вибраторов позволило снизить затраты на извлечение труб в 2 раза.

В тех скважинах, где мощность ВО-10 оказывалась недостаточной для извлечения труб, применяли вибромолот С-835. Таким способом были извлечены трубы из четырех скважин диаметром от 225 до 526 мм общей длиной более 500 м.

В ряде случаев, когда с помощью домкратов и вибраторов не удавалось стронуть трубы с забоя, использовали комбинацию вибраторов с взрывом торпед ТДШ. Это обеспечивало подъем труб из старых скважин, простоявших в породах в течение 2—4 лет, со средней скоростью 6—7,3 м/смену.

Опыт применения вибраторов в трестах Промбурвод, Союзшахтоосушение, Гидроспецстрое подтверждает большие преимущества вибрационных механизмов перед гидравлическими домкратами и исключает необходимость извлечения труб и фильтров при помощи буровых станков за счет увеличения грузоподъемности мачт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. С. Об особенностях подземных вод, склонных к осадкообразованию в прифильтровых зонах скважин — «Труды ВНИИ ВОДГЕО», 1966, вып. 13, с. 133—143.

2. Алексеев В. С. Методика прогноза химического кольматажа фильтров водозаборных скважин. — «Водоснабжение и санитарная техника». 1968, № 10, с. 28—31.

3. Алексеев В. С., Бессонов Н. Д., Гребенников В. Т. Применение полифосфатов для восстановления дебита скважин. — «Гидротехника и мелиорация», 1974, № 6, с. 90—97.

4. Алексеев В. С., Гаврилко В. М., Гребенников В. Т. Рекомендации по восстановлению производительности скважин реагентными методами. М., Изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1975. 96 с.

5. Алексеев В. С., Гуринович А. Д. Пусковые режимы работы водозаборных скважин с погружными насосами. — «Гидротехника и мелиорация», 1973, № 9, с. 90—94.

6. Алексеев В. С., Коммунар Г. М. Кольматаж фильтров и прифильтровых зон водозаборных скважин. — «Водные ресурсы», 1974, № 5, с. 170—177.

7. Алексеев В. С., Круглова Н. Д. Оценка сопротивлений дренажных скважин по данным режимных наблюдений. — «Гидротехническое строительство», 1972, № 2, с. 17—18.

8. Алексеев В. С., Курманенко А. Д. Опыт определения коэффициента водопроводимости пластов по данным экспресс-налива в скважины. — «Экспресс-информация ОНТИ ВИЭМС. Сер. гидрогеология и инженерная геология», 1973, № 9, с. 1—11.

9. Алексеев В. С., Курманенко А. Д., Суханов В. Ф. О методике оценки зональной проницаемости водоносных пластов по данным расходометрии. — «Разведка и охрана недр», 1970, № 5, с. 46—59.

10. Алексеев В. С., Никольская Е. А. Зарубежный опыт конструирования и расчета фильтров скважин на воду. — «Итоги науки и техники. Сер. гидрогеология и инженерная геология». М., ВИНИТИ, 1972, том. 2, с. 6—68.

11. Алексеев В. С., Рохлин Л. А., Тесля А. Г. Экспресс-опробование гидрогеологических скважин. — «Сер. гидрогеология и инженерная геология». ОНТИ ВИЭМС, 1972. 50 с.

12. Апельцин И. Э., Золотова Е. Ф. Применение гексаметафосфата натрия для борьбы с загрязнением нагнетаемой в нефтяные пласты воды продуктами коррозии водоводов. М., Гостоптехиздат, 1954. 48 с.

13. Апельцин И. Э. Подготовка воды для заводнения нефтяных пластов. Гостоптехиздат, 298 с.

14. Бабушкин В. Д. Зависимость дебита скважины от длины и расположения фильтра в пласте. — В кн.: Фильтры водозаборных скважин. М., Госстройиздат, 1952, с. 48—60.

15. Баренблатт Г. И., Максимов В. А. О влиянии неоднородности на определение параметров нефтеводоносного пласта по данным нестационарного притока жидкости к скважинам. Изв. АН СССР, ОТН, 1958, № 7, с. 13—21.

16. Башкатов Д. Н., Дрягалин Е. Н. Временные методические указания по разглинизации гидрогеологических скважин комбинированным способом. М., изд. ВСЕГИНГЕО, 1971. 40 с.

17. Бессонов Н. Д. Расчет притока воды к скважине, оборудованной фильтром блочного типа. — «Разведка и охрана недр», 1961, № 10, с. 54—58.

18. Бессонов Н. Д. К вопросу о теоретическом определении параметра «в» в формуле Прони применительно к задачам фильтрации жидкости в крупнозернистых породах. — «Труды ВНИИ ВОДГЕО», 1964, вып. 6, с. 21—26.

19. Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961. 198 с.

20. Бочевер Ф. М., Алексеев В. С. Оценка сопротивления водозаборных скважин по опытным и эксплуатационным откачкам. — «Разведка и охрана недр», 1965, № 3, с. 39—45.

21. Васильев В. А., Шульгин Д. Ф. О работе фильтра буровой скважины. Изв. АН СССР, ОТН, 1961, № 1, с. 135—139.

22. Веригин Н. Н., Родзиллер И. Д. Очистка нефтяных вод методом фильтрации. — «Нефтяное хозяйство», 1956, № 10, с. 52—56.

23. Веригин Н. Н. Кольматаж призабойной зоны скважин. — ПМТФ, 1964, № 2.

24. Верстов В. В., Цейтлин М. Г., Либин Л. Л. Разглинизация скважин на воду вибрированием. — «Гидротехника и мелиорация», 1974, № 10, с. 92—96.

25. Гаврилко В. М., Бессонов Н. Д. Защита фильтров водозаборных скважин от коррозии. — «Гидротехника и мелиорация», 1969, № 12, с. 61—67.

26. Гаврилко В. М., Кесельман Я. Э. Рекомендации по промышленному производству фильтров для буровых скважин на воду. М., Изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1974, 91 с.

27. Гаврилко В. М. Указания по изготовлению и внедрению каркасно-стержневых фильтров для водозаборных скважин. Изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1951, 72 с.

28. Гаврилко В. М. Пластические массы как основа для разработки новых антикоррозийных конструкций фильтров. — «Разведка недр», № 3, 1950, с. 34—39.

29. Гаврилко В. М. Фильтры с водоприемной поверхностью из сеток и тканей. М., Госгеолиздат, 1952, 22 с.

30. Гаврилко В. М., Абрамов С. К. Фильтры буровых скважин. М., Госстройиздат, 1954, 260 с.

31. Гаврилко В. М., Абрамов С. К. Подбор и расчет фильтров водозаборных скважин. М., изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1956, 47 с.

32. Гаврилко В. М. О водоприемной способности фильтров и методах ее восстановления. — «Разведка и охрана недр», 1959, № 7, с. 90—95.

33. Гаврилко В. М., Бессонов Н. Д. Фильтры блочного типа из пористой керамики для водозаборных и водопонизительных скважин. М., изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1960. 44 с.

34. Гаврилко В. М. Фильтры водозаборных, водопонизительных и гидрогеологических скважин. М., Госстройиздат, третье издание, 1968. 397 с.

35. Гаврилко В. М. Влияние опорных каркасов на конструкции фильтров блочного типа. — «Труды ВНИИ ВОДГЕО», 1964, вып. 6, с. 20—21.

36. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. О некоторых результатах вскрытия фильтров скважин горными выработками. — «Разведка и охрана недр», 1965, № 6, с. 55—59.

37. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры из стеклопластиковых труб. — «Водоснабжение и санитарная техника», 1966, № 11, с. 16—18.

38. Гаврилко В. М., Сафонов В. В., Аннилов В. Е. Новые данные по строению прифильтровых зон водопонижающих скважин и сквозных фильтров. — «Шахтное строительство», 1966, № 12, с. 7—11.

39. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры из пористой керамики в водозаборных скважинах. — «Гидротехника и мелиорация», 1968, № 10, с. 60—67.
40. Гаврилко В. М., Коцуван И., Уршич И. Опыт строительства и эксплуатации скважин, оборудованных фильтрами «Бистрал» в Югославии. — «Труды лаборатории инженерной гидрогеологии» № 6, М., Госстройиздат, 1972, с. 48—59.
41. Гаврилко В. М., Алексеев В. С., Коммунар Г. М. Метод определения количества реагента при восстановлении производительности скважин. — «Водоснабжение и санитарная техника», 1973, № 9, с. 24—26.
42. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Восстановление дебита водозаборных скважин методом химической обработки. «Экспресс-информация». ЦБНТИ Минводхоза СССР, Сер. 3, 1974, вып. 8, с. 1—12.
43. Грикевич Э. А. Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. Рига, «Зинатне», 1969. 245 с.
44. Демидов А. М., Климентов М. Н. Опыт применения вибротехнических средств при ударно-канатном бурении гидрогеологических скважин. — «Разведка и охрана недр», 1965, № 5, с. 26—30.
45. Евсеев Н. Ф. Строительство водозаборных скважин в ЧССР. — «Гидротехника и мелиорация», 1975, № 6, с. 114—118.
46. Квашнин Г. П. Устройство фильтров с гравийной обсыпкой при вращательном бурении скважин на воду. Реферативная информация о передовом опыте. Серия V. Специальные работы в промышленном строительстве. Вып. 2 (32), ЦБНТИ, Минмонтажспецстрой, 1967, стр. 28—33.
47. Киселев О. К., Устинов В. А., Мирошниченко А. Геофизическая диагностика и экспресс-ремонт скважин на воду. — «Гидротехника и мелиорация», 1969, № 4, с. 90—95.
48. Киселев О. К. Повышение эффективности ремонта скважин на воду. — В кн.: Организация и технология бурения гидрогеологических скважин. М., изд. Мингеологии СССР, 1972, с. 64—68.
49. Клячко В. А., Апельцин И. Э. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения. М., Госстройиздат, 1962, 818 с.
50. Коммунар Г. М., Алексеев В. С. Исследование кинетики фильтрации малоконцентрированных суспензий. — В кн.: Межотраслевые вопросы строительства, 1972, вып. 6, с. 71—75.
51. Коммунар Г. М. Кольматаж скважин при линейной зависимости коэффициента кольматации от скорости фильтрации. — «Труды ВНИИ ВОДГЕО», 1972, вып. 38, с. 118—122.
52. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., «Наука», 1970, 440 с.
53. Кузьмичев Д. Н., Тосунов Е. М. Изменения проницаемости прифильтровой зоны пласта в процессе эксплуатации скважин. — «Нефтяное хозяйство», 1961, № 4, с. 38—41.
54. Кузьмичев Д. Н. Формула для подсчета величины показателя скин-эффекта в скважинах. — «Труды ГрозНИИ», 1961, вып. 10, 1961, с. 18—24.
55. Кучеренко Д. И., Шкурченко-Величко А. И. Влияние железобактерий на работу систем водоснабжения, использующих подземные воды. — «Экспресс-информация Минводхоза СССР. Сер. Обводнение и сельскохозяйственное водоснабжение». 1972, вып. 5, с. 7—11.
56. Лейбензон Л. С. Сборник трудов. Подземная гидрогазодинамика. М., Изд. АН СССР, 1953, т. 2, 544 с.
57. Лерман С. Н., Володько И. Ф. Крепление артезианских скважин неметаллическими трубами. М., «Недра», 1968. 184 с.
58. Лилеев А. Ф., Миллер В. Я. Расчет прочности каркасно-стержневых фильтров. — В кн.: Каркасно-стержневые фильтры для водозаборных и водопонизительных скважин. М., Изд. ВОДГЕО, 1953, с. 60—82.
59. Ловля С. А. Взрывные работы на водозаборных скважинах. М., «Недра», 1970. 120 с.

60. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М., Гостоптехиздат, 1949. 628 с.

61. Минц Д. М. Фильтрация малоконцентрированных водных суспензий через зернистые среды. — «Научные труды АКС», 1951, вып. 2—3.

62. Минц Д. М., Мельцер В. Э. Гидравлическое сопротивление зернистой пористой среды в процессе кольматации. Докл. АН СССР, 1970, т. 192, № 2, с. 304—306.

63. Морозов Э. А. Ремонт скважин, оборудованных фильтрами. — «Экспресс-информация». ЦБНТИ Минводхоза СССР. Сер. 3, 1975, с. 27—31.

64. Огильви Н. А., Федорович Д. И. Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости. М., Изд. ВСЕГИНГЕО, 1963, вып. 14, 43 с.

65. Огильви Н. А. Искажение кривых пьезометрического напора подземных вод при замерах уровня воды в буровых скважинах и колодцах. — В кн.: Изучение и картирование ресурсов подземных вод. М., «Наука», 1974, с. 126—134.

66. Оноприенко М. Г. Опыт оборудования гравийными фильтрами скважин на водоносные горизонты, сложенные мелкозернистыми песками. «Экспресс-информация». ЦБНТИ, Минводхоз СССР, Сер. 5, 1969, с. 29—38.

67. Опытно-фильтрационные работы. М., «Недра», 1974. 202 с. — Авт.: В. М. Шестаков, Д. Н. Башкатов, И. С. Пашковский и др.

68. Основы гидрогеологических расчетов. М., «Недра», 1965. 306 с. — Авт.: Ф. М. Бочевер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. Н. Шестаков.

69. Пилатовский В. П. Влияние призабойной макронеоднородности пласта на дебит скважины. Докл. АН СССР, 1953, т. XCIII, № 3, с. 417—420.

70. Полякова К. К., Пайма В. И. Технология и оборудование для нанесения порошковых полимерных покрытий. М., Машиностроение, 1972. 135 с.

71. Применение меловых растворов для вскрытия водоносных горизонтов в песках и песчано-гравийных отложениях. Белгород, изд. ЦНИИГоросушение. 1967. с. 4. — Авт.: В. И. Малиованов, В. В. Сафонов, А. И. Тимашков, В. Е. Аншилов.

72. Ребрик Б. М. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. М., «Недра», 1968. 261 с.

73. Роговой В. Л. Фильтры для водозаборных скважин. М., ЦБНТИ Гипроводхоз. Серия 6, вып. 2, 1968, с. 3—17.

74. Результаты испытания вибромолота БВС-1 при посадке и извлечении труб. ЦБНТИ Минмонтажспецстрой. Специальные работы в промышленном строительстве, серия V, вып. 5 (71), 1972, с. 5—7. — Авт.: В. В. Верстов, М. Г. Цейтлин, Л. Л. Либин, П. Е. Ожерельев.

75. Сафонов В. В. Новые технологические варианты применения химической обработки. Материалы конференции по обмену опытом в научных исследованиях и проектировании осушения месторождений полезных ископаемых. Белгород, 1966, ЦНИИГоросушение. с. 195—201.

76. Сооружение высокодебитных водозаборных и дренажных скважин: М., «Колос», 1974, 175 с. — Авт.: В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев, А. Я. Гуркин и др.

77. Страмель Г. И. Восстановление производительности скважин (перевод с английского). М., изд. ВСЕГИНГЕО. Переводы статей по гидрогеологии и инженерной геологии, вып. 7, 1967, с. 20—34.

78. Суреньянц Я. С. Водяные скважины. Министерство Коммунального хозяйства РСФСР, 1957. 294 с.

79. Тихов М. Н. Математическая теория движения жидкости и газа к центральной несовершенной скважине. Харьков, изд. Харьковского Государственного Университета, 1964. 154 с.

80. Ткаченко В. П. Расслоение гравия при устройстве гравийно-обсыпных фильтров в скважинах большого диаметра. — «Труды ВНИИ ВОДГЕО», 1971, вып. 31, с. 103—110.

81. Федоров Ю. М., Петров А. А. Предупреждение кольматации гидрогеологических фильтров. — «Разведка и охрана недр», 1974, № 7, с. 56—58.

82. Фертель Г. Я. Практические методы разглинизации водоносных пластов артезианских скважин. — «Гидротехника и мелиорация», 1958, № 3, с. 17—23.

83. Фильтры с коническими отверстиями и рекомендации по их применению. — «Экспресс-информация ОНТИ ВИЭМС. Сер. техника и технология геологоразведочных работ», 1973, № 12, 18 с. — Авт.: И. Ф. Володько, И. В. Куликов, Г. М. Панкратова, В. И. Максимов.

84. Фоменко В. И. Подбор оптимальных параметров гравийнозасыпных фильтров дренажных и водозаборных скважин. — «Труды ЦНИИГоросушение», 1970, вып. 12, 61—70 с.

85. Хейн А. Л. Приближенная теория установившегося притока жидкости и газа к несовершенным скважинам с меридионально-симметричной конструкцией забоя. — «Труды ВНИИГаза», 1956, вып. VIII, с. 91—104.

86. Хейн А. Л. Теория линейного притока жидкости и газа к скважинам, несовершенным по характеру и степени вскрытия пласта и новые формулы по расчету их производительности. — «Труды ВНИИГаза», 1963.

87. Холодный Н. Г. Железобактерии. М., изд. АН СССР, 1953. 223 с.

88. Хруцкая З. Я. Заиление дренажа железистыми соединениями. М., «Колос», 1970, 96 с.

89. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1963. 396 с.

90. Чубриков В. М., Кесельман Я. Э. К расчету на прочность каркаса стержневых фильтров. — «Гидрстехника и мелиорация», 1973, № 8, с. 82—83.

91. Шейдеггер А. Г. Физика течения жидкостей через пористые среды. М., ГТТИ, 1960. 232 с.

92. Шержуков Б. С., Гамаюнов М. И. Методика расчетов гидрогеологических параметров водоносных пластов при опробовании их опытной скважиной. — «Геология и разведка», 1964, № 5, с. 105—112.

93. Шестаков В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа подземных вод. М., изд. МГУ, 1965. 232 с.

94. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. М., изд. АН СССР, 1961. 208 с.

95. Щелкачев В. Н. Применение операционных методов к решению задачи о движении упругой жидкости в упругом пласте. Докл. АН СССР, 1951, т. 79, № 5, с. 751—754.

96. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959. 462 с.

97. Шляйферт М. А., Вольницкая Э. М. Увеличение дебита водяных скважин взрывом. М., «Недра», 1970. 63 с.

98. Якубов Х., Абиров А. Некоторые пути снижения затрат на строительство и эксплуатацию вертикального дренажа. — «Гидротехника и мелиорация», 1976, № 2, с. 28—32.

99. Bieske E. Bohrbrunnen. Verlag von R. Oldenburg, München und Berlin, 1953. p. 359.

100. Cooper H. H., Bredehoeft I. D., Papadopulos I. S. Response of finite-diameter well to an instantaneous charge of water. — «Water Res. Res.», 1967, vol. 3, No 1, p. 263—269.

101. Dodson C. K., Cardwell W. T. Flow into slotted liners and application of the theory to coreanalysis. — «Petr. techn.», vol. 7, march. 1944, p. 1—16.

102. Fayard L. D. Relation between oxidation potential and the occurrence of iron in ground water from the Chicot aquifer Lafayette Louisiana. — «Geol. Surv. Profess. Pap.», 1971. No 750—D, p. 182—186.

103. Ground water and wells. Edward E. Johnson, Saint Paul, Minnesota 55104, Copyright 1966, 440 p.

104. Johnson E. Saint Paul 4, Minnesota Catalog 169 Bull. No. 1033, June, 1969. 35 p.
105. Hagústa. Filter mit Kiesbelag. Drucksache NoNo 213, 214, 215, 216a, 216, 219.
106. Hässelbarth U., Lüdeman D. Die biologiache Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung von Eisen-und Manganbakterien. — «Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau», 1967, No 10—11.
107. Koch R. Belastung und Festigkeit von Brunnenfilterrohren. Technische Berichte. I. F. Nold and Co. No. 21, 1964, p. 1—11.
108. Klotz D. Hydraulische Eigenschaften der Schlitzbrückenfilter «Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau», 1960, No 2, p. 451—459.
109. Klotz D. Hydraulische Eigenschaften der Schlitzfilter II. — «Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau», 1970, 21, No 10, p. 369—376.
110. Klotz D. Hydraulische Eigenschaften der Schlizfilter 1. — «Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau», 1970, 21, No 11, p. 411—416.
111. Klotz D. Hydraulische Eigenschaften der Johnsonfilterrohre. — «Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau», 1971, 22, No 8, p. 283—286.
112. Klotz D. Hydraulische Eigenschaften der Kiesbelagfilter. — «Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau», 1971, 22, No 9, p. 323—328.
113. Laval C. Photographing water wells. J. AWWA, 1951, No 5.
114. Leatherwood F. N., Peterson D. F. Hydraulic head at the interface between uniform sands of different sizes. Trans. Amer. Geophysical Union, vol. 35, No. 4, 1954.
115. Marton Lajos, Sellyey Dyuba. Eltömadött virado kutak feltarasanak tapasztalati. «Hidrol. közl.», 1971, 51, No 3, p. 113—122.
116. Mogg I. L. Corrosion and incrustation. Guide lines for water wells. — «Water well J.», 1973, 27, No 2, p. 30—36.
117. Nold Brunnenfilter Buch. Druck: Heinrich Anthes, Darmstadt — Archeilgen Copyright, 1968. 303 p.
118. Petersen I., Rohwer C., Albertson M. Effect of well screens on flow into wells. — «Proc. Amer. Soc. civil. Engrs.», 1953, december.
119. Soliman M. M. Boundary flow considerations in the design of wells. — «J. of the Irrigation and Drainage Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Engrs», 1965, 91, No 1, p. 159—177.
120. Wissel D., Gerstner W. Die Gammabestrahlung der Brunnenfilter — ein wirksames Schutzverfahren gegen Brunnenverockerung. — «Wasserwirtschaft — Wassertechnik», 1973, 23, No 6, p. 191—200.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Типы и конструкции фильтров	5
§ 1. Фильтры из стальных труб	5
§ 2. Фильтры с водоприемной поверхностью из металлических и синтетических сеток	8
Фильтры с металлическими сетками из меди, латуни и нержавеющей стали	8
Фильтры с сетками из пластических масс	16
§ 3. Фильтры из штампованных листовых материалов	23
§ 4. Фильтры каркасно-проволочные	41
§ 5. Фильтры каркасно-стержневые	48
§ 6. Фильтры щелевые, изготовляемые на основе синтетических материалов	56
Фильтры с использованием поливинилхлоридных труб	57
Фильтры щелевые, изготовляемые литьевым способом	61
Фильтры на основе полиэтиленовых труб	64
Фильтры на основе стеклопластиков	66
Фильтры наборные из кольчатых стеклянных дисков	73
Фильтры наборные из кольчатых пластмассовых дисков	73
Фильтры сборные из пластин полипропилена	77
Фильтры щелевые из фанерных труб, обработанные раствором смолы CHS-epox 300 AC	78
§ 7. Фильтры гравийные	79
Фильтры, создаваемые на поверхности земли	81
Фильтры блочного типа	82
Фильтры, создаваемые на забое скважин	91
§ 8. Коррозионные свойства вод и их воздействие на фильтры	93
§ 9. Технология и способы защиты фильтров от коррозионного разрушения	95
Глава II. Гидравлика фильтров скважин	103
§ 10. Общее сопротивление скважины	103
§ 11. Сопротивление фильтра $\zeta_{2ф}$ без учета контактных потерь напора	105
§ 12. Сопротивление (проницаемость) фильтров нагнетательных (поглощающих) скважин	111
§ 13. Сопротивление фильтров, находящихся в контакте с породой	131
§ 14. Сопротивление (водопроницаемость) фильтров блочного типа	137
§ 15. Комплексная оценка сопротивления фильтров	139
§ 16. Сопротивление водоносных пород в прифильтровой зоне	141
§ 17. Сопротивления, вызываемые отклонениями от линейного режима фильтрации	143
§ 18. Полевые исследования гидравлических сопротивлений опытных и эксплуатационных скважин	145
§ 19. Методы определения параметров фильтров и скважин	151
Оценка показателя обобщенного сопротивления скважин по понижению уровня в затрубном пьезометре	152
Оценка обобщенного сопротивления скважин по опытным и эксплуатационным откачкам	153

Стр.

Оценка обобщенного сопротивления скважин по восстановлению (понижению) уровня 155
Оценка параметров фильтров по данным расходометрии . . . 158
Оценка параметров скважин по результатам экспресс-налива 159

Глава III. Кольматаж фильтров и прифильтровых зон скважин 164

§ 20. Механический кольматаж фильтров и прифильтровых зон скважин и меры по его предупреждению 164
§ 21. Химический кольматаж фильтров и прифильтровых зон скважин и профилактические меры по его предупреждению 166
§ 22. Биологический кольматаж скважин 177
§ 23. Характер зарастания фильтров и размер зон их кольматации 186
§ 24. Прогноз кольматажа скважин и определение рациональных сроков их регенерации 194
§ 25. Зависимость проницаемости пористых сред от насыщенности порового пространства кольматантом 195
§ 26. Гидравлический прогноз кольматажа скважин 198
§ 27. Гидродинамический прогноз кольматажа скважин 201
§ 28. Оценка количества кольматанта в фильтре и прифильтровой зоне скважины 207

Глава IV. Подбор и расчет фильтров 210

§ 29. Требования, предъявляемые к конструкциям фильтров . . . 210
§ 30. Прочностные критерии при подборе фильтров 212
§ 31. Подбор фильтров в условиях коррозии и кольматажа 219
§ 32. Гидравлический расчет фильтров и их подбор. 221
§ 33. Обеспечение суффозионной устойчивости пород в призабойной зоне 225
§ 34. Подбор фильтров блочного типа 230
§ 35. Расчет гравитационных фильтров 233
§ 36. Подбор фильтров наблюдательных скважин 234

Глава V. Установка фильтров при различных способах бурения и их освоение 242

§ 37. Установка фильтров при ударно-канатном бурении 242
Фильтры с сетчатым покрытием 242
Фильтры с однослойной гравийной обсыпкой 244
Влияние подработки забоя на установку фильтров при ударном бурении 254
Гравийные фильтры с многослойной обсыпкой 261
§ 38. Установка фильтров в скважинах, пробуренных роторным способом 263
Установка и освоение фильтров в скважинах, пробуренных роторным способом с прямой промывкой забоя глинистым раствором 263
Установка фильтров при бурении скважин роторным способом с обратной промывкой забоя чистой водой 284
§ 39. Песчаные и гравийные обсыпки, их подготовка и устройство в скважинах 287

Глава VI. Ремонт скважин, оборудованных фильтрами, и методы восстановления их производительности 291

§ 40. Факторы, влияющие на продолжительность работы скважин 291
§ 41. Восстановление дебита водозаборных скважин методом химической обработки 307
Методы кислотной обработки 312
Полифосфатные обработки 321
Комбинированные способы 324
§ 42. Смена фильтров 331

Список литературы 337