

## Глава 8



# ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ПЕСКОВАНИЯ СКВАЖИН

### 8.1. ПЕСКОВАНИЕ КАК ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

#### 8.1.1. МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ ПЕСКА В ОКОЛОСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ

Пластовый песок может проникать в скважину при наличии фильтрации и без нее. На практике пескопроявления обычно обусловлены воздействием фильтрационного потока на продуктивный пласт, в процессе которого происходит изменение его структуры за счет удаления отдельных частиц или их агрегатов из околоскважинной зоны. При низких скоростях фильтрации силы сцепления между частицами превосходят силы гидродинамического давления и суффозии не наблюдается. С увеличением скоростей фильтрации силы гидродинамического давления разрушают структурные связи между частицами или агрегатами последних.

Скорости, при которых начинается разрушение структурных связей грунта и начинается суффозия, называют критическими.

Определению критических скоростей фильтрации из пласта посвящено много исследований, которые не сводятся к общему знаменателю. Достаточно точно определяются критические скорости фильтрации для выноса частицы с поверхности воронки бесфильтровой скважины или речного дна. В этом случае частица находится в свободном состоянии и ее путь миграции не прегражден другими частицами. В реальных условиях в пласте частица находится в стесненном состоянии, так как окружена соседними частицами, часть которых преграждает путь возможного перемещения. В этой связи на суффозионные процессы влияют не только скорости фильтрации, размер частиц и коэффициент трения породы, но и степень неоднородности песка, его окатанности, коьматации околоскважинной зоны пласта при вскрытии, характер освоения скважины и другие факторы. Очевидно, что

учесть влияние вышеперечисленных параметров для всего многообразия горно-геологических условий и создать универсальные зависимости для прогнозирования суффозии не реально. Известные формулы применимы только для строго оговоренных условий и не позволяют охарактеризовать процесс миграции песка в околоскважинной зоне в целом.

Отсутствие до настоящего времени удовлетворительного описания суффозии для различных условий проведения работ, методики прогноза выноса песка из скважины при эксплуатации пласта обусловлено тем, что в качестве основного параметра, по которому прогнозировалась суффозия, принималась скорость фильтрации, являющаяся по своей сути подчиненным фактором. Некоторыми исследователями отмечается, что абсолютная скорость после установившегося режима, особенно для малых скоростей фильтрации, слабо влияет на вынос песка. К резкой интенсификации пескования приводит изменение скорости фильтрации как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Другими словами, вынос песка существенно возрастает при дестабилизации режима фильтрации, а с течением времени при установившемся режиме резко уменьшается (иногда до нуля). При установившемся режиме фильтрации вокруг пор пласта, обсыпки или отверстий фильтра формируется арочная структура, силы сцепления между частицами и перепада давления компенсируют друг друга при заданном режиме фильтрации. При изменении режима эксплуатации меняется расход через арочную структуру, перепад давления на арке, что приводит к ее переформированию. Переформирование арки происходит после ее полного обрушения и выноса обрушенной породы из скважины, что и приводит к интенсификации пескования. Новая арка формируется на расстоянии от отверстий пор грунта или фильтра, соответствующем измененному расходу через арку и перепаду давления при новом режиме.

Автором установлено, что основной фактор, определяющий суффозию, — режим фильтрации флюида в околоскважинной зоне. При ламинарном режиме возможно формирование устойчивых арочных структур и предотвращение пескования при установившейся фильтрации. В случае турбулентной фильтрации арочные структуры под воздействием пульсирующих скоростей и давления на контуре разрушаются, что приводит к суффозии. Нарушение устойчивых структур можно наблюдать и в случае ламинарного режима при остановке или интенсификации откачки. В этом случае также наблюдается пульсация давления на контуре арочной структуры, возникает гидравлический удар и дестабилизация режима фильтрации. Последний учитывает

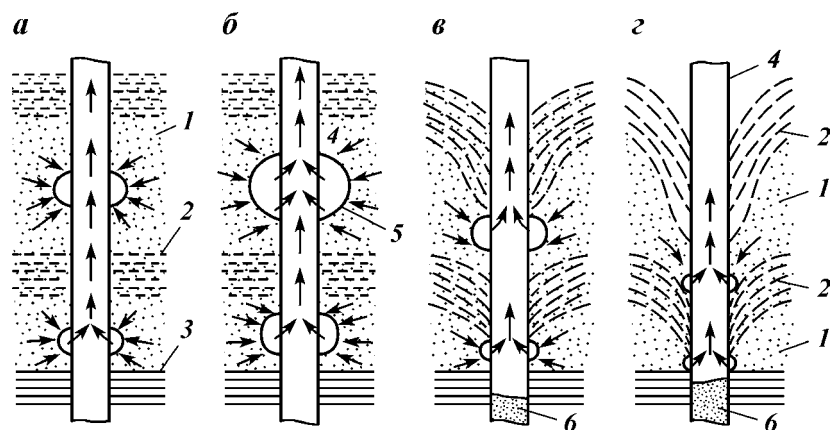
влияние на суффозию кольтационных процессов. При кольтации снижается активная пористость грунта, увеличиваются скорости фильтрации, возникает ранняя турбулизация потока, что приводит, как правило, к интенсификации суффозии.

Вынос песка при фильтрации и отсутствии удовлетворительного фильтра происходит в периодическом режиме, который в зависимости от условий проведения работ может либо интенсифицироваться, либо стабилизироваться и прекратиться. Стабилизация выноса песка происходит при формировании в околоскважинной зоне естественного фильтра. Естественный фильтр в процессе откачки образовывается редко, что связано с определенным фракционным составом песка продуктивного пласта, характеризующегося практически отсутствием средних фракций. Присутствие в песке средних фракций препятствует выносу мелких частиц через крупные, а следовательно и формированию естественного фильтра.

Обычно фракционный состав песков продуктивного пласта характеризуется плавным изменением размера частиц по кривой гранулометрического состава. В таких условиях процесс формирования естественного фильтра затрудняется и стабилизации пескования со временем не происходит. При невозможности стабилизации и прекращения выноса песка пескование приводит к необратимым явлениям, связанным со снижением эксплуатационных характеристик и прежде всего – снижением удельной производительности скважин. Снижение удельной производительности скважины происходит за счет замещения более проницаемых пород продуктивного пласта на менее проницаемые и в различных горно-геологических условиях протекает по-разному.

Продуктивный пласт сложен обычно неоднородными (по фильтрационным свойствам в вертикальном разрезе) породами с чередованием более и менее проницаемых пропластков. Основной приток в скважину при эксплуатации, а следовательно и максимальные скорости фильтрации наблюдаются в более проницаемых пропластках, что приводит к преобладающему выносу песка через эти интервалы. По мере эксплуатации объем вынесенной из наиболее продуктивных интервалов породы увеличивается и растет объем полостей, образованных в околоскважинной зоне.

С увеличением объема каверны ее устойчивость снижается и при некоторых критических значениях происходит обрушение стенок, сопровождающееся резким увеличением песка, поступающего в скважину и формирующего песчаную пробку (рис. 8.1). При обрушении каверны менее проницаемые пески из вышележающих интервалов, обогащенные глинистыми и другими



**Рис. 8.1. Развитие суффозии в неоднородных по фильтрационным свойствам песках:**

*а* — освоение скважин; *б* — развитие суффозионных воронок и каверны; *в* — частичное перекрытие интервалов слабопроницаемыми породами; *г* — экранирование приемной части скважины; 1 — проницаемые породы; 2 — менее проницаемые породы; 3 — водоупор; 4 — скважина; 5 — каверна; 6 — песчаная пробка

кольтатирующими частицами частично перекрывают проницаемый интервал.

В процессе последующей откачки в нижней части наиболее проницаемого интервала вновь формируется каверна, но уже на менее протяженном интервале притока. Сопротивления притоку в околоскважинной зоне за счет замещения части проницаемой породы на менее проницаемую увеличиваются, что приводит к усугублению неравномерности эпюры входных скоростей фильтрации и более резкому развитию каверны в горизонтальном направлении.

С уменьшением угла наклона поверхности воронки к горизонтали ее устойчивость снижается, что приводит к увеличению чувствительности свода к колебаниям давления в гидравлической системе и ускоренному разрушению при изменении режима откачки. Вторичное и последующее обрушение воронки происходит за меньший промежуток времени, чем первичное. Это связано с усугублением неравномерности притока в скважину и возникновением каверны критического размера с критическими скоростями фильтрации на поверхности при меньшем дебите. Итак, в процессе освоения скважины при постоянном дебите в неоднородных песках происходит периодическое ускоряющееся во времени разрушение сводов, образующихся при выносе песка

из каверн и проницаемые породы замещаются на менее проницаемые.

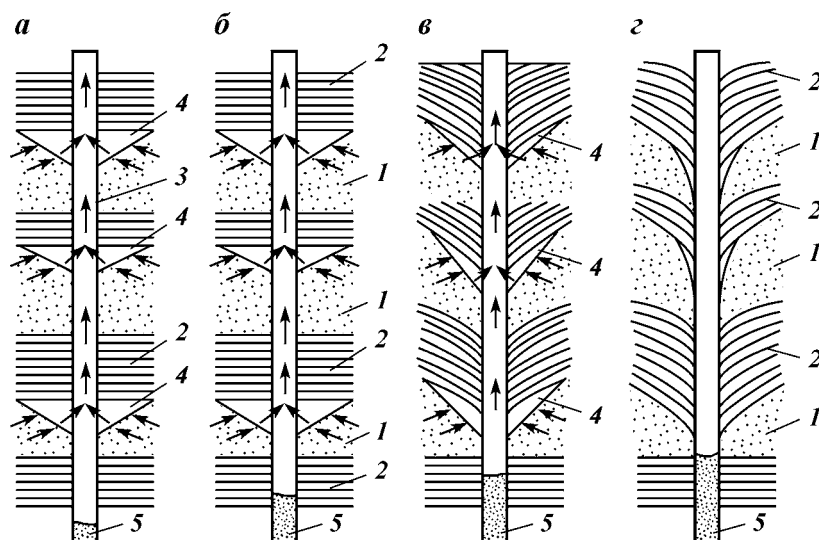
Прифильтровая зона скважины может частично или полностью экранироваться от наиболее продуктивных интервалов слабопроницаемыми породами. Обычно слабопроницаемые породы включают тонкие и глинистые фракции. Поэтому при замещении процесс пескования не уменьшается, а наоборот интенсифицируется. Потери напора в околоскважинной зоне резко возрастают и дальнейшая эксплуатация скважины становится экономически невыгодной. Характерно, что ремонту такие скважины не подлежат, и их следует перебуривать.

В условиях, когда продуктивный пласт сложен чередующимися пропластками песчаных и глинистых пород, процесс снижения проницаемости околоскважинной зоны протекает иначе. При откачке песок из скважины выносится, образуя ряд бесфильтровых воронок, в которых роль устойчивой кровли выполняют глинистые пропластки. Удаление песка происходит плавно, причем с течением времени пескование уменьшается. По мере разработки каверн их устойчивость также уменьшается, что приводит к обрушению глинистой кровли и перекрытию интервала водопритока глинистыми породами.

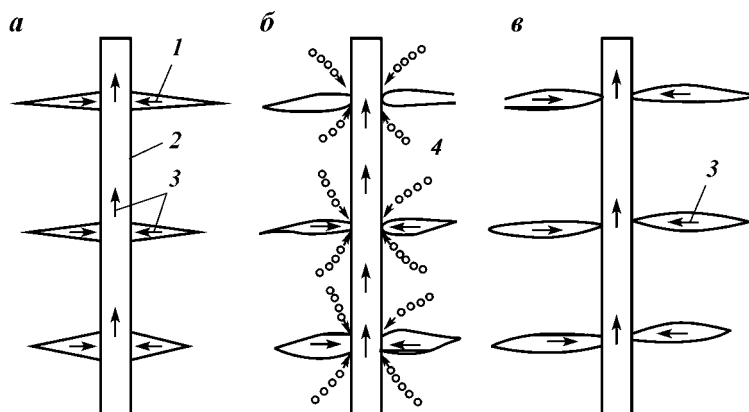
В момент обрушения воронок происходит резкое уменьшение удельной производительности скважины, которая при последующей откачке не только не восстанавливается, но и еще больше снижается.

Динамика развития суффозии в пластах, сложенных чередующимися пропластками песков и глинистых пород, представлена на рис. 8.2. После замещения песка в интервале притока на глину скважина подлежит перебуриванию. Увеличение сопротивления пород в околоскважинной зоне может наблюдаться при резких перепадах давления на пласт даже в скважинах, ранее не подверженных суффозии. Обычно такие явления происходят в начальный момент откачки при значительных депрессиях на пласт в течение ограниченного промежутка времени. При резком перепаде давления на пласт часть породы из наиболее проницаемых пропластков выносится из скважины, а окружающие менее проницаемые породы или пропластки перекрывают частично основной интервал притока. В начальный момент откачки в околоскважинной зоне возникает разрыв потока, создается вакуум, способствующий подсасыванию в интервал основного потока инородных примесей, что приводит к снижению его проницаемости.

Развитие суффозионного процесса при резких перепадах давления показано на рис. 8.3. Создание больших депрессий на пласт приводит к снижению удельной производительности сква-



**Рис. 8.2. Развитие суффозии в песчано-глинистых пластах:**  
*а* – освоение скважины и образование воронок; *б* – развитие воронок; *в* – обрушение воронок и частичное перекрытие продуктивных интервалов; *г* – экранирование продуктивных интервалов непроницаемыми породами; 1 – песок; 2 – глинистые породы; 3 – скважина; 4 – каверна; 5 – песчаная пробка



**Рис. 8.3. Развитие суффозии в относительно устойчивых породах при резких перепадах давления:**  
*а* – раскрытие трещин; *б* – частичное перекрытие трещин; *в* – полное перекрытие трещин; 1 – продуктивные трещины или пропластки, сложенные наиболее проницаемым материалом; 2 – скважина; 3 – направление движения потока флюида; 4 – направление перемещения породы

жины, восстановить которую при ремонтных работах сложно. Проникновение песка в скважину без фильтрации может происходить при определенных соотношениях реологических свойств раствора, заполняющего скважину, пластового флюида и гранулометрического состава пластового песка. В практике продуктивные пласты, частицы которых при определенных условиях без фильтрации проникают в скважину, называют плывунами. Для плывунов характерно, что частицы в пластовой или заполняющей скважину жидкости находятся во взвешенном состоянии и могут образовывать естественный раствор. Проникновение песка в скважину происходит в случае отсутствия фильтрации под влиянием диффузии. Запишем условие возникновения суффозии при отсутствии фильтрации

$$\tau_n > \frac{gd(\rho_n - \rho)}{6k_\phi}, \quad (8.1)$$

где  $\tau_n$  — статическое напряжение сдвига пластовой жидкости;  $d$  — размер частиц песка;  $\rho_n$  — плотность песка;  $\rho$  — плотность пластовой жидкости;  $k_\phi$  — коэффициент формы, уменьшающийся с ростом диаметра частиц песка ( $k_\phi = 3,5 \div 3$ ).

С целью устранения проникновения песка в скважину из пластов пловунного типа следует заполнять ствол скважины жидкостью с пониженными структурными свойствами, т.е.

$$\tau_p < \frac{gd(\rho_n - \rho_p)}{6k_\phi}, \quad (8.2)$$

где  $\tau_p$  — статическое напряжение сдвига заполняющего скважину раствора;  $\rho_p$  — плотность заполняющего скважину раствора.

#### 8.1.2. МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПЕСКОВАНИЯ

Существуют гидродинамический и механический методы предотвращения суффозии.

Гидродинамический метод может быть применен в относительно устойчивых породах, когда за счет эксплуатации в умеренных режимах пескования можно избежать. Суть метода заключается в исключении возникновения значительных депрессий на пласт в ограниченные промежутки времени, приводящих к нарушению ранее устойчивой структуры пород. Величина критических депрессий для конкретных горно-геологических условий должна определяться по методике, аналогичной определению критического градиента гидроразрыва пласта. Обычно эксплуатация скважин при ограниченном дебите экономически не выгодна.

Механический метод заключается в создании на пути миграции частиц при суффозии различных преград. Известен способ закрепления пород продуктивного пласта в околоскважинной зоне синтетическими материалами, упрочняющими структурные связи между частицами. Недостаток этого способа — существенное снижение проницаемости пород в околоскважинной зоне за счет заполнения клеящим веществом пор грунта и снижения его активной пористости. С целью устранения снижения пористости грунта при креплении прифилтровой зоны был разработан способ, заключающийся в создании в интервале продуктивного пласта каверны, заполнения каверны материалом с повышенной проницаемостью. В дальнейшем частицы этого материала скрепляются синтетическими материалами — смолами.

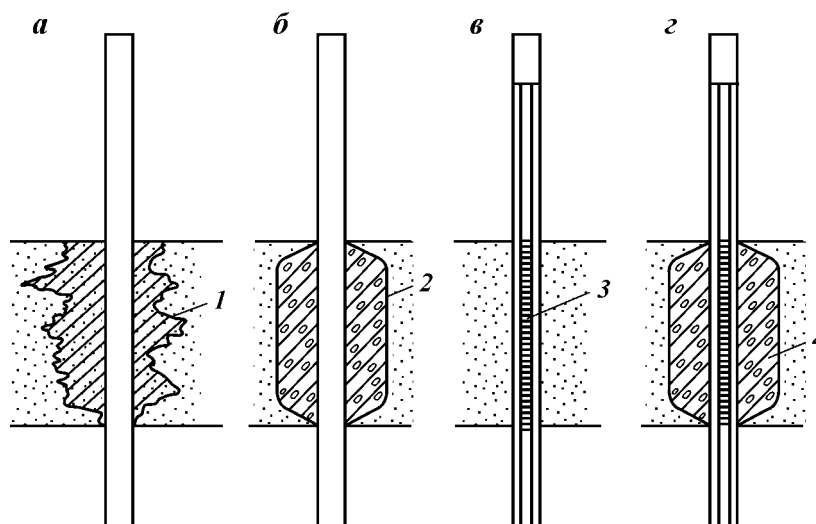
В процессе склеивания заполнителя формируются тупиковые поры, наличие которых приводит к существенному снижению активной пористости грунта и как следствие — повышению гидравлического сопротивления. Кроме того, существенную трудность представляет собой обеспечение равномерного распределения клеящего вещества в порах заполнителя.

Наиболее прогрессивным методом предотвращения суффозии считается экранирование поверхности песка продуктивного пласта фильтром. Известны самые разнообразные конструкции фильтров, суть которых заключается в задержании частиц песка продуктивного пласта вокруг отверстий фильтра. Размер отверстий фильтра выбирается по определенной методике с целью предотвращения выноса через них песка в соответствии с характерным размером частиц песка. Фильтры устанавливают также для поддержания устойчивости пород околоскважинной зоны при креплении их синтетическими материалами.

Наиболее прогрессивны конструкции скважин, когда между песком продуктивного пласта и каркасом фильтра намыывают высокопроницаемый материал (гравий). Гравийные фильтры нашли наиболее широкое применение в отечественной и зарубежной практике как наиболее перспективные и характеризуются следующими преимуществами:

- высокая проницаемость гравия в сравнении с песком продуктивного пласта, отсутствие тупиковых пор;
- неограниченная поверхность фильтрации и любая форма заполнения гравием каверны;
- малый градиент гидравлического сопротивления по толщине фильтра и низкая интенсивность кольматационных процессов;
- малое сопротивление каркаса фильтра вследствие возможного увеличения размеров отверстий в 6—10 раз;





**Рис. 8.4. Типовые схемы механических способов предотвращения пескования:**  
*а* — крепление пород призабойной зоны *1* специальными составами; *б* — создание каверны *2*, ее заполнение высокопроницаемым материалом с последующим закреплением специальными составами; *в* — экранирование пород призабойной зоны фильтром *3*; *г* — экранирование пород призабойной зоны фильтром через промежуточный слой гравия *4*

простота конструкции, равномерные свойства по длине и толщине и возможность оперативного удаления фильтра при его замене; равномерный приток по длине фильтра.

Учитывая, что ни один из известных способов предотвращения пескования (рис. 8.4) не характеризуется преимуществами, способными конкурировать со свойствами гравийных фильтров, далее рассмотрим технику и технологию сооружения гравийных фильтров, разработанную при участии автора.

## 8.2. ГРАВИЙНЫЕ ФИЛЬТРЫ

### 8.2.1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГРАВИЙНЫХ ФИЛЬТРОВ

К основным параметрам гравийных фильтров относят следующие:

- гранулометрический состав гравия;
- качество гравия;
- размер отверстий каркаса фильтра;
- толщина гравийного фильтра и его диаметр.

### Гранулометрический состав гравия

При выборе гранулометрического состава гравия для обсыпки в нашей стране пользуются рекомендациями, принципиально отличными от рекомендаций ведущих зарубежных фирм. У нас нет достаточных оснований для однозначного разрешения отмеченного противоречия в пользу тех или иных исследователей по причине многообразия условий формирования фильтров, назначения скважин, условий эксплуатации и характера проводимых экспериментов. Приведем ниже наиболее типичные результаты работ отечественных и зарубежных авторов и определим рациональные области их использования.

В табл. 8.1 представлена классификация различных подходов к механизму предотвращения пескования гравийными фильтрами, преимуществ, недостатков и рациональных областей применения каждого с указанием рекомендуемых коэффициентов межслойности, равных отношению средних размеров гравия и песка.

Характерно, что процесс формирования научных взглядов на методику подбора гранулометрического состава гравия для обсыпки в нашей стране и за рубежом протекал в противоположных направлениях. Ранние зарубежные исследования были основаны на предположении о формировании вокруг пор обсыпки устойчивых арочных структур, на смену которым пришли выводы о необходимости образования естественного фильтра, а затем и о целесообразности механического задержания частиц песка по внешнему контуру обсыпки. Взгляды отечественных исследователей развивались наоборот от рекомендаций по механическому задержанию частиц песка по внешнему контуру гравийного фильтра через предположения о формировании вокруг пор обсыпки арочных структур к выводу о целесообразности формирования естественного фильтра.

Следует отметить, что результаты, аналогичные последним зарубежным рекомендациям, были получены ранее В.С. Оводовым, Е.А. Замариным, С.В. Комиссаровым и другими отечественными специалистами. Вывод о целесообразности предотвращения суффозии гравийным фильтром путем механического задержания по внешнему контуру основывался на простом сопоставлении размеров частиц песка и пор обсыпки в простейших опытах на фильтрационных лотках. Из предположения о сферичности частиц гравия для различной степени уплотнения геометрическим путем было установлено, что через рыхлую обсыпку возможна миграция зерен, составляющих 0,41 диаметра частиц гравия, а через уплотненную обсыпку – 0,154.

Крупность гравия, предотвращающего суффозию в рыхлом сложении, должна не более чем в 2,44 раза превышать крупность частиц песка. В случае уплотненного слоя частицы гравия должны быть не более чем в 6,49 раз крупнее частиц песка. В реальной засыпке объем пор близок к соответствующему объему при плотном сложении сферичных частиц. Размер пор однородной гравийной засыпки составляет ~0,21 от диаметра частиц. Отсюда, при соотношении диаметров зерен гравия и песка 5–4 вынос может быть исключен. Е.А. Замарин экспериментальным путем установил, что коэффициент межслойности обсыпки, предотвращающей пескование при реальных градиентах фильтрации, не должен превышать 7. В отечественной практике строительства нефтяных и газовых скважин в 40–50-х гг. для подбора гравийной обсыпки использовали правило

$$\bar{D} = 12,9d_{10}, \quad (8.3)$$

где  $\bar{D}$  – средний диаметр частиц гравия;  $d_{10}$  – диаметр частиц песка, соответствующий 10%-му ситовому отсеvu.

При пересчете размера  $d_{10}$  на средний диаметр  $\bar{d}$  для типовых песков продуктивных пластов коэффициент межслойности в формуле (3) уменьшается с 12,9 до 5–6.

В.С. Оводов подбирал обсыпку еще более строго. Он считает, что суффозии на контакте двух песчаных слоев не происходит, если отношение проницаемости обсыпки и песка продуктивного пласта не превышает 2–2,5. Изменение коэффициента фильтрации в зависимости от крупности гравия иллюстрируется цифрами, приведенными ниже.

Фракция гравия, мм.....	0,25–5	0,5–1	1–2	2–3	3–5	5–7	7–10
Коэффициент фильтрации, м/сут.....	20	120	200	800	1150	11 000	14 000

Рекомендуемый коэффициент межслойности (по В.С. Овову) не превышает 2, что, вероятно, объясняется рыхлым сложением слоев гравия в экспериментальных работах.

В 40–50-х гг. С.В. Комиссаровым были проведены фундаментальные исследования, которые спустя 30 лет были подтверждены Р. Сеусье и другими ведущими зарубежными специалистами. В экспериментах была исследована проницаемость гравийных фильтров при попадании в них примесей разного состава и в разных объемах. Значения коэффициента фильтрации наиболее типовой фракции гравийной обсыпки 0,5–1 мм в смеси с другими фракциями, по данным С.В. Комиссарова, представлены в табл. 8.2.

Добавление к фракции 0,5–1,0 мм до 10 % более крупных

Таблица 8.1

Метод предупреждения пескования	Характер предотвращения пескования	Преимущества метода	Недостатки метода	Область применения	Коэффициент межслойности (отношение среднего размера частиц гравия к среднему размеру частиц песка продуктивного пласта)
Механическое задержание частиц	Предупреждение проникновения песка в обсыпку путем задержания частиц по внешнему контуру	Высокая проницаемость гравийной обсыпки за счет исключения проникновения песка и инородных примесей внутрь фильтра, предотвращение пескования скважины при любых режимах эксплуатации во всем интервале притока, эффективное экранирование однородного песка	Невозможность декольматации скважины за счет исключения возможности выноса закольматированных частиц песка, снижение проницаемости обсыпки при проникновении в нее коьматанта, сложность эффективного подбора обсыпки для неоднородных песков	Однородные пески продуктивного пласта, малые кольцевые зазоры между стенками скважины и каркасом фильтра	5–6
Образование естественного фильтра	Частичное проникновение наиболее мелких частиц песка в обсыпку и скважину, частичное задержание наиболее крупных частиц песка по внешнему контуру обсыпки и внутри нее	Высокая проницаемость гравийной обсыпки после освоения скважины, возможность декольматации околоскважинной зоны за счет выноса частиц коьматанта и мелких фракций песка, эффективное экранирование после освоения скважины неоднородного песка	Сложность качественной декольматации скважины за счет исключения возможности выноса закольматированных частиц песка преимущественно крупных фракций, возможное снижение проницаемости фильтра за счет проникновения в него мелких и средних фракций песка, сложность предотвращения	Неоднородные по фракционному составу пески продуктивного пласта	8–12

Формирование арочных структур	Проникновение внутрь обсыпки частиц песка при дестабилизации режимов эксплуатации, предупреждение проникновения песка в скважину при устойчивом режиме эксплуатации путем задержания частиц по контуру арочных структур в обсыпке	Высокая проницаемость гравийной обсыпки после длительного освоения скважины при стабилизированном режиме, возможность качественного освоения скважины за счет выноса при откачке коьматанта и закольматированных частиц песка любой фракции	пескования в однородных песках  Пескование при изменении режимов эксплуатации и при высоких дебитах; сложность экранирования верхних интервалов фильтра, возможное снижение проницаемости фильтра при проникновении в него песка за счет пульсирующей откачки, увеличения неравномерности притока по длине фильтра	Невозможность исключения катастрофической коьматации пласта, необходимость длительного освоения скважины, удаления закольматированной породы, большая толщина обсыпки, малые эксплуатационные дебиты	>12
-------------------------------	---	---	--	--	-----

Таблица 8.2

Содержание фракции 0,5–1 мм, %	Коэффициент фильтрации (в м/сут) при добавке фракции, мм			
	1–2	3–5	5–7	7–10
90	140	112	112	120
80	–	45	105	–
70	150	60	47	90
60	–	112	30	–
50	200	115	50	80
40	–	190	110	–
30	240	270	360	210
20	–	480	480	–
10	340	920	1700	3100

частиц почти не изменяет коэффициент фильтрации. Дальнейшее увеличение содержания крупной фракции (за исключением фракции 1–2 мм) приводит к уменьшению коэффициента фильтрации гравийной смеси. Добавление крупной гравия свыше 50–60 % резко увеличивает водопроницаемость смеси.

Основная фракция, определяющая фильтрационные свойства смеси (табл. 8.3) – наиболее мелкие частицы. Смесь гравия, состоящая из равного количества различных фракций, имеет почти такой же коэффициент фильтрации, как и наиболее мелкая фракция. Добавление крупных фракций 7–10 мм в объеме 10–20 % не вносит существенных изменений в изменение фильтрационных свойств смеси. При проникновении внутрь обсыпки песка, проницаемость фильтра резко уменьшается до значений исходной проницаемости пласта. В этой связи с целью снижения гидравлического сопротивления фильтра целесообразно задерживать песок по внешнему контуру обсыпки. Впоследствии эти выводы подтвердились в работах зарубежных специалистов.

Таблица 8.3

**Фильтрационные свойства различных смесей гравия  
(по С.В. Комиссарову)**

Номер смеси	Содержание (в %) фракций, мм					Коэффициент фильтрации смеси, м/сут
	0,5–1	1–3	3–5	5–7	7–10	
1	40	20	20	10	10	76
2	30	10	20	20	20	175
3	20	20	20	20	20	153
4	40	–	30	30	–	113
5	30	–	30	40	–	210
6	20	–	40	40	–	568
7	20	20	30	30	–	166
8	50	20	20	10	–	67
9	50	10	20	10	10	74
10	50	–	10	20	20	72
11	50	–	–	30	20	87
12	40	–	20	20	20	89
13	30	10	20	20	20	140
14	10	30	20	20	20	390
15	20	20	20	20	20	95

Проницаемость гравийной обсыпки, сложенной большими по размеру частицами в течение первых пяти минут, уменьшается в 5–6 раз. Такое резкое снижение проницаемости можно объяснить тем, что при слишком большом размере частиц гравия песок проникает в гравийную обсыпку и закупоривает поровое пространство. В результате исследований было показано, что при коэффициенте межслойности менее 6 проницаемость гравийного фильтра в процессе эксплуатации остается постоянной, а при больших коэффициентах межслойности резко уменьшается.

Наиболее проницаемая обсыпка (по отношению к проницаемости песка коллектора) формируется из гравия, выбранного с учетом коэффициента межслойности, равного 6. На основании проведенных экспериментов Р. Сеусье утверждает, что при соотношении средних диаметров гравия и песка, равном 6, гравийная обсыпка предохраняет скважину от проникновения песка, сохраняет максимальную проницаемость и обеспечивает при этом высокие эксплуатационные параметры скважины.

Для определения коэффициента межслойности, при котором песок продуктивного пласта задерживается по внешнему контуру гравийной обсыпки, С.В. Комиссаровым была исследована зависимость размера частиц гравия и пор образуемой ими обсыпки. Различные фракции гравия после встряхивания в емкости цементировали канадским бальзамом. Затем было сделано несколько срезов по произвольным сечениям. При анализе фотографий срезов установлена зависимость размера гравия и пустот (табл. 8.4).

Максимальный размер пустот между частицами гравия в 1,5 раза меньше, а преобладающий размер примерно в 2 раза меньше диаметра самих частиц гравия. Крупные пустоты встречаются в каждом сечении, причем располагаются в различных местах и как бы изолированы. При толщине слоя, в несколько раз превышающем диаметр частиц, максимальные пустоты не являются показателем способности гравия удерживать песок, так как они в

Таблица 8.4

Зависимость размера частиц гравия и пустот, образуемой ими обсыпки

Фракция, мм	Диаметр частиц гравия, мм	Ширина пустот, мм	Отношение диаметра гравия к ширине пустот
0,5–1,0	0,85/0,67	1,15/0,6	1,17/1,11
1,0–2,0	1,92/0,9	1,35/0,7	1,5/1,3
2,0–3,0	2,6/1,6	1,6/1,0	1,6/1,6
3,0–5,0	4,6/3,0	3,0/1,5	1,5/2,0
5,0–7,0	5,0/4,8	3,2/1,8	1,6/2,6

*Примечание.* В числителе приведены максимальные значения, а в знаменателе – преобладающие.

начальный момент откачки заполняются песком. Способность экранировать песок определяется преобладающим размером пустот. Гравийная обсыпка, по С.В. Комиссарову, не будет пропускать песок, частицы которого в 2 раза меньше частиц засыпки. Следует отметить, что данный вывод был получен для рыхлого гравия. В случае уплотнения обсыпки рекомендуемый коэффициент межслойности увеличивается до 5–6.

Н. Стейн построил график, иллюстрирующий механизм задержания частиц песка гравийным фильтром и изменение проницаемости обсыпки в зависимости от величины коэффициента межслойности, подтверждающий целесообразность подбора обсыпки при  $k = 6$ .

Если  $k < 6$ , то песок коллектора в поры гравийной обсыпки не проникает, а задерживается по ее внешнему контуру и проницаемость фильтра максимальная. При  $k$  от 6 до 11–12 пескование скважины предупреждается за счет закупорки частицами песка порового пространства по всей толщине гравийного фильтра. Проницаемость гравийного фильтра при этом резко снижается и составляет около 30 % от начальных значений. При  $k > 12$  гравийный фильтр не обеспечивает задержания песка от проникновения в скважину. За счет миграции песка, заполняющего поры, проницаемость гравийного фильтра возрастает, а если коэффициент межслойности равен 20 и более, то величина проницаемости стабилизируется и достигает максимальных значений, приблизительно равных начальной проницаемости обсыпки.

В течение нескольких лет водная служба штата Иллинойс собирала информацию о ситовых анализах песков коллекторов и гравийных обсыпок по 20 скважинам. По полученным данным был рассчитан коэффициент несовершенства, равный отношению дебита скважин, вычисленного по измеренным параметрам пласта к фактическому отбору. При коэффициенте межслойности от 4 до 5 коэффициент несовершенства составил 90–120 %. В скважинах с коэффициентом межслойности менее 4 фильтр получался уплотненным и они имели меньший коэффициент несовершенства. Скважины с коэффициентом межслойности 7–10 характеризовались еще меньшим коэффициентом несовершенства. Одна скважина, оборудованная гравийным фильтром с межслойным отношением 10 имела коэффициент несовершенства только 0,32, а другая с коэффициентом межслойности 20 выносила столько песка, что оказалась аварийной. На основании приведенных данных Х. Смит сделал вывод о рациональном коэффициенте межслойности в пределах 4–6.

Целесообразность подбора гравийной обсыпки при качественном вскрытии пласта в соответствии с коэффициентами меж-



слоистости  $k = 6$  обоснована многими специалистами и отображена в рекомендациях ведущих западных фирм.

Рекомендации специалистов относительно целесообразности механического задержания частиц песка по внешнему контуру гравийной обсыпки, полученные в 40–50-х гг. в нашей стране и за рубежом пока не нашли реализации в отечественной практике сооружения скважин. Это объясняется неудовлетворительной технологией вскрытия продуктивного пласта, отсутствием необходимого для различных условий многообразия промывочных жидкостей, и, как правило, сильной кольматацией околоскважинной зоны.

При сильной кольматации важно своевременно освоить скважину и восстановить проницаемость пласта до значений, близких к естественным. Процесс освоения связан с необходимостью выноса из прифильтровой зоны кольматантов. Характерно, что в реальных условиях смыть глинистую или полимерную пленку с поверхности частиц песка невозможно из-за сильного адгезионного воздействия и недостаточно высоких скоростей фильтрации. В этой связи целесообразно удалять из прифильтровой зоны кольматант вместе с частицами песка, на которых он сконцентрирован.

По мнению различных специалистов в процессе формирования естественного фильтра с целью создания высокопроницаемой прифильтровой зоны следует вынести 40–70 %, а по рекомендациям Н.А. Плотникова до 90 % частиц мелких фракций и кольматанта. Вынос частиц песка с кольматантом возможен только при обеспечении их прохождения через обсыпку в начальный период откачки. В случае механического задержания частиц по контуру гравийной обсыпки процесс освоения затруднителен. С этим обстоятельством связано развитие в нашей стране разных подходов к механизму задержания частиц песка, основанном на выносе кольматантов и мелких фракций песка из околоскважинной зоны в период освоения и на предупреждении пескования в процессе эксплуатации. Как правило, освоение скважины ведут при откачке с дебитом, превышающим проектный.

Эффективное освоение скважины возможно при подборе гравийной обсыпки таким образом, чтобы вокруг пор формировались арочные структуры, которые сохраняют свою устойчивость при заданной производительности и разрушаются при интенсификации откачки. Отличительная особенность механизма подбора обсыпки с учетом формирования арочных структур заключается в том, что размер пор обсыпки во много раз превышает характерный диаметр песчаных частиц.

Интересны рекомендации И.Ф. Володько относительно под-

бора гравийной обсыпки с учетом арочного эффекта. Установлено, что при формировании арочных структур вокруг пор гравийной обсыпки отношение размеров гравия и песка существенного значения не имеет и может колебаться от 40 до 120. Рекомендуется удалить из обсыпки частицы менее 1–2 и более 15–18 мм и осуществлять строительную откачку с дебитом, превышающим эксплуатационный. Занос скважины песком, происходящий при строительной откачке, легко ликвидируется желонированием. Рекомендации И.Ф. Володько основаны на предположении, что по мере разработки каверны при откачке на ее периферии наблюдаются скорости, уже не вызывающие выноса песка. Гравий в этом случае служит только для защиты стенок каверны от обвала, но не для предотвращения вымыва песка. Отмечается, что по данным С.В. Избаш, в антифильтрах плотин при соотношении зерен гравийной обсыпки и песка в 30 и более гравий хорошо экранировал песок.

Для выполнения рекомендаций И.Ф. Володько необходимо в процессе строительной откачки обеспечивать все большее проникновение частиц гравия в пласт, что на наш взгляд затрудняется, особенно при песковании и требует использования специальной и сложной технологии, например намыва фильтра при полном поглощении жидкости-носителя с одновременным гидро-разрывом пласта. Поддержание стенок каверны крупным гравием не предотвращает поступления в фильтр песка под действием сил тяжести и горного давления.

При проникновении частиц песка внутрь обсыпки арочные структуры образуются не только по контуру воронки, но и внутри фильтра, что, с одной стороны, способствует снижению его проницаемости, а с другой – не предотвращает суффозию при откачке, так как арочные структуры быстро разрушаются при высоких скоростях потока и пульсациях давления. С другой стороны, несмотря на сложность предотвращения пескования, подбор обсыпки с учетом формирования арочных структур обеспечивает высокое качество декольматации прифилтровой зоны и не накладывает ограничений к выбору техники и технологии восстановления проницаемости пласта вблизи скважины после вскрытия.

В целях повышения суффозионной устойчивости фильтров, подобранных на основе арочного эффекта, имеется ряд более строгих рекомендаций, касающихся снижения рекомендуемых коэффициентов межслойности до 15–20. Однако характер работы фильтра при этом существенно не меняется.

К. Аренс предлагает выбирать размер обсыпки для неоднородных коллекторов согласно условиям

$$58d \geq D \geq 12d;$$

$$40d_{85} \geq D_{85} \geq 12d_{85};$$

$$D_{\max} < 12 \text{ мм},$$

где  $D_{85}$ ,  $d_{85}$  – диаметр соответственно частиц гравия и песка при 85%-ном ситовом отсеве,  $D_{\max}$  – наибольший диаметр частиц гравия.

Рекомендации по подбору обсыпки при высоких коэффициентах межслойности за рубежом относятся к 40–50-м гг. и сейчас не применяются на практике из-за повышенной вероятности пескования.

Добиться устойчивого предотвращения пескования при коэффициентах межслойности более 15 можно только в случае экранирования продуктивного пласта, сложенного неоднородными по фракционному составу песками с высоким процентом крупных частиц, после длительной строительной откачки. Предотвращение суффозии обеспечивается после формирования естественного фильтра, размер частиц которого постепенно уменьшается от каркаса в направлении песка продуктивного пласта.

Процесс формирования естественного фильтра можно обеспечить даже в однородных песках и интенсифицировать в неоднородных путем соответствующего подбора гравийной обсыпки. Характерно, что в период формирования естественного фильтра скважина может быть хорошо освоена за счет выноса мелких фракций и кольяматанта, а после сформирования структуры обсыпки при уменьшении размера частиц от каркаса в направлении стенок скважины исключается возможность пескования.

Теоретическое обоснование процесса формирования естественного фильтра дано И.Ф. Володько. При откачке с удалением от скважины скорости фильтрации убывают пропорционально квадрату расстояния от оси и соответственно уменьшается размер частиц, выносящихся из прифильтровой зоны. Н.А. Карамбиров опытным путем при экранировании песка гравийной обсыпкой установил критические скорости фильтрации, приводящие к выносу частиц определенной фракции. Результаты опытов приведены ниже.

Фракция, мм .....	0,1–0,25	0,25–0,5	0,50–1	1–2
Предельная скорость фильтрации, м/с.....	0,0006–0,0007	0,0014–0,0016	0,0023–0,0025	0,006–0,007

Зависимость диаметра частицы песка от скорости фильтрации, при которой начинается суффозия, с достаточной для практических расчетов точностью аппроксимируется линейной функцией. Решая совместно линейную зависимость, полученную на

основании данных, приведенных выше, и уравнения снижения скорости фильтрации с удалением от скважины, получим закон распределения диаметров частиц песка, не подверженных суффозии, как функцию расстояния от скважины

$$d = \frac{212,314Q}{mr}; \quad (8.4)$$

где  $d$  — диаметр частиц песка, не подверженных суффозии;  $Q$  — дебит скважины;  $m$  — мощность пласта;  $r$  — расстояние от скважины.

С.В. Комиссаров теоретическим путем определил оптимальное распределение фракционного состава песка в околоскважинной зоне после формирования естественного фильтра. Оптимальные условия притока воды к скважине будут в том случае, если в пределах прифильтровой зоны депрессионная кривая будет представлять собой прямую линию. Такое положение депрессионной поверхности возможно в том случае, если коэффициент фильтрации пород постепенно увеличивается от периферии к оси симметрии скважины.

Выведем уравнения для вычисления оптимальной проницаемости песка с удалением от скважины, исходя из закона Дарси. Для этого воспользуемся уравнениями Дюпюи для напорного горизонта

$$Q = k_{\phi} 2\pi r m \frac{dh}{dr}; \quad (8.5)$$

для безнапорного горизонта

$$Q = k_{\phi} 2\pi r h \frac{dh}{dr}; \quad (8.6)$$

где  $k_{\phi}$  — коэффициент фильтрации;  $h$  — потери напора при фильтрации.

Примем, что в прифильтровой зоне оптимального строения  $dh/dr = J = \text{const}$ , а коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$  изменяется с изменением расстояния от скважины  $r$ . Подставляя постоянные значения градиента потерь напора  $J$  в уравнения (8.5) и (8.6) и решая их относительно коэффициента фильтрации  $k_{\phi}$ , получаем

для напорного горизонта

$$k_{\phi} = \frac{Q}{2\pi m r J}; \quad (8.7)$$

для безнапорного горизонта

$$k_{\phi} = \frac{Q}{2\pi mr^2 / J^2}. \quad (8.8)$$

В табл. 8.5 представлено оптимальное уменьшение относительного коэффициента фильтрации песка в околоскважинной зоне по мере удаления от фильтра по С.В. Комиссарову. На контакте с фильтром коэффициент фильтрации породы принимается равным единице. По мере удаления от фильтра  $k_{\phi}$  снижался.

Используя данные табл. 8.3 и 8.5, можно от оптимальных значений коэффициента фильтрации перейти к рекомендуемому фракционному составу пород в околоскважинной зоне.

Опытным путем С.В. Комиссаровым было установлено, что после формирования естественного фильтра коэффициент фильтрации пород в околоскважинной зоне изменяется в пропорциях, соответствующих установленным теоретическим зависимостям (8.7) и (8.8). Эксперименты проводились на фильтрационном лотке, оборудованном пьезометрами. Результаты экспериментов приведены в табл. 8.6. В опытах с 6-тью первыми смесями режим фильтрации поддерживался постоянным, а в остальных — пульсирующим. Все смеси, за исключением последней, испытывались с прямоугольными отверстиями фильтра размером 6×20 мм, а последняя — с круглым отверстием диаметром 5 мм.

Вынос мелких фракций из гравийной обсыпки при пульсирующем режиме фильтрации происходит более интенсивно, чем при постоянной фильтрации. В обсыпке, состоящей на 50 % из фракции 0,5–1 мм и на 50 % из фракции 5–7 мм, вынос фракции 0,5–1 мм при постоянной фильтрации составил 400 дм<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> фильтра, а при пульсирующей — 900 дм<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> фильтра. При пульсирующей откачке почти вся мелкая фракция была вынесена из состава засыпки и в лотке осталась только фракция 5–

Таблица 8.5

Диаметр фильтра, мм	Гидравлическое состояние водоносного горизонта	Относительный коэффициент фильтрации пород на расстоянии от фильтра, м				
		0,05	0,1	0,2	0,3	0,5
100	Напорный	0,50	0,33	0,200	0,140	0,090
	Безнапорный	0,25	0,11	0,040	0,020	0,010
150	Напорный	0,60	0,42	0,270	0,200	0,180
	Безнапорный	0,36	0,18	0,076	0,040	0,017
200	Напорный	0,66	0,50	0,400	0,280	0,180
	Безнапорный	0,44	0,25	0,070	0,060	0,030
250	Напорный	0,71	0,55	0,380	0,300	0,200
	Безнапорный	0,50	0,31	0,150	0,087	0,040

*Таблица 8.6*  
**Вынос мелких фракций из гравийной обсыпки при формировании  
естественного фильтра**

Содержание фракций (в %) при размере, мм				Скважинность фильтра, %	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч		Вынос мелких фракций, дм <sup>3</sup>	
0,5–1	1–3	3–5	5–7		общий	на 1 м <sup>2</sup> фильтра	общий	на 1 м <sup>2</sup> филт- ра
50	–	–	50	20	0,50	50	4	400
50	25	–	25	20	1,00	100	0,5	50
70	–	–	30	20	1,45	145	4,0	400
70	–	15	15	20	1,00	100	0,3	30
70	10	10	10	20	1,00	100	0,3	30
80	–	10	10	20	0,50	50	0,2	20
90	–	5	5	20	0,36	36	1,5	150
50	–	–	50	20	0,72	72	9,0	900
85	5	5	5	20	0,45	45	1,0	100
85	5	5	5	25	0,30	30	2,0	200
85	5	5	5	15	0,30	30	1,5	150
85	5	5	5	10	0,20	20	2,0	200
90	–	5	5	15	0,20	20	1,5	150

7 мм с небольшим количеством частиц 0,5–1 мм в периферийной части.

При постоянной фильтрации полный вынос мелкой фракции наблюдался только на расстоянии 10–12 см от фильтра. Формирование естественного фильтра происходит успешно при отсутствии в составе смеси средних фракций 1–3 и 3–5 мм. Добавление этих фракций от 10 до 50 % резко уменьшает вынос мелкой фракции и поэтому коэффициент фильтрации породы непосредственно у фильтра превышает коэффициент фильтрации смеси на периферийных участках всего в 2 раза. Следовательно, естественный фильтр образуется только в песках с неоднородным фракционным составом при незначительном (менее 10 %) содержании средних фракций.

Процесс миграции песка через обсыпку, формирование естественного фильтра за рубежом в последние годы исследовался Р. Сеусье. Ученый оценил влияние на суффозионные явления размера частиц песка и гравия, скорости и ускорения фильтрационного потока, а также газожидкостного фактора. В опытах Р. Сеусье использовал хорошо отсортированный и промытый гравий из речной долины. Коллектор имитировался песками миоцена, различные фракции которого смешивались в пропорциях, аналогичных характеру ситового анализа для наиболее типичных эксплуатационных горизонтов.

Специальные емкости в моделях заполнялись песком и гравием, который перед началом опытов механически уплотнялся до

значений минимальной пористости. В процессе течения жидкости через модель скорость потока изменялась от 0,16 до 0,26 м/с. Через 5–10 мин образцы гравийного материала взвешивались и при сравнении с начальной массой образца устанавливалось количество песка, поступившего в гравийный фильтр. При изменении скорости потока в сторону увеличения или снижения количество песка, поступившего в гравийный материал, резко увеличивалось. Если скорость потока после изменения в течение некоторого времени оставалась постоянной, то объем песка, поступающего в гравийный фильтр, постепенно снижался.

Поднятием и опусканием специального груза в нагнетательной магистрали возбуждался волновой процесс, что вызывало значительное увеличение песка, поступающего в фильтр. Амплитуда гидродинамического давления в опытах достигала 0,48 МПа. При коэффициенте межслойности 6,7 наблюдалось десятикратное увеличение объема песка, а при 9,4 – стократное. Наличие газа в потоке увеличивает количество вынесенного песка в 10 и 2000 раз соответственно для коэффициентов межслойности 6,7 и 9,4.

Итак, было установлено, что интенсификации процесса формирования естественного фильтра можно добиться путем создания волнового процесса откачки и периодической подачей воздуха в скважину.

Характер изменения коэффициента фильтрации с удалением от скважины для различных смесей после формирования естественного фильтра показан в табл. 8.7

Графики изменения потерь напора и коэффициентов фильтрации слоев естественного фильтра с удалением от оси скважины для двух режимов откачки показаны на рис. 8.5.

Эффективность процесса формирования естественного фильтра обусловлена режимом откачки и скоростью фильтрации.

Таблица 8.7

Состав гравийной смеси (в %) при содержании фракций, мм				Коэффициент фильтрации (в м/сут) на расстоянии от скважины, см				
0,5–1	1–3	3–5	5–7	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
50	–	–	50	1200	850	180	–	100
70	–	–	30	1000	410	160	116	–
50	–	25	25	225	225	129	–	127
50	25	–	25	480	380	220	212	214
70	–	15	15	230	155	120	120	–
70	10	10	10	260	235	222	–	216
80	–	10	10	192	169	90	–	71
90	–	5	5	245	–	–	75	70
85	5	5	5	440	293	242	220	180

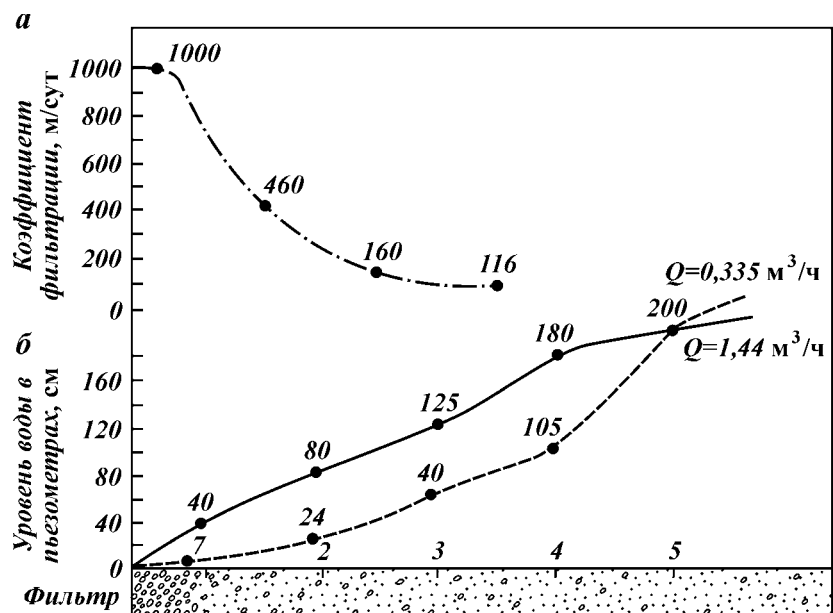


Рис. 8.5. Изменение потерь напора (б) и коэффициентов фильтрации (а) слоев естественного фильтра с удалением от оси скважины на 60 см:  
1 – 5 – номера пьезометров

Гравийная обсыпка в этом случае должна подбираться на основе планируемых режимов эксплуатации. Д. Шверцем предложено выбирать размер обсыпки в соответствии со скоростью фильтрации по условию

$$\frac{d_{40}}{d_{90}} < 5; \quad v_{\phi} < 0,015 \text{ м/с}; \quad D_{10} = 6d_{10};$$

$$\frac{d_{40}}{d_{90}} > 5; \quad v_{\phi} > 0,015 \text{ м/с}; \quad D_{40} = 6d_{40};$$

$$\frac{d_{40}}{d_{90}} > 10; \quad v_{\phi} > 0,03 \text{ м/с}; \quad D_{70} = 6d_{70},$$

где  $d_{40}$ ,  $d_{90}$  – диаметр частиц песка, соответствующий 40, 90%-ному ситовому отсеvu;  $v_{\phi}$  – скорость фильтрации;  $D_{10}$ ,  $D_{40}$ ,  $D_{70}$  – диаметр частиц гравия, соответствующий 10, 40, 70%-ному ситовому отсеvu.



Таблица 8.8

Характеристика продуктивного пласта				Характеристика гравийной обсыпки				
Тип	Диаметр частиц, мм	Коэффициент неоднородности	Средний диаметр частиц, мм	Материал обсыпки	Диаметр частиц, мм	Коэффициент неоднородности	Средний диаметр частиц, мм	Коэффициент межслойности
Несуффозионный	0,05–0,5	3,7	0,09	Песок мелко-зернистый	0,27–1,35 1,08–5,5	1,9–8,6	0,66 2,6	7–29
«	0,05–1,0	3,0	0,2	То же	0,5–5,0 1,0–10,0	1,5–8,3	1,7 4,0	8–20
«	0,01–0,25	3,0	0,08	Песок тонко-зернистый	0,25–3,0 0,5–5,0	2,0–8,6	1,2 2,6	15–31
«	0,05–0,5	3,3	0,2	Песок мелко-зернистый	0,25–5,0 0,5–10,0	2,0–11,5	1,5 3,0	7–16
Суффозионный (первый тип)	0,05–40	23	4,5	Гравий Галька	3–110 20–110	1,9–24,3	7,0 70,0	1,5–14,0
Суффозионный (второй тип)	0,005–40	220	2,0	Гравий Песок	0,5–4,0 1,0–10,0	1,7–6,5	2,0–3,5	1,0–1,8

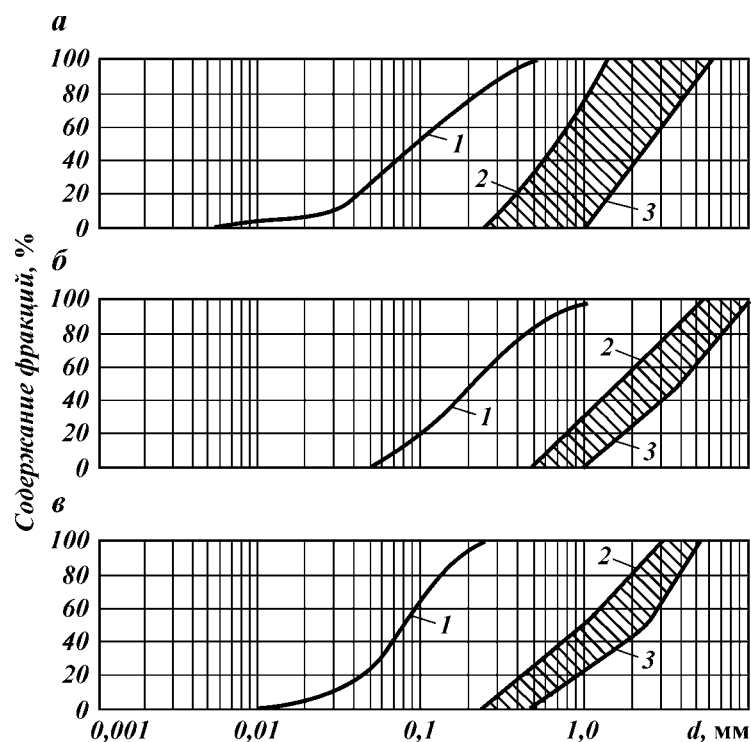


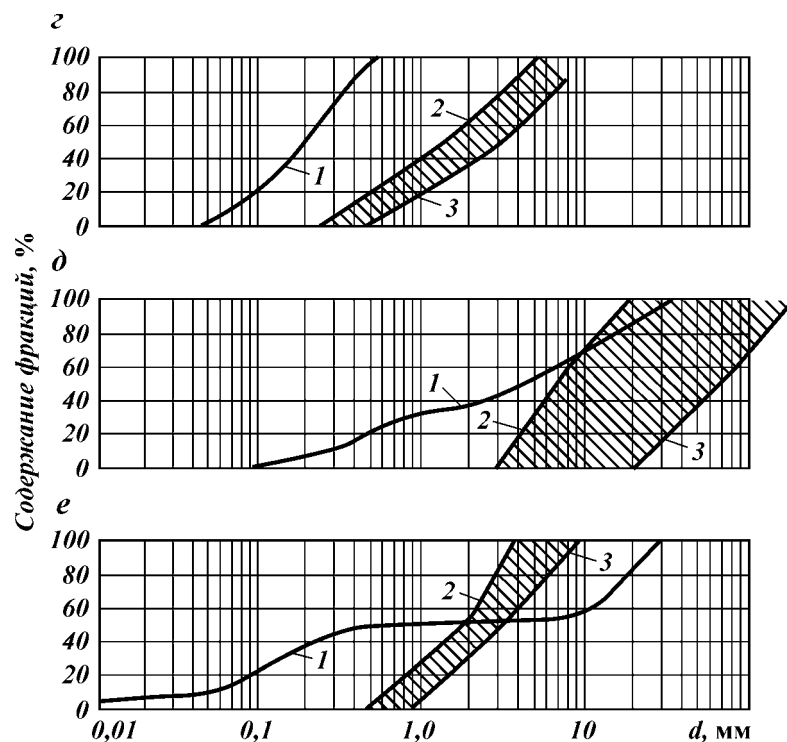
Рис. 8.6. Кривые гранулометрического состава пластового песка и рекомендуемых обсыпок:

*а-в* – типовые составы песков продуктивного пласта; *1* – кривая гранулометрического состава песка; *2, 3* – кривые минимального и максимального гранулометрического составов обсыпки

Последняя рекомендация для неоднородных песков и высоких скоростей фильтрации для центральных районов нашей страны полно обоснована А.Б. Бухваловым.

Наиболее фундаментальными в области подбора обсыпки с учетом гидродинамических факторов считаются работы В.И. Фоменко, в которых наряду со скоростью фильтрации и режимом откачки учитываются факторы физико-механического состояния песка продуктивного пласта.

В.И. Фоменко разделил породы продуктивного пласта на несущие, суффозионные первого и второго типа. Несущие породы воспринимают действие фильтрационного потока как единая статическая жесткая система и изменяют свою структуру при выносе отдельных частиц, не изменяя жесткости



скелета. В результате выноса мелких частиц в прифилтровой зоне образуется область с улучшенной проницаемостью, связанная с формированием естественного фильтра. В случае суффозионных пород вынос частиц из пласта вызывает его проседание и изменение прочности структуры скелета, причем для первого типа такое проседание незначительно и составляет 1–3 %, а для второго типа может привести к нарушению устойчивости прифилтровой зоны. Характеристики гравийной обсыпки и пород продуктивного пласта представлены в табл. 8.8 и на рис. 8.6.

В зарубежной практике разработан механизм подбора гравийной обсыпки для песков, неоднородных по фракционному составу в вертикальном разрезе. Суть этого механизма сводится к необходимости выбора гравия с учетом рекомендуемого коэффициента межслойности  $k = 6$  для интервала пласта, сложенного наиболее мелкими породами. Очевидно, что для других интервалов, как правило, наиболее обильных в отношении пластового флюида, фильтр становится переуплотненным и работает неэффективно.

Н. Стейн рекомендует для неоднородных по суффозионным свойствам пластов при выборе обсыпки учитывать силы цементации между отдельными зернами. На практике пока такая информация отсутствует и рекомендовать ее к широкому внедрению рано.

Следует отметить, что с увеличением коэффициента межслойности повышается вероятность пескования скважины. Поэтому в случаях, связанных с эксплуатацией пылеватых и тонкозернистых песков плавунного типа при высоких дебитах, когда избежать пескования сложно, не рекомендуется подбирать обсыпку с учетом формирования естественного фильтра и устойчивых арочных структур. Интересны данные компании «Шелл Оил» по относительной зависимости вероятности пескования от коэффициента межслойности, приведенные ниже.

Коэффициент межслойности $k$ .....	0–6	6–7	7–10	10–14,3	14,3–16	>16
Вероятность пескования .....	0,02	0,04	0,12	0,5	0,67	

Динамика изменения вероятности пескования с увеличением коэффициента межслойности подтверждается исследованиями и практическими результатами, в частности анализом около 200 эксплуатационных скважин в Китае [7].

### Толщина гравийного фильтра

От толщины гравийного фильтра зависит суффозионная устойчивость и удельная производительность скважины. Влияние толщины гравийного фильтра на вынос песка необходимо рассматривать в непосредственной связи с коэффициентом межслойности. При правильно подобранном коэффициенте межслойности толщина обсыпки, предотвращающей вынос песка, может быть незначительной. Если в качестве обсыпки использовать неоднородную смесь или смесь с большим коэффициентом межслойности, то ее толщина, задерживающая песок, существенно увеличивается.

С.В. Комиссаров исследовал зависимость объема вынесенного песка от толщины обсыпки для различных коэффициентов межслойности. Опыты проводились следующим образом. В металлический цилиндр диаметром 5 см и высотой 12 см загружался слой гравия и поверх него насыпался мелкозернистый песок с частицами 0,25–0,1 или 0,1–0,05 мм, либо песок естественного сложения следующего гранулометрического состава: 0,25 мм – 0,08 %; 0,25–0,05 мм – 24,4 %; 0,05–0,01 мм – 60 %; 0,01 мм – 15,6 %. Вода фильтровалась через песчаный слой при давлении 0,3–0,35 МПа. Количество песчаных частиц, проникающих через гравий при фильтрации, определялось взвешиванием (табл. 8.9).

Таблица 8.9

**Вынос (в кг) мелких песчаных частиц через слой гравия  
разной толщины на 1 м<sup>2</sup> фильтра**

Фракция песка, мм	Диаметр частиц гравия, мм								
	0,5–1,0			1–2			2–3		
	при толщине обсыпки, мм								
	15	30	50	15	30	50	15	30	50
0,25–0,1	0,01	Следы	Следы	0,22	0,15	0,01	2,0	1,5	1,5
0,1–0,05	0,02	0,015	0,013	1,0	0,4	0,29	3,7	2,8	2,3
Песок естест- венного состава	0,15	0,14	0,04	0,32	0,2	0,15	2,7	2,3	1,7

Опыты показали, что гравий размером 0,5–1 мм полностью удерживает частицы 0,1–0,25 мм при толщине слоя засыпки 3–5 мм. С увеличением коэффициента межслойности вынос песка увеличивается, однако он может стабилизироваться за счет увеличения толщины фильтра. При коэффициентах межслойности 2–10 фильтр толщиной 15 мм пропускал примерно столько же песка, как и фильтр с коэффициентом межслойности 5–20 толщиной 50 мм. Частицы диаметром 2–3 мм почти не удерживали мелкого песка, в том числе и частиц 0,25 мм при исследуемой толщине обсыпки, ограниченной 50 мм.

Р. Сеусье исследовал на модели влияние толщины гравийного фильтра на объем вынесенного песка. В процессе эксперимента толщина гравийной обсыпки изменялась от 25 до 80 мм. При размере частиц гравия не более шестикратного диаметра частиц песка увеличение толщины гравийного фильтра не влияло на объем вынесенного песка. Если размер гравия превышал шестикратный размер песчаных частиц, то при увеличении толщины гравийного фильтра количество вынесенного песка снижалось.

Эти выводы подтверждаются опытами С.В. Комиссарова. Р. Эллис отмечает, что теоретически при правильном подборе размеров гравийной обсыпки предупреждение выноса песка из коллектора в скважину обеспечивает фильтр толщиной, соответствующей трем диаметрам гравийных частиц. Т. Ландресс рекомендует принимать минимальную толщину гравийной обсыпки, равную пяти диаметрам частиц гравия. Китайский инженер Ю. Чанг проводил эксперименты по определению минимально допустимой толщины гравийной обсыпки при различных режимах эксплуатации. Полученные данные свидетельствуют о том, что толщина гравийного фильтра в 3–5 диаметров частиц не обеспечивает задержание частиц песка при высоких скоростях фильтрации. При сооружении гравийных фильтров в высокоде-

битных водозаборных скважинах минимально допустимая толщина обсыпки должна быть 10 мм.

Действующими нормативными документами регламентируется механизм подбора гравия в соответствии с коэффициентом межслойности 8–12, что не обеспечивает предотвращение пескования при малой толщине обсыпки. С.К. Абрамов рекомендует минимально допустимую толщину обсыпки для указанных коэффициентов межслойности 50 мм. И.Ф. Володько считает, что фильтр толщиной 30–35 мм устойчив к проникновению песка, но с учетом несоосности установки фильтровой колонны в скважине рекомендуемая толщина обсыпки составляет 45–50 мм. К аналогичному выводу пришел и В.М. Гаврилко.

Указанные рекомендации справедливы для однородных по мощности в отношении фракционного состава продуктивных пластов. В случае сложения пласта из чередующихся пропластков более и менее крупных частиц на некоторых интервалах фильтра коэффициент межслойности может значительно превышать рекомендуемые СНиП 8–12 и толщины обсыпки 30–50 мм недостаточно для предотвращения пескования. М.Г. Оноприенко отмечает, что надежнее принимать толщину гравийной обсыпки 150–200 мм. Однако, в некоторых случаях создание фильтров такой мощности экономически нецелесообразно, а иногда и не позволяет избежать пескования.

Автором разработана методика дифференцированного подхода к выбору толщины обсыпки исходя из неоднородности пластового песка и коэффициентов межслойности (рис. 8.7). При коэффициентах межслойности менее 6–7 минимальная толщина обсыпки должна составлять 10 мм.

С увеличением межслойного коэффициента до 10–12 толщина обсыпки должна быть не менее 50–60 мм, а до 16–18 — 250–320 мм. При коэффициентах межслойности более 18 скважина, как правило, не застрахована от пескования при любой

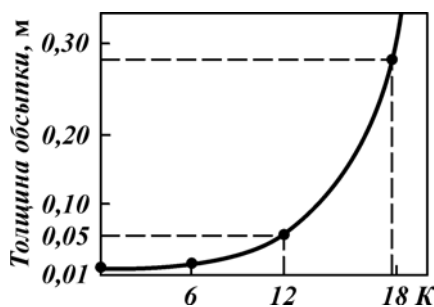


Рис. 8.7. Зависимость рекомендуемой толщины гравийной обсыпки от коэффициента межслойности

толщине фильтра и интервалы, сложенные наиболее тонкими частицами, в этом случае рекомендуется перекрывать глухой трубой. Рациональная конструкция скважины в интервале фильтра выбирается так. Определяют фракционный состав наиболее обильных по данным геофизических исследований и экспресс-опробования продуктивных интервалов. Средний диаметр частиц этих интервалов умножают на рекомендуемый коэффициент межслойности, равный 6, и получают необходимый средний диаметр гравийной смеси.

Исходя из необходимости предотвращения пескования в таких интервалах достаточная толщина обсыпки составляет 10 мм, а с учетом несоосности установки колонны — 15–20 мм. Диаметр вскрытия пласта должен на 30–40 мм превышать наружный диаметр фильтра-каркаса. При уменьшении среднего диаметра частиц с удалением от периферийных зон наиболее обильного интервала коэффициент межслойности растет и увеличивается рациональный диаметр скважины в интервале продуктивного пласта. При уменьшении среднего диаметра частиц (по сравнению с наиболее обильным интервалом) в два раза, что соответствует коэффициенту межслойности 12, рациональный диаметр скважины должен на 100–120 мм превышать диаметр фильтра-каркаса. В интервалах, сложенных частицами размером в 3 раза меньшим, чем размер частиц наиболее обильных интервалов, диаметр скважины должен превышать диаметр фильтра на 500–640 мм. Рекомендуемые диаметры скважины в интервале продуктивного пласта, исходя из неоднородности фракционного состава пород, интерпретированы заштрихованной на рис. 8.8 областью в координатах относительного диаметра частиц продуктивного интервала (отношение среднего диаметра фракции интервала  $\bar{d}_i$  к среднему диаметру фракции наиболее обильных интервалов  $\bar{d}_{\max}$ ) и диаметра пилот-скважины  $D_0$  в интервале наиболее обильных пропластков.

При средней фракции частиц пропластка менее 0,33 от диаметра частиц наиболее обильного интервала его целесообразно перекрывать глухой трубой или затампонировать с целью предотвращения пескования.

Г.П. Квашнин установил, что правильнее говорить не о толщине фильтра, а о его диаметре. Суффозии происходить не будет, если диаметр фильтра превышает диаметр зоны устойчивого равновесия. Диаметр зоны равновесия находят из уравнения равновесия частиц на стенке скважины и определяют по формуле

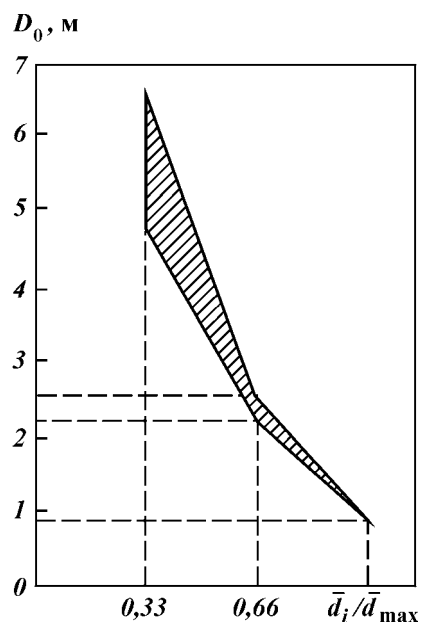


Рис. 8.8. Рекомендуемые диаметры скважины в интервале продуктивного пласта в масштабе диаметра пилот-ствола в зависимости от отношения  $d_i/d_{\max}$

$$D_p = \frac{Q \left( 1 + 2,32 \frac{d_i^2}{d_n^2} \right)}{\pi m n f v_{d_i}}, \quad (8.9)$$

где  $Q$  — расход;  $d_i$  — диаметр вымываемых частиц;  $d_n$  — гидравлический эквивалент пор скелета породы пласта;  $m$  — мощность пласта;  $n$  — активная пористость грунта;  $f$  — коэффициент трения песка;  $v_{d_i}$  — гидравлическая крупность вымываемых частиц.

Предлагается при выборе диаметра фильтра учитывать степень колюматации продуктивного пласта. Чем выше колюматация пласта, тем больше должен быть диаметр скважины. Диаметр зоны колюматации определяют по объему поглощенного при вскрытии глинистого раствора и площади фильтрации. Косвенно влияние колюматации в формуле (8.9) можно учитывать через переменную активную пористость пород прифилтровой зоны.

В неоднородных пластах меняется гидравлический эквивалент пор скелета пород грунта  $d_n$  и диаметр вымываемых частиц  $d_i$ . Расход  $Q$  по мощности изменяется от максимума в наиболее обильных интервалах до нуля в сцементированных пропластках и нижних интервалах фильтра. Зону равновесия для весьма однородных в гранулометрическом отношении пород пласта ограниченной мощности можно определять по формуле (8.9).



Для неоднородных пород рекомендуется определять диаметр зоны равновесия, а следовательно и диаметр гравийного фильтра по формуле

$$D_p \geq \frac{Q k_n k_e}{\pi m n v_p}, \quad (8.10)$$

где  $k_n$  — коэффициент, учитывающий неравномерность притока по длине фильтра;  $k_e$  — коэффициент, учитывающий силы сцепления между частицами в условиях горного давления;  $v_p$  — скорость, приводящая к суффозии.

В формуле (8.10) по сравнению с выражением (8.9) гидравлическая крупность частиц заменена на критическую скорость, приводящую к суффозии, которую определяют по формуле С.В. Избаш и Л.И. Козловой. Дело в том, что гидравлическая крупность характеризует скорость, необходимую для страгивания свободной частицы в потоке. В реальных условиях частица в грунте находится в стесненном состоянии.

Автором установлено, что основной фактор, обуславливающий суффозию — турбулизация потока в прифильтровой зоне. Автором предложено техническое решение, заключающееся в необходимости создания фильтра диаметром, превышающим диаметр зоны турбулизации потока при заданных режимах эксплуатации.

Эффективность гравийных фильтров определяется не только задержанием песчаных частиц. При увеличении диаметра скважины и толщины фильтра каверна, ранее заполненная малопроницаемым песком, засыпается высокопроницаемым гравием. Следовательно, фильтрационная поверхность скважины увеличивается, что и влияет на результирующий дебит скважины. Все исследователи рекомендуют для повышения производительности скважины увеличивать ее диаметр. Различия в рекомендациях касаются только диаметра фильтра, превышать который не целесообразно.

С.В. Комиссаров на основе анализа уравнения Щелкачева выявил теоретическую зависимость дебита скважины от толщины слоя гравия для различных коэффициентов фильтрации гравия (табл. 8.10). В расчетах принимается радиус влияния скважины 1000 м, мощность пласта 10 м, коэффициент фильтрации песка 5 м/сут, понижение 10 м.

Влияние толщины гравийного фильтра на его дебит несущественное (см. табл. 8.10). Увеличение толщины фильтра в 50 раз повышает дебит от 20 до 55 %. Проницаемость обсыпки также не приводит к существенному изменению производительности. Увеличение коэффициента фильтрации обсыпки в 10 раз приводит к росту дебита от 5 до 10 %.

Таблица 8.10

Коэффициент фильтрации гравия, м/сут	Дебит скважины (в м <sup>3</sup> /ч) при толщине слоя гравия, м							
	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5
10	358	362	370	372	392	410	420	435
20	362	380	388	391	425	455	475	505
30	366	382	392	400	435	470	495	530
50	368	384	396	410	440	485	510	550
100	370	388	400	412	455	500	530	580
Без засыпки	370	390	403	415	460	510	540	600

А.Ж. Муфтахов и В.И. Фоменко теоретическим путем установили, что с целью повышения дебита скважины нет смысла увеличивать толщину обсыпки более 20–50 см.

И.Ф. Володько построил график зависимости дебита скважины  $Q$  от ее диаметра  $D'_0$ , базирующийся на уравнении Дюпюи, при ламинарном режиме фильтрации (рис. 8.9). При ламинарной фильтрации нет смысла увеличивать диаметр скважины более 0,2–0,3 м, так как существенного прироста в дебите это не обеспечивает. Для фильтра диаметром 300 мм при понижении, равном половине столба воды в скважине, эксплуатационный дебит составит около 80 % теоретически возможного при понижении до отстойника, т.е. увеличение понижения в 2 раза позволяет повысить дебит всего на 15–20 %.

На практике зависимость производительности от толщины гравийной обсыпки и диаметра фильтра более ярко выражена. Ю. Чанг провел сопоставление удельных дебитов четырех скважин на воду одинаковой конструкции и пробуренных в идентич-

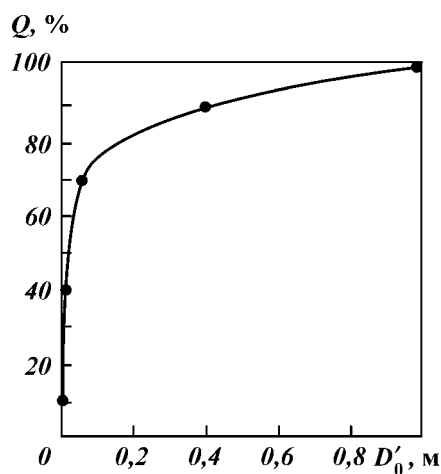


Рис. 8.9. Зависимость дебита скважины от диаметра при ламинарной фильтрации

ных условиях, но имеющих различную толщину гравийного фильтра (135, 250, 450 и 500 мм). Удельный дебит скважины, имеющей толщину гравийного фильтра 135 мм, составлял 12,5, а остальных 25 м<sup>3</sup>/ч. На основании этого был сделан вывод, что при сооружении высокодебитных скважин минимально допустимая толщина гравийного фильтра должна составлять 250 мм. Очевидно, что этот вывод был сделан применительно к конкретным горно-геологическим условиям сооружения скважины.

При малой толщине обсыпки (до 250 мм) зависимость производительности скважины от ее диаметра близка к линейной, что противоречит результатам теоретических исследований, приведенных выше. И.Ф. Володько проанализировал работу многих скважин и выявил зависимость между производительностью и ее диаметром. Рост удельного дебита с увеличением диаметра менее интенсивный, чем при линейной зависимости (табл. 8.11).

Несоответствие теоретических выводов практическим результатам относительно зависимости удельной производительности скважины от диаметра фильтра объясняется тем, что при анализе характера фильтрации в околоскважинной зоне предполагают, что на всем интервале мощности пласта поддерживается ламинарный режим притока и справедлив закон Дарси. В реальных условиях в околоскважинной зоне возникает турбулизация потока, приводящая к значительным дополнительным потерям напора, которые могут многократно превышать рассчитанные по формулам, базирующимся на законе Дарси. Например, при обо-

Таблица 8.11  
Зависимость удельного дебита скважин от диаметра фильтра

Тип пород	Диаметр фильтра, мм	Площадь поверхности фильтра, м <sup>2</sup>	Скорость входа воды в фильтр, см/с	Дебит, л/с
Палеогеновые пески Харьковского яруса	50	0,48–0,7	0,285–0,295	1,42–2,0
	100	1,26–1,58	0,27–0,29	3,4–4,6
	140–150	1,22–1,23	0,492–0,58	6,0–7,38
	200	1,85–3,98	0,154–0,26	4,9–6,15
	250	3,58	0,227	8,15
Пески Девонского возраста	89	1,2	0,135	1,62
	100	1,58	0,154	2,46
	200	0,62–1,42	0,345–0,55	3,4–4,9
	75	0,97	0,056	0,54
Пески ледникового происхождения	100	1,62	1,182	2,95
	125	1,85	0,162	2,95
	150	2,35	0,18	4,28
	200	6,74	0,087	7,7
	266	3,95	0,29	11,51
	300	18,0	0,017	8,37

рудовании водозаборных скважин Ялutorовского водозабора Тюменской области при участии автора в скважинах при заданном дебите наблюдалось понижение 25 м вместо 7 м, рассчитанных по формулам с учетом ламинарной фильтрации.

При турбулентном режиме на всем интервале фильтрации зависимость удельной производительности обратно пропорциональна диаметру фильтра. Если наблюдается ламинарная фильтрация на всем интервале водопритока, то связь между удельным дебитом и диаметром фильтра логарифмическая, т.е. незначительная. В практике мы не сталкиваемся с ламинарной или турбулентной фильтрацией в «чистом виде» на всем интервале притока. Обычно, на удаленных участках пласта наблюдается ламинарный режим фильтрации, а в околоскважинной зоне — турбулентный.

Автором установлено, что диаметр скважины с целью обеспечения максимальной производительности при минимуме затрат должен соответствовать диаметру зоны турбулизации потока при заданных режимах эксплуатации. Увеличивать диаметр более чем диаметр зоны турбулизации потока нет смысла, так как там наблюдается ламинарная фильтрация, при которой зависимость дебита от диаметра незначительная. В зоне турбулентной фильтрации увеличение диаметра особенно эффективно, так как оно приводит к интенсивному росту удельной производительности. Новый метод подтверждается многими практическими данными, в том числе и зарубежных авторов.

Так, в описанном выше примере водозаборных скважин в Китае становится очевидным, что при заданной производительности диаметр зоны турбулизации потока составил около 700 мм (удвоенная толщина обсыпки 2×250 мм плюс диаметр каркаса фильтра). Увеличение диаметра скважин до 700 мм сопровождается пропорциональным ростом дебита. Сооружение каверн диаметром более 700 мм практически не приводит к увеличению производительности.

С ухудшением качества вскрытия пласта и интенсификации кольматации диаметр скважины должен увеличиваться. Русбурмаш разработана методика определения рационального диаметра скважины исходя из принципа поддержания ламинарного режима фильтрации. Методика включает несколько этапов. На первом этапе определяют критическую скорость фильтрации в пласте естественной проницаемости, приводящую к турбулизации потока. Затем с учетом изменения естественной проницаемости при различных способах вскрытия пласта определяют действительную скорость фильтрации, приводящую к турбулизации потока в закольматированной зоне. Далее находят расстояние от скважи-

ны, на котором действительные скорости фильтрации уменьшаются до критических значений и получают рекомендуемый диаметр фильтра.

Следует отметить, что выбор диаметра фильтра, исходя из принципа поддержания ламинарного режима притока, позволяет значительно увеличить долговечность работы скважины снижением темпов кольматационных процессов.

При увеличении толщины обсыпки исходные требования к фракционному и минеральному составу гравия могут снижаться. Этот подход экономически невыгоден, так как затраты на бурение скважин большего диаметра многократно перекрывают затраты на просеивание и промывку гравия перед закачкой в скважину.

### **Качество гравия**

В отечественных исследованиях не уделялось серьезного внимания качеству гравия, используемого для фильтра. Ведущие зарубежные фирмы считают, что качество гравия и прежде всего его окатанность и минеральный состав во многом обуславливают эффективность борьбы с пескованием. С. Шрайок исследовал зависимость величины потерь напора на контакте каркаса фильтра с обсыпкой от окатанности частиц. Опыты проводились на стенде, в котором фильтр имитировали трехметровой трубой с щелевыми прорезями длиной 54 мм и шириной 6 мм. После засыпки гравия фракция 3—8 мм на высоту 1,5 м все щели фильтра оказались закупоренными. Циркуляция раствора через щели вызвала их закупорку крупной фракцией гравия. Мелкие фракции как бы цементировали поровое пространство между крупными частицами гравия, закупоривающими щели хвостовика. Давление в нагнетательной линии магистрали возрастало и вследствие ограниченной мощности насоса в модели прекращалась циркуляция. На основании полученных данных было установлено, что концентрация крупных фракций в материале обсыпки не должна превышать 1 %, а наличие в материале обсыпки мелких фракций существенно снижает продуктивность скважины.

Х. Смит провел сравнение эффективности гравийных фильтров, сложенных однородным и неоднородным по гранулометрическому составу гравием, на примере водозаборных скважин, пробуренных в штатах Арканзас и Канзас. Единственное преимущество разнозернистых обсыпок — исключение необходимости просеивания гравийного материала, привезенного с карьеров. Однако при использовании разнозернистых обсыпок

песок коллектора проникает внутрь скважины, закупоривает поры, чем значительно увеличивает сопротивление фильтра. Использование однородного гравия позволяет избежать расслоения и получить однородный по высоте фильтр. Путем сопоставления фактических данных по критерию себестоимости 1 м<sup>3</sup> воды сделаны выводы о незначительности затрат на просеивание гравия по сравнению с прибылью, которая может быть получена за счет увеличения производительности скважины при установке в ней гравийного фильтра однородного гранулометрического состава.

Р. Сеусье исследовал влияние окатанности частиц гравия на результирующую производительности скважины, которая определялась по величине падения давления в фильтре. С увеличением окатанности частиц сопротивление слагаемого ими фильтра уменьшается. Результаты экспериментов представлены ниже.

#### Перепад давления различной формы

Расход, м <sup>3</sup> /ч.....	5	10	15
Перепад давления в обсыпках из частиц, МПа:			
плохо окатанный гравий.....	1,1	1,9	2,1
окатанный гравий.....	1,05	1,3	1,4
стеклянные шарики.....	1	1	1

Потери напора в фильтре, сложенном из стеклянных шариков, принимались равными единице. При увеличении угловатости частиц потери напора в фильтре возрастают с увеличением расхода, а при дебите 15 м<sup>3</sup>/ч могут достигать 110 %. Поэтому рекомендуется использовать для обсыпки окатанный гравий. Некоторые фирмы выпускают искусственный заменитель гравия для обсыпки окатанной формы.

Китайскими специалистами установлено, что сопротивление гравийных фильтров из скатанных частиц в среднем на 8 % ниже чем у фильтров, сложенных из угловатых частиц.

Гравийный материал должен состоять из нерастворимых, кремнистых частиц. Наличие в материале обсыпки карбонатных частиц объемом более 3 % затрудняет кислотную обработку после закачки гравия, которую широко используют в практике сооружения гравийных фильтров за рубежом. При кислотной обработке карбонатные частицы растворяются, образуя пустоты и открытые каналы в обсыпке, через которые в процессе эксплуатации происходит миграция частиц коллектора. Наличие некондиционных частиц снижает проницаемость гравийной обсыпки и их максимально допустимая концентрация не должна превышать 3 %.

Ведущими зарубежными фирмами принят стандарт на качество гравийного материала, согласно которому максимально до-

пустимая концентрация мелких и крупных примесей не должна превышать 2 %, гравия некварцевого состава — не более 2 %; коэффициент формы частиц гравия — не менее 0,6.

### **Размер отверстий фильтра-каркаса**

Ранние исследования по определению рациональных размеров отверстий фильтра базировались в основном на предположении, что при соотношении размеров зерен гравия к размеру отверстий фильтра 1:2 вокруг отверстий фильтра образуется устойчивая арочная структура. Результаты этих исследований послужили базой для действующих нормативных документов, согласно которым размер отверстий фильтра принимается в 1,4–4 раза большим среднего размера частиц гравия.

Ведущие зарубежные фирмы осуществляют выбор размера отверстий фильтра исходя из других принципов. С. Шрайок отмечает, что устойчивость арочных структур вокруг отверстий возможна только при соблюдении определенных условий. Прежде всего, это добыча вязкой жидкости при малых скоростях притока из пласта и стабильных понижениях. При откачке широко используемыми насосами и эрлифтами перепад давления в системе скважина — пласт изменяется, что приводит к разрушению арочных структур. Кроме этого, входные скорости по длине фильтра распределены неравномерно и, как правило, существуют участки с высокими скоростями фильтрации, обычно приуроченными к верхним отверстиям. При высоких скоростях притока арочные структуры также теряют устойчивость.

На основании проведенных опытов были сделаны выводы о частом нарушении устойчивости арочных структур для реальных условий. Во всех случаях, когда размер частиц гравия меньше размеров отверстий фильтра, наблюдался его вынос на модели. Если зерна гравия больше, чем отверстия фильтра, то в процессе закачки гравия щели фильтра закупоривались, происходило повышение давления в нагнетательной линии магистрали. На практике повышение давления закачки приводит к поглощению жидкости-носителя, оплыванию стенок скважины, перемешиванию песка с гравием и повышению сопротивления фильтра. При закачке частиц гравия угловатой формы процесс закупорки ускорялся. С. Шрайок, используя данные опытов, сделал вывод о необходимости соответствия размеров отверстий фильтра минимальному диаметру частиц гравийной обсыпки и предпочтительном использовании скатанных частиц. Большинство зарубежных исследователей пришли к аналогичному выводу и на практике при выборе размеров щели фильтра пользуются правилом

С. Шрайока, согласно которому размер отверстий фильтра не должен превышать размера мельчайших частиц гравия, применяемого в обсыпке.

К аналогичным выводам пришел в 1946 г. Ф.С. Бояринцев — автор конструкции проволочных фильтров. Согласно его рекомендациям ширина щелей проволочного фильтра должна соответствовать 0,8–1,0 среднего диаметра гравия, используемого в качестве обсыпки. В 1988 г. Д. Тауш и С. Монроу предложили принимать размер отверстий фильтра в 2 раза меньше среднего размера частиц гравия. Такой строгий подход они объясняют тем, что даже небольшой вынос гравия при пуске насоса или эрлифта приводит к серьезным повреждениям гравийного фильтра. При выносе гравия из скважины в обсыпке образуются открытые каналы и пустоты, наличие которых вызывает массовый вынос песка из скважины.

А.Б. Бухвалов обосновал целесообразность подбора размера щели фильтра, равного размеру частиц гравия, соответствующих 70%-ному ситовому отсеvu. В процессе последних исследований ПРО «Центр-геология» было установлено, что основной структурообразующий элемент песков — частицы размером, соответствующим 70%-ному ситовому отсеvu. В этой связи, при одинаковом размере щелей фильтра и частиц после 70%-ного ситового отсева порода на контакте с фильтром будет суффозионно устойчива. Вывод об определяющем влиянии частиц после 70%-ного ситового отсева на физико-механические свойства грунтов ранее был получен В.Н. Кондратьевым.

Существенное влияние на сопротивление фильтра на контакте с породой оказывает форма отверстий. В отечественной и зарубежной практике теоретически и экспериментально обоснована целесообразность применения проволочных фильтров, образующих щель, которая расходится внутрь фильтра. Такая форма щели может быть получена при намотке на каркас проволоки трехугольного и трапециoidalного сечения. При фильтрации через щель, расширяющуюся в форме диффузора внутрь фильтра, максимум скорости потока, а следовательно и минимум статического напора наблюдается на некотором удалении от поверхности фильтрации в сторону оси скважины. Таким образом, между наружной и внутренней поверхностью обмотки создается вакуум, равный разнице статических напоров, на величину которого сопротивление такого фильтра становится меньше.

Важно, чтобы щель со стороны породы не имела формы клина, расширяющегося в сторону пласта. Такая форма щели образуется при намотке проволоки круглого сечения. При контакте с породой в процессе фильтрации порода расклинивается в отвер-



стях фильтра, многократно повышая его гидравлическое сопротивление.

Ведущие зарубежные фирмы используют в качестве каркаса гравийной обсыпки проволочные фильтры с отверстиями, расширяющимися вовнутрь в форме диффузора.

### 8.2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ СООРУЖЕНИЯ ГРАВИЙНЫХ ФИЛЬТРОВ В СКВАЖИНЕ

Рациональный способ сооружения гравийного фильтра в скважине выбирается исходя из необходимости получения обсыпки высокого качества с заданными параметрами при определенных условиях проведения работ и минимуме затрат. Разнообразие природных горно-геологических и гидрогеологических факторов, конструкций скважин, их назначения, способствовало разработке принципиально различных способов сооружения гравийных фильтров в скважине, каждый из которых имеет свои преимущества, недостатки и рациональные области применения (рис. 8.10).

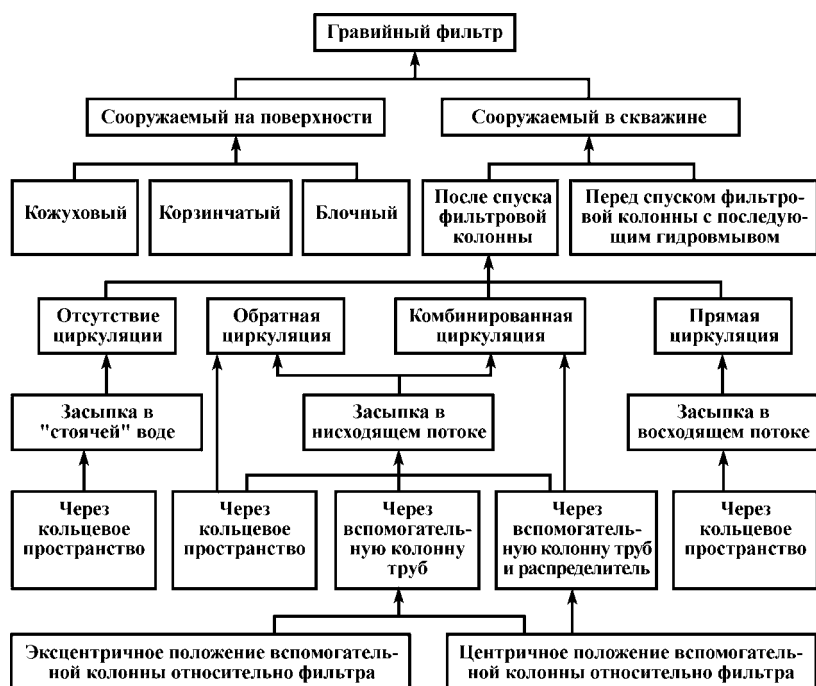


Рис. 8.10. Классификация способов сооружения гравийных фильтров

Гравийные фильтры могут сооружаться либо на поверхности перед спуском фильтровой колонны в скважину, либо в скважине после установки каркаса фильтра. К основным типам гравийных фильтров, сооружаемых на поверхности, относятся кожуховые, корзинчатые и блочные конструкции. Наиболее важным преимуществом конструкций гравийных фильтров, сооружаемых на поверхности, — возможность формирования вокруг каркаса фильтра гравийного слоя высокого качества с заданными параметрами при постоянном визуальном контроле. При этом исключается вероятность проявления таких часто встречающихся на практике осложнений, как расслоение гравия в вертикальном сечении фильтра, образование открытых каналов и пустот. Существенно уменьшается доля инородных примесей, поступающих в гравийный фильтр до освоения скважины, от объема которых зависит сопротивление гравийного слоя, а следовательно и его качество.

Наряду с очевидными преимуществами гравийных фильтров, сооружаемых на поверхности, они характеризуются и существенными общими недостатками, значительно сужающими рациональную область их применения. Установка в скважине блочных, кожуховых и корзинчатых конструкций вызывает необходимость бурения скважины большого диаметра. Диаметр бурения скважины  $D_0$  выбирают с учетом диаметра каркаса фильтра, толщины гравийного слоя и требуемого для безопасной установки зазора между фильтром и стенками скважины

$$D_0 = D_{\phi} + 2(S + \Delta S), \quad (8.11)$$

где  $D_{\phi}$  — диаметр каркаса фильтра;  $S$  — толщина гравийного слоя;  $\Delta S$  — зазор между фильтром и стенками скважины.

Рекомендуется обеспечивать зазор между стенками скважины и фильтром не менее 10 мм. Если толщину гравийного слоя принять равной 50 мм и более, то из выражения (8.11) получим, что диаметр бурения на 120–150 мм превысит диаметр каркаса фильтра. Отмеченное обстоятельство вызывает необходимость крепления скважины до кровли водоносного пласта обсадной колонной, диаметр которой, как правило, на 150–180 мм превышает диаметр фильтра. В табл. 8.12 приведены рекомендуемые диаметры вскрытия водоносного пласта и обсадных труб, закрепляющих скважину до кровли водоносного пласта для типовых диаметров каркасов фильтра при установке блочных, корзинчатых и кожуховых конструкций.

Установка в скважине блочных, корзинчатых и кожуховых фильтров (см. табл. 8.12) требует дополнительных затрат на бу-

Таблица 8.12

Диаметр каркаса фильтра $D_{\text{ф}}$ , м	Толщина гравийного слоя $S$ , м	Минимальный диаметр бурения в интервале водоносного пласта $D_0$ , м	Минимальный диаметр обсадных труб, закрепляющих скважину до кровли водоносного пласта, м	Минимальный диаметр бурения под обсадную колонну, м
0,073	50	0,214	0,245	0,320
	80	0,269	0,299	0,394
0,089	50	0,214	0,245	0,320
	80	0,295	0,324	0,394
0,108	50	0,243	0,299	0,394
	80	0,295	0,324	0,394
0,127	50	0,269	0,299	0,394
	80	0,320	0,351	0,445
0,146	50	0,269	0,299	0,394
	80	0,346	0,377	0,445
0,168	50	0,295	0,324	0,394
	80	0,394	0,426	0,490
0,219	50	0,346	0,377	0,445
	80	0,445	0,508	0,580

рение скважины и ее крепление до кровли водоносного пласта значительно большего диаметра, чем предусмотрено в типовых конструкциях гидрогеологических скважин. С увеличением глубины залегания водоносного пласта затраты на сооружение скважины перед установкой гравийных фильтров, формируемых вокруг каркасов на поверхности, резко возрастают и при определенных условиях обуславливают их экономическую непригодность. В этой связи рациональную область применения гравийных фильтров, сооружаемых на поверхности, следует ограничить скважинами большого диаметра и малой глубины. Обычно это скважины, пробуренные ударно-канатным способом глубиной до 50 м или вращательным способом с обратной промывкой глубиной до 200 м с конечным диаметром 0,346–0,445 м и более. Сложность установки сооружаемых на поверхности конструкций гравийных фильтров в скважинах, пробуренных наиболее распространенным вращательным способом с прямой промывкой, объясняется необходимостью использования при сооружении бурового и насосного оборудования повышенной мощности, которым гидрогеологическая служба практически не комплектуется.

Конструкции гравийных фильтров, сооружаемые на поверхности, отличаются по способу закрепления гравийного слоя относительно каркаса. Слой гравийных частиц в кожуховом фильтре закрепляется относительно каркаса с помощью специального кожуха. Функцию кожуха обычно выполняет сетка галунного или

квадратного плетения, обмотанная вокруг каркаса таким образом, чтобы выдержать равномерный зазор между сеткой и каркасом фильтра по высоте и радиусу. На 30–40 мм под нижними отверстиями каркаса фильтра устанавливается фланец, к которому жестко закрепляется сетка. Наружный диаметр фланца на 8–10 мм должен превышать диаметр кожухового фильтра с учетом его безопасной установки в скважине. Фланцы устанавливаются на каркасе с шагом, соответствующим ширине сетки. Заполнение кольцевого пространства между сеткой и каркасом осуществляется через верхний торец фильтра, который после уплотнения гравийного материала жестко прикрепляется к каркасу на 30–40 мм выше его верхних отверстий. Жесткое закрепление сетки на каркасе может осуществляться хомутами. Однако при таком закреплении сложнее сохранить целостность фильтра в процессе его установки в скважину.

Кожуховые фильтры с предохранительной сеткой широко использовались в Кировском СУ НПО Спецпромстрой и Союзгипроводхозе. Недостатки таких фильтров — их повышенное гидравлическое сопротивление, обусловленное сеткой. Кроме этого, в процессе эксплуатации такие фильтры склонны к быстрому зарастанию из-за ускоренного осаждения железа, содержащегося в подземных водах, на поверхности латунных сеток вследствие электрохимической реакции. В процессе спуска кожуховые фильтры могут деформироваться, что приводит к образованию неравномерного по толщине гравийного слоя, а иногда и к формированию открытых каналов и пустот, оголению некоторых отверстий каркаса, их непосредственному контакту с песком водоносного пласта, и как следствие — к пескованию скважины в процессе эксплуатации.

В корзинчатых фильтрах гравийный слой удерживается около отверстий каркаса под влиянием сил тяжести. У каждого ряда отверстий каркаса устанавливаются специальные корзинки, которые жестко крепятся к каркасу ниже отверстий и имеют открытый торец выше отверстий. На поверхности через открытый торец в корзинки засыпают гравий, который под действием сил тяжести удерживается в процессе спуска фильтровой колонны. Корзинчатые фильтры, как правило, имеют сложную и ненадежную конструкцию, которая при спуске фильтра разрушается, что приводит к высыпанию части гравия из корзинок, неравномерному экранированию каркаса фильтра гравием относительно песка водоносного пласта. Все это свидетельствует о неудовлетворительном качестве фильтра. Корзинчатые конструкции вследствие отмеченных недостатков практически не нашли применения в практике.

В блочных конструкциях гравийных фильтров предусматривается закрепление гравийного слоя относительно каркаса и частиц друг с другом с помощью различных клеев. Блочные конструкции чаще применяются в практике, чем кожуховые и корзинчатые. Гравийный материал склеивают на поверхности в кольцевые блоки, которые затем надевают на каркас и жестко прикрепляют к нему с помощью клея или фланцев. Основное требование к блочным фильтрам — надежность применяемых клеев, обуславливающих целостность фильтрационной поверхности и эффективность эксплуатации в целом.

В качестве материала, скрепляющего зерна гравия, используют обычно клеи типа БФ и эпоксидные смолы. Несмотря на обилие клеев, пока не существует рецептуры, обеспечивающей гарантированное сохранение фильтрационной поверхности в процессе транспортировки к месту работ и спуска в скважину. Блочные фильтры боятся ударных нагрузок, которые вызывают разрушение структуры блоков. Следовательно, при использовании блочных гравийных фильтров необходимо предъявлять специальные требования к процессу транспортировки блоков и спуска фильтров, что значительно удорожает работы.

Кроме этого, блочные фильтры имеют меньшую проницаемость и большее гидравлическое сопротивление, чем просто слой гравия данной толщины определенного гранулометрического состава. Это объясняется тем, что часть пор заполняется клеем, формируются тупиковые поры. Эффективная пористость гравийного слоя уменьшается за счет либо полного перекрытия целого ряда фильтрационных каналов клеем, либо их сужения. Эксплуатационные характеристики такого фильтра значительно ниже возможных значений даже при условии сохранения целостности фильтрационного слоя в процессе транспортировки и спуска. Очевидно, что при формировании блочных фильтров гранулометрический состав гравия должен выбираться по методике, отличной от традиционного подхода к подбору гравия. Коэффициент межслойности таких конструкций должен превышать рекомендуемые коэффициенты межслойности для гравийных фильтров. К сожалению, научно обоснованных рекомендаций по этому вопросу нет.

В скважине гравийные фильтры могут сооружаться либо до, либо после установки фильтровой колонны. Метод гидровмыва был разработан в США в 50-х гг. нашего столетия. В нашей стране большой вклад в разработку и рекламу этого способа сооружения гравийного фильтра внес И.А. Сергиенко. После крепления скважины водоносный пласт вскрывается. Проводят геофизические исследования. На основании анализа результатов

определяют интервал установки фильтра, который при необходимости может быть расширен до нужного диаметра расширителем.

В интервал водоносного пласта подают гравий. Последний может подаваться с поверхности или через ствол скважины, или через вспомогательную колонну, спущенную внутрь скважины до забоя и представленную, как правило, бурильными трубами. После засыпки в скважину расчетного объема гравия начинают спуск фильтровой колонны. Для этого в башмаке фильтра монтируют обратный клапан с внутренним переходником на бурильные трубы. Бурильные трубы на поверхности соединяются с башмаком фильтра. Спуск фильтровой колонны осуществляют с помощью бурильных труб. При достижении башмаком фильтра уровня намывного в скважину гравия, в бурильные трубы на поверхности с помощью бурового насоса подают промывочную жидкость, которая через обратный клапан в башмаке фильтровой колонны поступает в скважину. Таким образом, в скважине создают прямую циркуляцию. Струя жидкости при выходе из отверстия башмака разуплотняет гравийный материал, что способствует углублению фильтровой колонны, или ее гидровмыву в гравий.

Рекомендуется в процессе вмыва колонны обеспечивать такие расходы промывочной жидкости, которые приводят гравийный материал в состояние кипящего слоя, широко известного в химической технологии. При создании кипящего гравийного слоя фильтровая колонна быстро погружается в скважину без нарушения фильтрационного покрытия фильтра.

Следует заметить, что согласно теории кипящего и фонтанирующего слоев, формирование рекомендуемой структуры сложения гравийных частиц происходит в три этапа: фонтанирующий слой, кипящий слой и поршневой режим. Переход от одного этапа к другому происходит при увеличении скоростей восходящего потока. Если принять во внимание, что скорости восходящего потока в скважине в интервале гидровмыва существенно изменяются вследствие различных диаметров скважины в интервале отстойника, водоносного пласта и обсадной колонны, кавернообразования, то можно предположить, что по высоте фильтра будут наблюдаться фонтанирующий и кипящий слои и поршневой режим.

Фонтанирующий слой возникает при относительно малых скоростях восходящего потока, которые имеют место в расширенном и наиболее обводненном интервале водоносного пласта. Фонтанирующий слой представляет собой отдельные вертикальные каналы, окруженные относительно равномерным разуплот-

ненным слоем гравийных частиц. Промывочная жидкость в интервале фонтанирующего слоя поднимается только по открытым каналам и пустотам, а в зоне гравийных частиц восходящая фильтрация отсутствует. Часть гравийных частиц из открытых каналов выносятся из фонтанирующего слоя.

Кипящий слой возникает при больших скоростях восходящего потока, чем фонтанирующий слой. Кипящий слой формируется обычно в интервале обсадной колонны и водоносного пласта, не подлежащего расширению и представляет собой сочетание большого числа пустот, окруженных разуплотненным гравийным материалом. В процессе формирования пустот часть гравийных частиц из кипящего слоя выносятся.

Поршневой режим возникает при больших скоростях движения потока промывочной жидкости, недостаточных для выноса всего гравия из скважины. При таком режиме нарушается сплошность гравийного фильтра в вертикальной плоскости, образуются большие пустоты, захватывающие все поперечное сечение кольцевого пространства скважины. Поршневой режим возникает в наиболее суженных участках скважины.

Структура гравийного фильтра после гидровыва колонны как в интервале кипящего и фонтанирующего слоев, поршневого режима не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к компактности и равномерности укладки гравия вокруг каркаса из-за обилия открытых каналов и пустот. При эксплуатации фильтра в начальный момент пустоты и открытые каналы заполняются песком водоносного пласта и скважина пескует. В целях устранения пустот и открытых каналов и придания гравийному фильтру свойств, обеспечивающих его пригодность к эксплуатации, после гидровыва и перед откачкой следует принудительно уплотнить гравий. Уплотнение можно осуществлять передачей на фильтр вибрационных нагрузок. Метод гидровыва фильтровой колонны в предварительно доставленный на забой гравий используется преимущественно для оборудования геотехнологических скважин.

В практике часто применяют методы сооружения гравийных фильтров в скважине после установки фильтровой колонны. Эти фильтры имеют высокую водозахватную поверхность при относительно малых диаметрах бурения, а при рациональной технологии доставки гравия в интервал формирования обсыпки — и высокое качество, обеспечиваемое равномерной, компактной укладкой гравийных зерен вокруг каркаса, минимизацией попадания в фильтр инородных примесей.

В некоторых случаях при выборе технологии сооружения гравийного фильтра ориентируются на максимально возможную

простоту проведения технологических операций. С этим связано распространение способа засыпки гравия при отсутствии циркуляции в скважине. Гравий подается вручную в кольцевое пространство, вследствие чего в скважину попадает большое количество инородных примесей, значительно ухудшающих фильтрационные характеристики гравийного фильтра.

Гравийный материал, засыпаемый в скважину, часто не достигает зоны установки фильтра из-за пробкообразования. Поэтому в зоне фильтра образуются открытые каналы и пустоты, наличие которых способствует повышенному выносу песка из скважины в процессе эксплуатации. Кроме того, вследствие различной гидравлической крупности гравия частицы различных размеров и формы имеют различные скорости свободного осаждения, что при ручной подаче гравия в скважину приводит к сильному расслоению фильтра. Недостатки технологии засыпки гравия при отсутствии циркуляции свидетельствуют о нецелесообразности применения данного способа при сооружении гравийных фильтров в скважинах глубиной более 30 м.

В целях предупреждения попадания в зону фильтра некondиционных примесей была разработана технология засыпки гравия в восходящем потоке жидкости. Значительный вклад в разработку этой технологии в нашей стране внесли работы М.Г. Оноприенко. При определенных скоростях восходящего потока в кольцевом пространстве в зону фильтра осаждаются частицы расчетного размера, а частицы меньшего диаметра либо застревают, либо удаляются из скважины.

Как показала практика, при засыпке в восходящем потоке сложно обеспечить надежную доставку гравия в зону фильтра. Гравийные частицы застревают на направляющих фонарях, местах перехода на другой диаметр бурения, стенках скважины и фильтра, образуя пробки, которые препятствуют равномерному осаждению частиц в кольцевом пространстве, что значительно усложняет дальнейшее проведение работ. Гравийные пробки не разрушаются в ламинарном восходящем потоке, возникающем при скоростях не более 0,15 м/с. Такие пробки образуют устойчивые структуры, ликвидация которых требует дополнительных затрат времени и средств.

Засыпка гравия в восходящем потоке — процесс длительный и при оборудовании фильтра в неустойчивых коллекторах увеличивается возможность обрушения стенок скважины, что приводит к перемешиванию частиц песка и гравия, а также резкому снижению проницаемости гравийного фильтра. Большие затраты времени на транспортировку гравия в зону фильтра вызывают сильное расслоение частиц в процессе засыпки, что приводит к



образованию слоистого гравийного фильтра, часть которого в процессе эксплуатации работает неэффективно.

Теоретические исследования, проведенные автором, показали, что предупредить пробкообразование и расслоение гравия в процессе закачки в восходящем потоке можно при использовании частиц, имеющих форму, близкую к сферичной (коэффициент сферичности более 0,76). Отсутствие хорошо окатанного однородного гравия на практике ограничивает использование технологии засыпки в восходящем потоке.

Закачка гравия в нисходящем потоке через кольцевое пространство позволяет уменьшить его расслоение за счет снижения времени транспортировки в зону фильтра по сравнению со способом засыпки в восходящем потоке. Однако при установке фильтра на 50 м и более, расслоение проявляется в значительной степени. Это связано со сложностью обеспечения высоких скоростей нисходящего потока в кольцевом пространстве (обычно 0,1–0,15 м/с) из-за отсутствия высокопроизводительного насосного оборудования.

Как показали опыты и теоретические исследования, частицы гравия неправильной формы стремятся двигаться в пристенной области, а в некоторых случаях прижимаются к стенкам скважины и эксплуатационной колонны, что способствует пробкообразованию. При ликвидации гравийных пробок необходимо обеспечить пульсирующую подачу жидкости в скважину, а это приводит к обрушению стенок скважины в процессе закачки. Кроме указанных недостатков, при закачке гравия в нисходящем потоке через кольцевое пространство с целью исключения попадания в зону фильтра инородных примесей следует обеспечить тщательную очистку стенок скважины перед закачкой.

Способ сооружения гравийных фильтров при транспортировке смеси через кольцевое пространство скважины от устья к забою в нисходящем потоке широко используется при оборудовании нефтяных и газовых скважин, склонных к пескованию. В отличие от гидрогеологических и водозаборных скважин, оборудуемых по данной технологии, в газовой и нефтяной отрасли гравийную смесь в кольцевое пространство скважины подают не вручную, а закачивают под давлением высокопроизводительным насосным оборудованием, как правило, несколькими спаренными цементировочными агрегатами. За счет большой подачи насосного оборудования обеспечиваются высокие скорости нисходящего потока гравийной смеси в кольцевом пространстве скважины, обуславливающие турбулентный режим движения и предупреждение пробкообразования.

Высокие скорости движения гравийной смеси приводят к

возникновению больших гидравлических потерь и как следствие — к большим давлениям закачки и интенсификации поглощения. При высоких скоростях движения смеси увеличивается объем попадаемых в интервал формирования фильтра инородных примесей, значительно ухудшающих его фильтрационные характеристики.

Следует отметить, что применение способов сооружения гравийных фильтров при транспортировке смеси через кольцевое пространство скважины значительно осложняет, а иногда и исключает возможность установки каркасов фильтра впотай. При оборудовании глубоких скважин это приводит к значительному удорожанию работ за счет необходимости вывода фильтровой колонны к устью.

Способы сооружения гравийного фильтра при отсутствии циркуляции в восходящем и нисходящем потоках через кольцевое пространство не обеспечивают надежной подачи гравия в зону фильтра при глубине гидрогеологических скважин более 50 м. В некоторых производственных организациях используют способ закачки гравия через вспомогательную колонну труб. При этом в кольцевое пространство скважины до забоя спускают колонну бурильных или насосно-компрессорных труб, через которые гравий подается в зону фильтра. Скорости движения гравийной смеси в трубах при закачке должны превышать 3 м/с во избежание появления гравийных пробок, возникающих в результате ламинарного режима. Благодаря высоким скоростям движения гравийной смеси расслоения в процессе закачки практически не наблюдается. Закачка гравия через вспомогательную колонну труб позволяет значительно упростить механизацию подачи гравия в скважину на поверхности. Для подачи гравия в струю жидкости используют обычные гидравлические смесители эжекторного типа.

Основной недостаток закачки через вспомогательную колонну труб — неравномерное осаждение части гравия вокруг поверхности фильтра-каркаса. Часть отверстий фильтра остается непокрытой гравием и контактирует непосредственно с песком коллектора, что приводит к длительному пескованию скважины. Увеличение диаметра водоприемной каверны по отношению к диаметру каркаса фильтра и центрированная установка фильтровой и эксплуатационной колонн в скважине не позволяют избежать неравномерного осаждения гравия вокруг каркаса фильтра, что делает данную технологию неэффективной при любых условиях проведения работ.

С целью обеспечения надежной доставки гравия в зону продуктивного пласта и его равномерной укладки вокруг каркаса

Таблица 8.13

Способ сооружения гравийного фильтра	Основные преимущества	Основные недостатки	Рациональные области применения	Примечание
Гидропромыв фильтровой колонны в предварительно закачанный на забой гравий	Упрощение технологического процесса доставки гравия на забой	Формирование в гравийном слое большого числа пустот и открытых каналов, сложность центрированной установки фильтровой колонны, возможность нарушения фильтрационной поверхности каркаса фильтра при гидровыве, необходимость использования насосного оборудования повышенной мощности при расширении скважины в интервале водоносного пласта. Сложность установки фильтровой колонны впотай	В скважинах без расширения в интервале водоносного пласта глубиной, как правило, не более 100 м. Оборудование скважин с одной секцией фильтровой колонны длиной не более 10–15 м при использовании в качестве каркаса перфорированной трубы или проволочного фильтра с усиленным креплением проволоки. Фильтровая колонна с выводом на поверхность	Применение способа может быть рекомендовано только при обязательном проведении работ по принудительному уплотнению гравийного фильтра перед откачкой
Сооружение гравийного фильтра при транспортировке гравия в интервал водоносного пласта через кольцевое пространство при отсутствии циркуляции	Упрощение технологического процесса сооружения гравийного фильтра	Сложность обеспечения надежной доставки гравия в интервал формирования обсыпки, рыхлое сложение частиц гравия в фильтре, повышенная вероятность возникновения в гравийном слое открытых каналов и пустот и пескования. Невозможность оборудования	Одноколонные конструкции скважин с большим кольцевым зазором между фильтровой и обсадной колоннами глубиной не более 30 м. Преимущественно скважины, пробуренные ударно-канатным способом. Сооружение многослойных гравийных филь-	Целесообразно перед откачкой проведение работ по принудительному уплотнению гравийного фильтра с целью повышения его качества

Продолжение табл. 8.13

Способ сооружения гравийного фильтра	Основные преимущества	Основные недостатки	Рациональные области применения	Примечание
Сооружение гравийного фильтра при транспортировке гравия в интервал водоносного пласта через кольцевое пространство в восходящем потоке	Простота проведения технологических операций в скважинах, пробуренных вращательным способом с прямой промывкой, заниженные требования к качеству гравийного материала с учетом его фракционирования в скважине в процессе засыпки	Сложность обеспечения надежной доставки гравия в интервал формирования обсыпки. Возникновение в гравийном слое большого числа открытых каналов и пустот, повышенная вероятность пескования скважины, невозможность оборудования гравийным фильтром нескольких интервалов водоносного пласта или нескольких водоносных пластов. Очень сильное расслоение гравия, особенно при ручной подаче в кольцевое пространство скважины	ров. Фильтровая колонна с выводом на поверхность. Односекционные конструкции фильтров  В скважинах одноклонной конструкции глубиной, как правило, не более 50 м и пробуренных вращательным способом с прямой промывкой, при невозможности фракционирования гравийной смеси плохого качества на поверхности, односекционные конструкции фильтров, окатанный гравий	Применение способа может быть рекомендовано только при обязательном проведении работ по принудительному уплотнению гравийного фильтра перед откачкой

<p>Сооружение гравийного фильтра при транспортировке гравия в интервал водоносного пласта через кольцевое пространство в нисходящем потоке</p>	<p>Простота выполнения технологических операций в скважинах, пробуренных вращательным способом с обратной промывкой и гидротранспортом керна</p>	<p>Сложность обеспечения надежной доставки гравия в интервал формирования обсыпки при малых скоростях нисходящего потока, сложность сохранения герметичности обсадных труб, особенно при больших глубинах и диаметрах скважин. Попадание в гравийном слое большого объема инородных примесей. Невозможность оборудования гравийными фильтрами нескольких интервалов водоносного пласта или нескольких водоносных пластов. Сложность установки фильтровой колонны впотай. Расслоение при больших глубинах скважины</p>	<p>Скважины, как правило, глубиной до 50 м при малых скоростях нисходящего потока и скважины глубиной до 200 м при больших скоростях нисходящего потока, пробуренные с обратной промывкой или гидротранспортом керна. Скважины, оборудованные фильтровой колонной, выведенной на поверхность</p>	<p>Перед закачкой скважину необходимо промыть при расходе, превышающем расход закачки гравийной смеси</p>
<p>Сооружение гравийного фильтра при транспортировке гравия в интервал водоносного пласта через вспомогательную колонну труб, опущенную в кольцевое пространство скважины</p>	<p>Относительная простота выполнения технологических операций в скважинах, пробуренных с промывкой</p>	<p>Невозможность создания равномерной обсыпки со всех сторон каркаса фильтра, обрушение стенок скважины в интервале водоносного пласта, перемешивание песка с гравием, снижение качества фильтра</p>	<p>Закачка гравия в воронку бесфильтровой скважины</p>	<p>После намыва фильтра необходимо принудительно уплотнить гравий, выполнение с целью предотвращения обрушения стенок скважины целесообразно вести при больших репрессиях на пласт, создаваемых подливом воды в кольцевое пространство скважины или другими способами</p>

Продолжение табл. 8.13

Способ сооружения гравийного фильтра	Основные преимущества	Основные недостатки	Рациональные области применения	Примечание
Сооружение гравийного фильтра в скважине при транспортировке смеси при комбинированной циркуляции	Получение гравийного фильтра высокого качества при любых горно-геологических условиях проведения работ	Необходимость использования специального скважинного и поверхностного оборудования	Скважины глубиной более 50 м и другие условия, при которых получение гравийного фильтра удовлетворительного качества обычными методами затруднительно	При использовании фильтров, сооружаемых поверхности, необходимо соблюдать дополнительные требования к транспортировке и установке фильтров, обеспечивающие сохранность фильтрационного слоя
Сооружение гравийного фильтра блочного, корзинчатого и кожухового типа на поверхности с последующим их спуском в скважину	Получение фильтра высокого качества	Сложность сохранения фильтрационного слоя фильтра в процессе установки в скважину, малая водозахватная поверхность фильтра, необходимость увеличения диаметра бурения и крепления скважины	Скважины большого диаметра глубиной обычно до 50–100 м	

фильтра была разработана технология засыпки при комбинированной циркуляции, согласно которой гравий подается к зоне установки фильтра по колонне бурильных труб, спущенных внутрь эксплуатационной колонны. Непосредственно над фильтром гравийная смесь через распределительный узел подается в кольцевое пространство скважины и частицы гравия равномерно укладываются вокруг каркаса.

Освобожденная жидкость-носитель проходит через отверстия фильтра и по водоподъемной колонне, через специальные отверстия распределительного узла и кольцевое пространство скважины в восходящем потоке поднимается к устью. Сооружение гравийных фильтров методом комбинированной циркуляции обеспечивает наиболее качественное формирование гравийного слоя, хотя и требует применения специальных технических средств. Необходимо отметить, что практически все ведущие зарубежные фирмы используют эту технологию для оборудования гидрогеологических, водозаборных, геотехнологических, нефтяных и газовых скважин.

Первые разработки и внедрение в этом направлении в нашей стране осуществили специалисты ПСО «Востокбурвод» Г.П. Квашнин, А.И. Деревянных и др. Эта технология все шире начинает использоваться при оборудовании наиболее сложных объектов в геологической, нефтяной, газовой и строительной отраслях. Дальнейшее повышение качества сооружения скважин в условиях пескопроявления связано с широким внедрением технологии сооружения гравийных фильтров при комбинированной циркуляции, поэтому эту технологию необходимо детально рассмотреть. В табл. 8.13 представлены основные преимущества, недостатки и рациональные области применения различных способов сооружения гравийных фильтров.

### **8.3. ТЕХНОЛОГИЯ НАМЫВА ГРАВИЙНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ**

#### **8.3.1. ПРОБКООБРАЗОВАНИЕ**

Основной недостаток наиболее широко применяемых в практике технологий доставки гравия в интервал формирования обсыпки через кольцевое пространство скважины и вспомогательную колонну труб — пробкообразование. Образование гравийной пробки выше интервала сооружения фильтра приводит сначала к ограничению, а затем и прекращению поступления частиц в зону

продуктивного пласта. При зависании гравия выше продуктивного пласта каркас фильтра непосредственно контактирует с песком, что обуславливает аварийное состояние скважины. Ликвидация пробок требует значительных затрат времени и средств, а в некоторых случаях приводит к необходимости переоборудования скважины.

Целесообразно в процессе сооружения гравийного фильтра ориентироваться на технологию, обеспечивающую предупреждение пробкообразования, а не на планирование дополнительных мероприятий по ликвидации пробок. Глубокие скважины практически не оборудуются гравийными фильтрами. Имеется единственный опыт сооружения гравийных фильтров в глубоких скважинах, что свидетельствует о непосредственной связи механизма пробкообразования не только с глубиной скважины, но и с рядом других факторов, влияние которых на процесс транспортировки гравия в зону фильтра пока не определено.

В отечественной и зарубежной литературе нет работ, специально посвященных процессам образования гравийных пробок в вертикальных потоках жидкости, что вызывает необходимость в проведении анализа имеющихся разработок в смежных областях знания. Очевидно, что процесс пробкообразования определяется закономерностями перемещения твердых частиц в потоке жидкости, которые рассматриваются в теории промывки скважин, гидравлического и пневматического транспорта, обогащения и гидравлической классификации материалов в потоках, гидравлики движения наносов в открытых руслах, теории гидродинамики, массопередачи, а также псевдооживления и теории фонтанирующего слоя.

По мнению автора, процесс образования гравийных пробок может протекать двумя путями. Первый заключается в формировании гравийной пробки в некотором сечении кольцевого пространства скважины, в котором концентрация частиц гравия со временем увеличивается. Формирование пробки происходит в три этапа (рис. 8.11).

На первом этапе на некотором участке АВСД потока происходит зависание мелкой фракции гравия, а частицы больших размеров, проходя сквозь слой мелких частиц, свободно осаждаются в зоне фильтра (см. рис. 8.11, *а*). На втором этапе число зависших в зоне АВСД мелких частиц увеличивается, достигая критических концентраций, когда сначала затрудняется, а затем и прекращается миграция сквозь слой мелких частиц крупных фракций гравия (см. рис. 8.11, *б*). На последнем этапе формирования пробки весь закачанный в скважину гравий не поступает в зону фильтра, а зависает над участком АВСД (см. рис. 8.11, *в*).



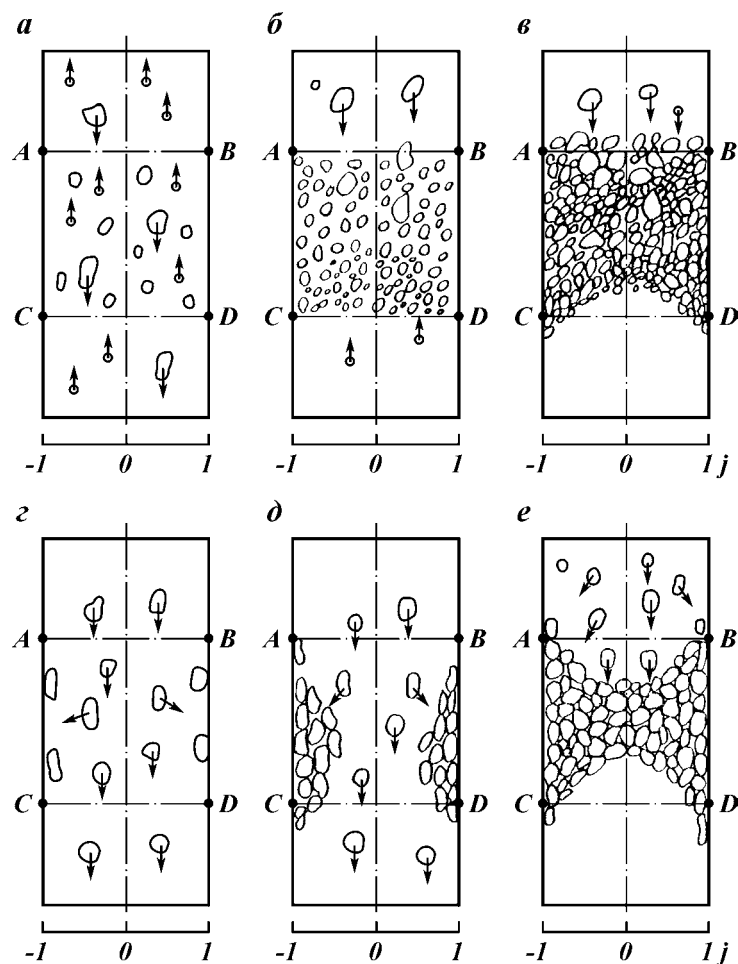


Рис. 8.11. Формирование гравийной пробки

Очевидно, что первый вариант формирования гравийной пробки носит узкий характер, так как может объяснить пробкообразование только в восходящем потоке жидкости. Поэтому наиболее справедливым следует считать второй вариант, заключающийся в предположении о формировании гравийной пробки от границ потока к его центру (см. рис. 8.11, г, д, е). В начальный период закачки гравия некоторые частицы под влиянием ряда причин стремятся переместиться от центра к границам потока,

где скорость движения жидкости близка к нулю и частицы налипают или застревают на поверхности обсадных или фильтровых труб (см. рис. 8.11, *г*).

На втором этапе формирования пробки (см. рис. 8.11, *д*) частицы гравия прижимаются не к стенкам труб, а к уже зависшему на них гравийному материалу. Со временем толщина налипшего слоя увеличивается и достигает критических значений, когда закачиваемый в скважину гравий застревает над налипшим слоем и не поступает в зону фильтра (см. рис. 8.11, *е*).

Механизм формирования гравийной пробки по первому варианту (см. рис. 8.11, *а, б, в*) просто объясняется с позиций гидравлики. Второй вариант, предполагающий формирование гравийной пробки за счет перемещения частиц от центра к границам потока, позволяет объяснить пробкообразование в потоках любого направления и поэтому представляет наибольший интерес. Прижатие и налипание частиц на стенки труб и скважины будет наблюдаться при условии, если суммарное воздействие активных сил, приложенных к частице, сместит ее от центра к границам потока. Рассмотрим теоретические обоснования исследований механизма перемещения частиц в направлении, перпендикулярном направлению потока, предложенные различными исследователями.

В теории промывки скважины отмечается, что образование сальников в кольцевом пространстве – явление широко распространенное. Г. Цайдлер, проводивший исследования на специальном стенде, свидетельствует, что некоторые частицы налипают на стенки скважины и не выносятся на поверхность даже при форсированных режимах промывки. Таким образом, ученый доказал, что на вынос частиц из скважины влияет не только величина скорости потока, но и другие факторы.

А.К. Козодой и другие исследователи считают, что на частицу шлама при промывке действуют три силы: вес, сила Архимеда и сила сопротивления. Очевидно, что все эти силы направлены по оси вертикального потока и не могут вызвать перемещение в перпендикулярной плоскости. Поэтому предложенное теоретическое объяснение перемещения частиц в потоке не объясняет пробко- и сальникообразование.

В.Г. Беликов объясняет перемещение частиц в горизонтальной плоскости влиянием силы Жуковского, возникающей за счет различной скорости обтекания по противоположным от вертикальной оси симметрии сторонам частицы из-за наличия градиента скорости по сечению потока. Скорость потока увеличивается от границ к ядру, принимая максимальные значения в центре симметрии потока, и сила Жуковского при любом положении

частицы в потоке пытается сместить ее в центр, где величина действующей горизонтальной силы снижается до нуля. Следовательно, предложенная теория не только не объясняет процесса налипания частиц на стенки потока, а скорей наоборот, доказывает его невозможность, чем противоречит многочисленным практическим данным.

В.Ф. Роджерс определяет механизм перемещения частиц в потоке либо законом Стокса, либо законом Риттингера (в зависимости от режима движения), которые не позволяют оценить перемещение частиц в плоскости, перпендикулярной направлению вертикального потока.

Специалистами по гидро- и пневмотранспорту механизм движения частиц рассматривался в основном применительно к горизонтальным потокам. В.М. Карасик считает, что на частицу в потоке действуют подъемная сила Жуковского; подъемная сила, вызванная турбулентной пульсацией, пульсация давления, сила веса, сила лобового давления, сила трения при обтекании жидкостью частицы. Из вышеперечисленных сил применительно к вертикальному потоку жидкости горизонтальное смещение может вызвать только сила, вызванная турбулентной пульсацией. Однако величина и направление турбулентных пульсаций постоянно хаотически изменяются и поэтому, если в некоторый момент времени частица за счет одной турбулентной пульсации перемещается к границе потока, то под действием другой, имеющей противоположное направление — переместится наоборот к центру потока. Кроме того, установлено, что в потоке преобладают вихри, закручивающиеся от границ к центру потока и, следовательно, вызывающие преимущественное перемещение частиц от границ потока к его центру.

А.Е. Смолдырев считает, что на частицу в потоке действуют четыре силы, а именно: сила тяжести без учета Архимедовой силы; подъемная сила Жуковского; сила гидродинамического давления и сила молекулярного взаимодействия. Очевидно, что действие вышеперечисленных сил применительно к вертикальному потоку не может объяснить пробкообразования.

В.И. Муштаев и другие авторы, рассматривая механизм движения частиц в закрученном потоке газа, выделяют следующие действующие на частицу силы: центробежная; гидродинамического сопротивления; тяжести; переносная Кориолисова; подъемная Жуковского; подъемная Архимедова. При взаимодействии частиц со стенками потока и другими частицами добавляются силы: трения качения; удара частицы о стенку; удара частицы о другую частицу. Горизонтальное смещение частицы к границам потока можно объяснить либо центробежной силой, либо силой

удара частицы о другую частицу. В процессе доставки гравия в скважину поток гравийной смеси не закручивается и центробежная сила равна нулю. Закачку осуществляют при концентрации гравия в потоке менее 15 %, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия между частицами. В связи с этим, ни центробежная сила, ни сила взаимодействия частиц друг с другом не позволяют описать механизм пробкообразования.

В теории гидравлической классификации движение частиц в потоке рассматривалось многими специалистами. Б.В. Кизевальтер выделяет следующие действующие на частицу силы: тяжести; Архимеда; сопротивления для равномерного движения частицы; дополнительная составляющая сопротивления, вызванная ускоренным движением частицы в потоке. Ни одна из четырех сил не может способствовать смещению частиц к границам потока.

Г.К. Смышляев и Г.Д. Краснов учитывают только силы веса, сопротивления и гидравлического давления, что также явно не достаточно для объяснения механизма налипания частиц на стенки скважины и труб.

В теории движения наносов в открытых руслах рассматривается механизм взвешивания частиц под действием подъемных сил Жуковского и турбулентной пульсации. Теория псевдооживления и фонтанирующего слоя рассматривает стесненное движение частиц, учитывающее силу тяжести, гидродинамическое давление и влияние частиц друг на друга в зависимости от их концентрации.

К. Матур отмечает, что при обтекании частицы возникает отрыв потока, который может оказать существенное влияние на перемещение частицы. Однако такое утверждение противоречит данным, полученным П. Чженом. Он доказал, что отрыв потока может быть ликвидирован за счет вращения частицы. Аналогичный вывод ранее сделал Прандтль. Отрыв потока наблюдается за жестко закрепленной в потоке частицей, что соответствует методике эксперимента. При возможности свободного перемещения частицы она вращается, что способствует ликвидации отрывного течения. Устранение отрыва потока за счет вращения частицы вытекает из энергетической теории гидротранспорта, согласно которой при движении частицы в потоке потери энергии в системе жидкость — твердое тело стремятся к минимуму. При отрыве потока сопротивление обтеканию тела возрастает в среднем на 14,5 % и поэтому частица вынуждена поворачиваться или вращаться с целью устранения отрыва потока, что обеспечивает минимум потерь напора при транспортировке твердого.

В.Г. Беликов считает, что перемещение шлама от центра к границам потока объясняется вращением частиц. С другой сто-

роны, Г. Цайдлер отмечает, что вращение частиц в потоке носит временный характер, а в пристенной области частицы не вращаются совсем. К. Матур и Н. Эпстайн показывают, что в фонтанирующем слое вытянутые частицы движутся без вращения.

Из представленного каждого обзора следует, что существующие теории не объясняют механизма перемещения частиц от центра к границам потока, их налипание на стенки, т.е. процесс пробкообразования.

Наряду с отсутствием прямого объяснения механизма образования пробок существуют экспериментальные работы, позволяющие косвенно судить о горизонтальном распределении частиц в вертикальном потоке. Многими исследованиями доказана связь между скоростью движения частицы в вертикальном потоке и ее формой.

В.Г. Волков предлагает ввести в формулу Риттингера эмпирический коэффициент, учитывающий зависимость скорости движения частиц от их формы. Значения коэффициента изменяются от 27,3 (для округлых зерен) до 19,7 (для плоских зерен). Для шара данный коэффициент равен 44,29 (по Риттингеру) или 55 (по Люону). Монроэ установил, что чем неправильнее форма частиц, тем меньше скорость их падения в потоке. Для шара скорость падения частиц равна скорости витания, т.е. соответствует значениям, рассчитанным по формуле Риттингера.

В ИГД АН СССР опытным путем установили, что происходит расслаивание частиц в зависимости от их формы. И.Ф. Девидсон и Д. Харрисон показали, что скорость витания зависит от фактора формы частиц. К аналогичному выводу пришли Л. Абрагам, П. Пизо, Ф. Чинкабилла и С. Фаббри, К. Хейсканен.

В теории гидравлической классификации материалов также отмечена связь между скоростью падения частиц и их формой. Однако эта зависимость устанавливается не дополнительным коэффициентом, а считается, что коэффициент сопротивления обтеканию в формуле Риттингера — это функция формы частиц и кривые Рабея, построенные для одинаковых чисел Рейнольдса, но для частиц различной формы, не совпадают друг с другом.

Н.С. Григ и Р.И. Рэтбан приводят результаты исследования скорости падения частиц различной формы. Кривые зависимости скорости падения от диаметра частиц различной формы сравнивались с кривой Рабея, построенной для сферических частиц, и при этом отмечалось, что причина несоответствия значений, полученных по формуле Рабея и данных доклада неизвестна.

Скорость витания частиц определяется по известным формулам на основании средней скорости потока, но на частицу в потоке действует сила гидродинамического давления, пропорцио-

нальная квадрату не средней, а местной скорости в точке, в которой находится частица. Поэтому скорость выноса частиц зависит от положения частицы в потоке и чем ближе частица находится к границе потока, тем меньше скорость ее движения в восходящем потоке.

Принимая во внимание, что скорость транспортировки частиц потоком зависит от формы, разумно предположить, что частицы по сечению потока распределяются в зависимости от формы. Чем более сплющена частица, тем ближе она располагается к границе потока. Очевидно, что при определенной форме (назовем ее критической) частицы прижимаются к стенкам потока, налипают на них, образуя пробки. В связи с этим фактор формы может определять перемещение частиц от центра к границам вертикального потока.

Смещение частиц к границам потока, их налипание на стенки — необходимое, но не достаточное условие пробкообразования. Наряду с механизмом налипания частиц на границы потока для образования пробок необходимо, чтобы первичный контур пробки сохранял свою устойчивость и не разрушался в потоке жидкости. Работы, посвященные устойчивости гравийных пробок в кольцевом пространстве скважины, не известны. Устойчивость свода сыпучих пород над кровлей горной выработки рассматривалась М.М. Протодяконовым. Предложенная теория не позволяет оценить механизм разрушения свода равновесия при наличии фильтрации жидкости через сыпучую породу. Интересные исследования проведены Н. Стейном относительно возможности образования устойчивых арочных песчаных структур около отверстий фильтра. Н. Стейн опытным путем показал, что устойчивость песчаных арок сохраняется только при ламинарном притоке из пласта. В турбулентном потоке своды равновесия быстро разрушаются. Очевидно, что использование предложенной методики оценки устойчивости арочных структур применительно к гравийным пробкам в кольцевом пространстве скважины некорректно, так как в первом случае наблюдается радиальная фильтрация, а с последним — плоскопараллельная. Кроме того, Н. Стейном не предложено количественной оценки устойчивости арочных структур.

Итак, для образования гравийных пробок необходимо наличие либо восходящего потока в кольцевом пространстве скважины, либо условий, при которых частицы гравия стремятся сместиться из центра к границам потока, где они зависают на стенках скважины или обсадных труб. Смещение частиц к стенкам, их налипание и зависание — необходимое, но недостаточное условие пробкообразования. Предупредить пробкообразование

можно в случае разрушения образовавшихся структур пробки в потоке. Механизм пробкообразования за счет налипания частиц на стенки и характер устойчивости структур пробки объяснить на базе имеющихся работ невозможно, в связи с чем автор считает необходимым привести теоретические основы механизма пробкообразования, которые могут послужить основой для разработки новой техники и технологии, модернизации имеющегося оборудования.

### Пробкообразование в ламинарном потоке жидкости

В процессе доставки гравия на забой скважины через кольцевое пространство частицы движутся преимущественно в ламинарном потоке. Ламинарный режим устанавливается при малых скоростях движения жидкости (до 0,1 м/с), для восходящего потока ограниченными возможностью выноса или зависания частиц гравия, а для нисходящего потока — производительностью откачного оборудования.

Рассмотрим движение сферичных гравийных частиц в ламинарном потоке в направлении оси  $x$ , перпендикулярной вертикальному потоку жидкости. Дифференциальное уравнение движения частицы имеет вид

$$\frac{d}{dt}(m\vec{v}_x) = \sum_{i=1}^{i=n} F_x = \vec{F}_{ж_1} + \vec{F}_{гд} + \vec{F}_c, \quad (8.12)$$

где  $t$  — время;  $m$  — масса частицы;  $\vec{v}_x$  — скорость частицы в направлении оси  $x$ ;  $F_x$  — проекция силы на ось  $x$ ;  $\vec{F}_{ж_1}$  — первая составляющая подъемной силы Жуковского;  $F_{гд}$  — сила гидродинамического давления;  $F_c$  — сила сопротивления.

Первая составляющая силы Жуковского  $F_{ж_1}$  возникает за счет наличия циркуляции скорости  $\Gamma$  по контуру гравийной частицы. Циркуляция скорости  $\Gamma$  по контуру частицы наблюдается при наличии изменяющегося по сечению градиента скорости потока. Скорость обтекания частицы по ее противоположным относительно вертикали сторонам различна, и, соответственно, согласно уравнению Бернулли различно и давление, действующее на противоположные стороны частицы (рис. 8.12). Скорость обтекания поверхности частицы, направленной к центру потока, всегда больше, чем скорость обтекания поверхности, обращенной к границе потока. Поэтому первая составляющая силы Жуковского при любых условиях пытается сместить частицу от границ

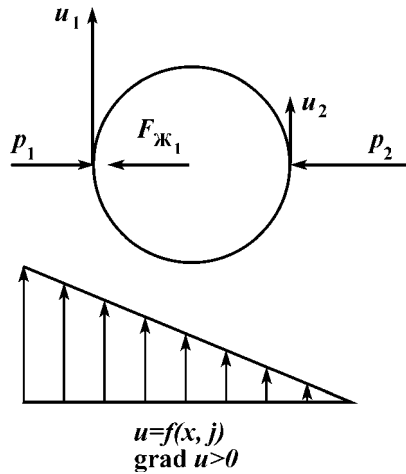


Рис. 8.12. Механизм возникновения первой составляющей силы Жуковского при наличии градиента скорости по сечению потока

к центру потока, что способствует предупреждению пробкообразования. Первая составляющая силы Жуковского

$$F_{ж1} = \rho \Gamma u_i d, \quad (8.13)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;  $u_i$  — скорость потока в сечении координаты центра тяжести частицы;  $d$  — диаметр частицы.

Циркуляция по контуру гравийной частицы из-за наличия градиента скорости по сечению потока

$$\Gamma = \oint_l u_i dx. \quad (8.14)$$

Для сферической формы частиц после интегрирования равенства (8.14) и подстановки результата в уравнение (8.13) получим уравнение для определения величины первой составляющей силы Жуковского

$$F_{ж1} = \psi \rho \bar{S} (u_1^2 - u_2^2), \quad (8.15)$$

где  $\psi$  — коэффициент сопротивления;  $\bar{S}$  — площадь Миделевого сечения частицы;  $u_1, u_2$  — скорости обтекания частицы по противоположным относительно оси симметрии потока сторонам.

Величину скорости в любой точке сечения потока легко определить, если известен закон ее распределения по сечению потока. Большинство авторов утверждают, что при ламинарном режиме этот закон с достаточной точностью (для практических расчетов) может быть выражен параболой вида  $u = ax^2 + b$ . Принимая во внимание справедливые для ламинарного режима движения сме-



си граничные условия о равенстве максимальной удвоенной средней скорости потока  $u_{\max} = 2\bar{u}$  и учитывая, что на стенках скважины и труб  $x = \pm(D_0 - D_{\phi})/2$  скорость потока  $u$  равна нулю, получаем уравнения для определения скоростей обтекания частицы по противоположным от вертикальной оси симметрии сторонам

$$u_1 = 2\bar{u} \left[ 1 - \frac{4}{(D_{\kappa} - D_{\phi})^2} \left( x - \frac{d}{2} \right)^2 \right];$$

и

$$u_2 = 2\bar{u} \left[ 1 - \frac{4}{(D_{\kappa} - D_{\phi})^2} \left( x + \frac{d}{2} \right)^2 \right],$$

где  $D_{\kappa}$ ,  $D_{\phi}$  – диаметр обсадной и фильтровой колонны соответственно.

Выражая среднюю скорость потока  $u$  через расход смеси  $Q$  и площадь сечения потока  $w_{\kappa\phi} = 0,785(D_{\kappa}^2 : D_{\phi}^2)$  и подставляя значения  $u_1$  и  $u_2$  в уравнение (8.15), получаем выражение для первой составляющей силы Жуковского

$$F_{ж1} = \frac{4\psi\rho d^2 Q^2}{(D_{\kappa} - D_{\phi})^2} \left[ \left( 1 - \frac{4(x - 0,5d)^2}{\Delta S^2} \right)^2 - \left( 1 - \frac{4(x + 0,5d)^2}{\Delta S^2} \right)^2 \right], \quad (8.16)$$

где  $\Delta S$  – размер кольцевого зазора ( $\Delta S = D_{\kappa} - D_{\phi}$ ).

Первая составляющая силы Жуковского способствует смещению частиц из периферийных в центральные сечения потока, препятствуя тем самым формированию первичных структур гравийных пробок по второму варианту пробкообразования.

Из уравнения (8.16) следует, что первая составляющая силы Жуковского достигает своих максимальных значений у стенок потока (градиент скорости максимален) и минимальных значений – в центре потока (скорость обтекания частицы по противоположным поверхностям одинакова и сила Жуковского для сферичной частицы обращается в нуль). Очевидно, что выражение (8.16) справедливо для восходящего и нисходящего ламинарного потоков. С целью объяснения механизма перемещения частиц из центральных сечений к границам потока и их зависания на стенках скважины и труб, способствующего пробкообразованию, были проанализированы возможные причины и сферы проявления такого смещения. На частицу действует горизонтальная составляющая силы гидродинамического давления  $F_{гд}$ .

Характер возникновения этой силы становится понятен, если представить действие ламинарного потока на поверхность частицы как действие бесконечного числа параллельных струек жидкости бесконечно малого диаметра на наклонную плоскость, что справедливо согласно определению ламинарного режима движения потока.

Горизонтальная проекция гидродинамического давления состоит из двух составляющих (рис. 8.13). Первая составляющая, действующая на четверть поверхности сферы и находящаяся ближе к оси симметрии потока, отлична от второй, действующей на четверть поверхности сферы, близлежащей к границе потока. В результате различия (по величине) первой и второй составляющих гидродинамического давления возникает усилие, действующее на частицу в горизонтальной плоскости. В восходящем потоке сила гидродинамического давления пытается сместить частицу от центра к границам потока, так как горизонтальная составляющая  $F_{гд}$ , действующая на четверть поверхности частицы, обращенную к оси потока, выше, чем на противоположную поверхность. В нисходящем потоке действующую на частицу силу правильнее назвать не силой гидродинамического давления, а силой гидродинамического сопротивления. Скорость движения частицы в нисходящем потоке выше, чем скорость движения жидкости. Скорость жидкости в любом сечении нисходящего ламинарного потока увеличивается от границ к центральным сечениям, а скорость движения частиц не зависит от ее положения

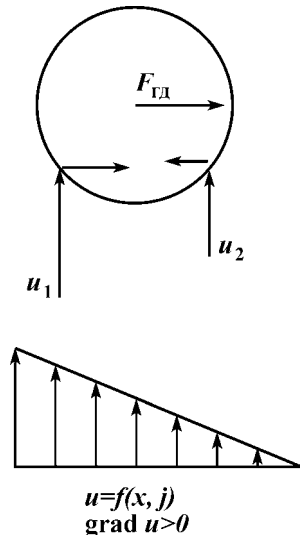


Рис. 8.13. Механизм возникновения горизонтальной составляющей силы гидродинамического давления при наличии градиента скорости по сечению потока

в потоке. Поэтому можно утверждать, что абсолютная скорость частицы относительно слоев жидкости тем больше, чем меньше эта частица удалена от оси потока. Следовательно, для нисходящего потока горизонтальную составляющую силы гидродинамического сопротивления можно также определить через действие элементарных струек на поверхность частицы (см. рис. 8.13). Действие элементарной струйки на частицу в горизонтальной плоскости определяется выражением

$$f_{гд} = 0,5\rho u^2 \bar{S} \sin 2\delta, \quad (8.17)$$

где  $u$  — скорость элементарной струйки жидкости;  $\delta$  — угол наклона касательной к поверхности частицы и вертикали.

Проинтегрировав уравнение (8.17) с учетом градиента скорости по поверхности частицы, получим уравнение для определения горизонтальной составляющей гидродинамического давления (сопротивления)

$$F_{гд} = \rho \psi \oint_l \text{grad } \bar{u}^2 dS = \frac{8\rho \psi d^2 Q^2}{\pi(D_k^2 - D_\Phi^2)^2} \left\{ \left[ 1 - \frac{4(x - 0,5d)^2}{\Delta S^2} \right]^2 - \right. \\ \left. - \left[ 1 - \frac{4(x + 0,5d)^2}{\Delta S^2} \right]^2 \right\}. \quad (8.18)$$

В восходящем потоке первая составляющая силы Жуковского способствует смещению частиц от границ к центру, а горизонтальная составляющая гидродинамического давления наоборот, препятствует такому смещению. Первая составляющая силы Жуковского в  $\pi/2$  превышает горизонтальную составляющую силы гидродинамического давления, поэтому в установившемся режиме сферичные частицы движутся всегда в центральных сечениях потока и первичные структуры гравийных пробок по второму варианту пробкообразования (см. рис. 8.11,  $z$ ,  $d$ ,  $e$ ) не образуются.

В нисходящем потоке первая составляющая силы Жуковского и горизонтальная составляющая гидродинамического сопротивления способствуют смещению частиц из периферийных в центральные сечения потока и первичные структуры гравийных пробок по второму варианту также не формируются. Эпюра распределения усилия, смещающего сферичную частицу к центру в зависимости от положения частицы в потоке, представлена на рис. 8.14. Очевидно, что чем дальше частица находится от центра потока и чем больше ее диаметр, тем выше действующее на нее суммарное усилие.

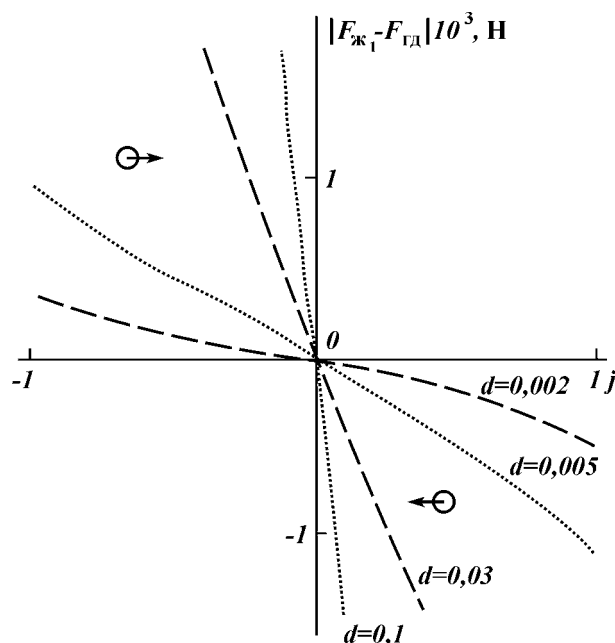


Рис. 8.14. Эпюры распределения усилия, действующего на сферическую частицу различной крупности по сечению потока и смещающего ее к центру

Вывод о том, что сферическая частица всегда движется в центре вертикального потока [см. уравнения (8.16) и (8.18)] хорошо согласуется с экспериментальными данными А.Е. Смолдырева, проводившего скоростную киносъемку движения сферических шариков в вертикальном потоке. Итак, при закачке в скважину частиц сферической формы (согласно второму варианту) пробкообразования наблюдаться не будет.

На практике обеспечить снабжение гравием только идеально сферической формы невозможно. Известны классификации гравийных частиц по форме. Типичные формы гравийных частиц определяются коэффициентами окатанности и сферичности (рис. 8.15).

При движении частицы неправильной формы возникает сложное обтекание жидкости по контуру частицы, определяющееся не наличием градиента скорости по сечению потока (первая составляющая силы Жуковского), а формой частицы. Циркуляция жидкости по контуру гравийной частицы, вызванная ее неправильной формой, приводит к возникновению дополнитель-

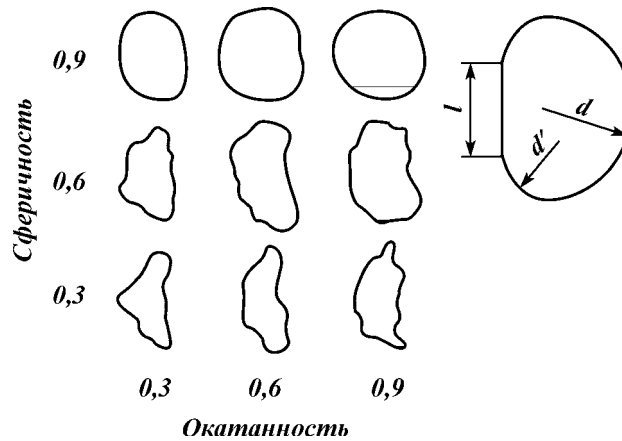


Рис. 8.15. Типовые формы частиц

ного усилия, действующего на частицу в горизонтальной плоскости, которое было названо второй составляющей силы Жуковского. Вторая составляющая силы Жуковского может быть определена из выражения

$$F_{ж2} = \rho \bar{u}_i \oint_1 \text{rot } \bar{u}_i dS. \quad (8.19)$$

Форма гравийных частиц (см. рис. 8.15) при обтекании жидкостью хорошо описывается тремя параметрами: большим  $d$  и малым  $d'$  радиусами обтекания частицы и длиной вытянутой части частицы  $l'$ . Из энергетической теории гидротранспорта следует, что частица гравия в потоке движется как и жидкость в водоносном пласте — по пути наименьшего сопротивления. Для гравийной частицы это означает, что в процессе транспортировки она ориентируется в потоке таким образом, чтобы сопротивление обтеканию было минимальным. Если принять во внимание, что сила сопротивления пропорциональна площади сечения частицы, перпендикулярного направлению потока, то можно предположить, что частица располагается вытянутой стороной вдоль оси потока и поэтому на циркуляцию жидкости вдоль контура частицы влияет только большой и малый радиус обтекания. Обозначим отношение  $d'/d$  коэффициентом формы гравийных частиц  $K$ . Решая уравнение (8.19) с учетом принятого коэффициента формы гравийных частиц, получаем выражение для определения второй составляющей силы Жуковского

$$F_{ж2} = \frac{16,7 \psi \rho S Q^2}{(D_k^2 - D_\Phi^2)^2} (1 - K) \left(1 - \frac{4x^2}{\Delta S^2}\right)^2. \quad (8.20)$$

Вторая составляющая силы Жуковского способствует смещению частицы к границам потока. С учетом влияния формы на горизонтальное перемещение частиц в потоке дифференциальное уравнение движения частицы (8.12) при установившемся режиме запишется в следующем виде:

для случая засыпки в восходящем потоке жидкости

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(mv_x) = & 2,35 \frac{\psi \rho \bar{S} Q^2}{(D_k^2 - D_\Phi^2)^2} [7,08(1 - K) \left(1 - \frac{4x^2}{\Delta S^2}\right)^2 - \\ & - \left(1 - \frac{4(x + 0,5d)^2}{\Delta S^2}\right)^2 - \left(1 - \frac{4(x - 0,5Kd)^2}{\Delta S^2}\right)^2] \pm [\rho \psi \bar{S} v_x^2 + \mu \psi dv_x]; \end{aligned} \quad (8.21)$$

для случая засыпки в нисходящем потоке жидкости

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(mv_x) = & \frac{10,57 \psi \rho S Q^2}{(D_k^2 - D_\Phi^2)^2} [1,57(1 - K) \left(1 - \frac{4x^2}{\Delta S^2}\right)^2 - \\ & - \left(1 - \frac{4(x + 0,5d)^2}{\Delta S^2}\right)^2 - \left(1 - \frac{4(x - 0,5Kd)^2}{\Delta S^2}\right)^2] \pm [\rho \psi \bar{S} v_x^2 + \mu \psi dv_x], \end{aligned} \quad (8.22)$$

где  $\mu$  — вязкость жидкости.

Выражения (8.21) и (8.22) представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка, которые не решаются обычными методами интегрирования. При анализе условий формирования первичных структур гравийных пробок за счет смещения частиц из центральных в периферийные сечения потока первостепенное значение приобретает оценка установившегося движения частиц, для которого справедливы граничные условия

$$\frac{d}{dt}(mv_x) = 0; \quad \frac{dx}{dt} = 0.$$

С учетом принятых граничных условий решение уравнений (8.21) и (8.22) показывает, что при различных коэффициентах формы частицы гравия будут стремиться занять строго определенное положение в потоке. Если форма частицы правильная и  $K = 1$ , то частица гравия будет двигаться в ламинарном потоке жидкости в центре потока. Если  $K$  уменьшается, то частица гравия будет смещаться от центра к границам потока. С целью

предупреждения зависания частиц гравия в процессе закачки большой интерес представляет нахождение таких значений  $K$ , при которых частица будет прижиматься к границам потока. Приравняем к нулю правые части уравнений (8.21) и (8.22), подставим значения  $x$ , характерные для границ потока  $[x = \pm 0,5 \times (D_k - D_\phi)]$  и предположив, что размер частицы гравия значительно меньше размеров кольцевого пространства, получим, что при закачке в восходящем потоке воды, критический коэффициент формы  $K_{кр}$ , при котором частица начинает прижиматься к границам потока, равен 0,76. При закачке гравия в нисходящем потоке  $K_{кр} = 0,32$ . Распределение частиц гравия в процессе закачки для восходящего и нисходящего потоков в зависимости от коэффициента формы частиц представлено графиками на рис. 8.16. В качестве геометрического критерия подобия потока автором при построении графиков принималась безразмерная величина  $j = 2x/(D_k - D_\phi)$ , которая на границах потока принимает значения  $\pm 1$ , а в центре равна нулю.

Из представленных графиков видно, что при закачке в нисходящем потоке жидкости требования к качеству материала с учетом исключения возможного зависания могут быть менее строгими, чем для восходящего потока. При засыпке гравия в нисходящем потоке пригоден материал, коэффициент формы частиц которого больше 0,32, а в восходящем потоке необходимо использовать гравий более правильной формы ( $K > 0,76$ ).

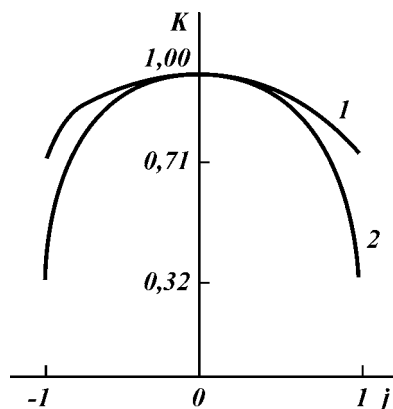


Рис. 8.16. Распределение частиц гравия в поперечном сечении восходящего (1) и нисходящего (2) потоков

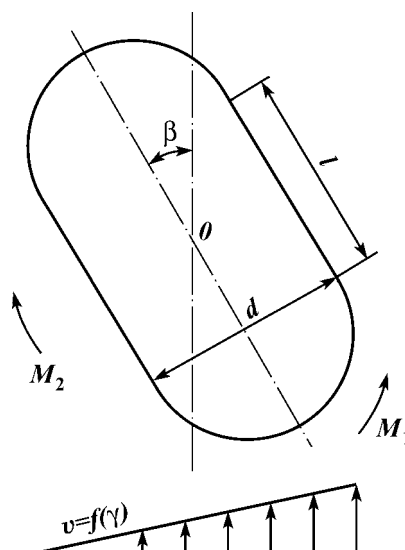


Рис. 8.17. Вращение частицы в потоке

За счет наличия градиента скоростей жидкости по сечению потока в некоторых случаях будет наблюдаться вращательное движение частиц гравия. В связи с этим целесообразно оценить влияние возможного вращения на перемещения частиц в горизонтальной плоскости.

На рис. 8.17 показана гравийная частица в вертикальном потоке жидкости. Очевидно, что вращение частицы в некоторой точке сечения потока будет наблюдаться, если вращательный момент, стремящийся повернуть частицу по часовой стрелке  $M_2$ , больше вращательного момента, поворачивающего частицу против часовой стрелки  $M_1$ . Величина вращательных моментов определяется величиной гидродинамического давления (сопротивления) на противоположные от центра тяжести поверхности частицы

$$dM_{1,2} = dE_{гд} dS. \quad (8.23)$$

Проинтегрировав выражение (8.23) по поверхности гравийной частицы, получим уравнения для моментов

$$M_1 = 3,24a \left\{ d \left[ \left( 1 - \frac{4(x-0,5d)^2}{\Delta S^2} \right)^2 - \left( 1 - \frac{4x^2}{\Delta S^2} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + l' \sin \beta \left[ \left( 1 - \frac{4x^2}{\Delta S^2} \right)^2 - \left( 1 - \frac{4(x+0,5l' \sin \beta)^2}{\Delta S^2} \right)^2 \right] \right\}; \quad (8.24)$$

$$M_2 = 3,24a(1-\sin \beta)(d-l' \sin \beta) \left[ \left( 1 - \frac{4(x+0,5l' \sin \beta)^2}{\Delta S^2} \right)^2 + \right. \\ \left. - \left( 1 - \frac{4(x+0,5d)^2}{\Delta S^2} \right)^2 \right] + d(1-\cos \beta) \left[ \left( 1 - \frac{4(x+0,5d+l' \sin \beta)^2}{\Delta S^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( 1 - \frac{4(x+0,5d+l' \sin \beta+0,5d \sin \beta)^2}{\Delta S^2} \right)^2 \right] + 3,24 \frac{\psi' \rho \bar{S} Q^2 l' \sin \beta}{(D_k^2 - D_\phi^2)} \times \\ \times \left[ \left( 1 - \frac{4(x+0,5d)^2}{\Delta S^2} \right)^2 - \left( 1 - \frac{4(x+0,5d+l' \sin \beta)^2}{\Delta S^2} \right)^2 \right], \quad (8.25)$$

где  $\psi'$  — коэффициент обтекания цилиндрической части гравийной частицы, изменяющейся в зависимости от величины угла от 0,11 до 0,2.

Сравнивая значения  $M_1$  и  $M_2$ , полученные при расчетах по



формулам (8.24) и (8.25), можно судить о характере вращательного движения частицы данной формы. Если  $M_1$  больше  $M_2$  при любых значениях угла наклона частицы к вертикали  $\beta$  для определенной точки потока, то в этой точке частица будет вращаться. В противном случае, при определенном значении  $\beta$  моменты  $M_1$  и  $M_2$  уравниваются и частица движется при установившемся наклоне к вертикали без вращения. Графики изменения угла стабильного движения частиц различной формулы  $K_n = l/d$  по сечению потока представлены на рис. 8.18. Если угол наклона большей оси симметрии частицы к вертикали превышает  $90^\circ$ , то частица в этом сечении потока будет вращаться. Вращение частиц наблюдается преимущественно в периферийных областях потока, где велик градиент скорости. При смещении частиц к центру вращение постепенно затухает. Частицы с коэффициентом продолговатости  $K_n = 0,25$  вращаются только в области от границ потока  $j = \pm 1$  до значений  $j = \pm 0,4$ . Сферические частицы вращаются по всему сечению потока за исключением центра.

В потоке вращаются только скатанные частицы с коэффициентом продолговатости  $K_n < 0,5$  (см. рис. 8.17). С увеличением продолговатости частиц область вращения частиц в потоке сужается от центральных к периферийным сечениям и уменьшается угол наклона частиц к оси потока частиц,двигающихся без вращения. Проанализировав выражения (8.21), (8.22), (8.24) и (8.25), было получено, что за счет горизонтального усилия, действующего на частицу, определяемого из уравнений (8.21) и

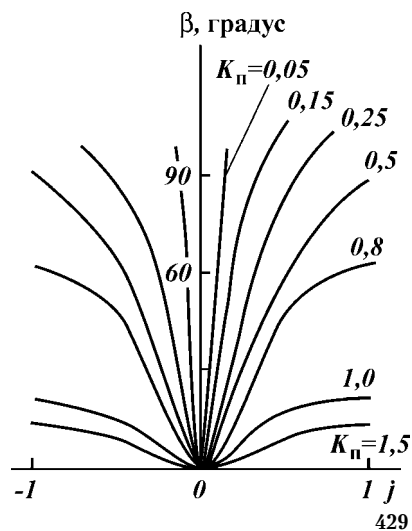


Рис. 8.18. Изменение угла наклона частицы по сечению потока от ее формы

(8.22), частица определенной формы  $K_n$  будет стремиться занять в потоке строго определенное положение (см. рис. 8.16), в котором гидродинамическое давление на противоположные от центра тяжести поверхности частицы равны, и соответственно равны моменты  $M_1$  и  $M_2$ . При достижении частицей точки сечения потока, в которой  $M_1$  уравнивается  $M_2$ , частица гравия продолжает двигаться в этом слое жидкости в строго вертикальном положении без вращения.

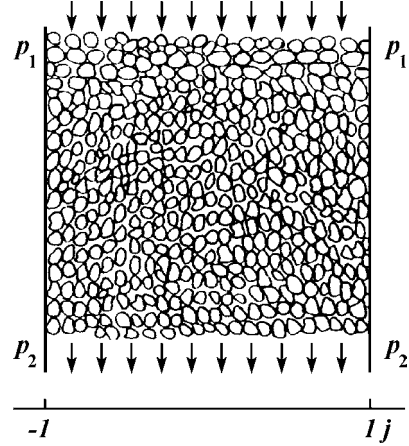
В соответствии с этим, при засыпке гравия наблюдается вращение окатанных частиц ( $K_n < 0,5$ ) в потоке. Однако период вращения частиц очень незначителен, так как под действием горизонтальных сил частица смещается в такое сечение потока, в котором значения  $M_1$  и  $M_2$  уравниваются друг друга и учитывать влияние вращения частиц в потоке на горизонтальное перемещение частицы гравия нецелесообразно.

В ламинарном потоке жидкости создаются благоприятные условия для образования гравийных пробок в случае, если при засыпке используют гравий неправильной формы, характеризующийся значениями меньшими критических. С увеличением концентрации частиц гравия критической формы в потоке вероятность пробкообразования увеличивается, но оценить это влияние возможно только экспериментальным путем. Вывод о влиянии формы на распределение частиц по сечению потока в горизонтальной плоскости подтверждается экспериментальными данными, полученными различными исследователями. Однако ранее это явление не имело научного обоснования. Смещение частиц гравия к границам потока, их налипание и скопление на стенках скважины и обсадных труб есть необходимое, но не достаточное условие пробкообразования. Доставку гравия в зону фильтра можно обеспечить, если первичные структуры гравийных пробок, образующихся в потоке, не сохраняют свою устойчивость и под влиянием многих факторов разрушаются.

Возможность образования устойчивого контура равновесия в сыпучих породах при креплении горных выработок была рассмотрена М.М. Протодяконовым. Применение предложенной методики не позволяет оценить устойчивость гравийной пробки в кольцевом пространстве скважины, так как в значительной степени она определяется характером фильтрации жидкости в гравийном материале.

Оценим устойчивость гравийной пробки к разрушению в ламинарном потоке жидкости. При малых скоростях движения потока фильтрация жидкости через гравийную пробку (рис. 8.19) подчиняется закону Дарси. Потери напора на гравийной пробке за счет наличия фильтрации

Рис. 8.19. Гравийная пробка в потоке



$$h = \frac{QL}{K_{\phi} w_{\text{кп}}}, \quad (8.26)$$

где  $L$  — высота пробки;  $K_{\phi}$  — коэффициент фильтрации пробки;  $w_{\text{кп}}$  — площадь поперечного сечения пробки.

С учетом уравнения Бернулли, записанного для верхнего и нижнего сечений гравийной пробки, перепад давления определится из выражения

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g L \left( \frac{Q}{K_{\phi} w_{\text{кп}}} - 1 \right). \quad (8.27)$$

Закон сопротивления при обтекании тел жидкостью в общем виде

$$F_c = \psi \mu d v_{\phi} + \psi' \rho d^2 v_{\phi}^2. \quad (8.28)$$

Если силы инерции и вязкости малы (при ламинарном потоке в скважине), то второй член выражения (8.28) приближенно равен нулю и им можно пренебречь. В связи с этим запишем, что сила сопротивления при фильтрации прямо пропорциональна скорости потока или квадрату координаты, т.е.

$$F_c \propto j^2. \quad (8.29)$$

С учетом уравнения (8.29) можно записать, что закон распределения гидродинамического давления потока на пробку по сечению потока в общем виде

$$p_{\text{гд}} = p_{\text{max}}(1 - j^2), \quad (8.30)$$

где  $p_{\text{max}}$  — максимальное гидродинамическое давление по сечению пробки.

Площадь эпюры под кривой распределения гидродинамического давления по сечению потока равна силе гидродинамического давления на гравийную пробку. Интегрируя уравнение (8.30), получаем выражение для определения силы гидродинамического давления в координатах при фильтрации жидкости через пробку

$$F_{\text{гд}} = \frac{4}{3} p_{\text{max}}. \quad (8.31)$$

Сила гидродинамического давления на пробку равна произведению средней величины давления потока на площадь потока, В координатах  $F_{\text{гд}} = f(j)$  справедливо равенство

$$F_{\text{гд}} = 2\bar{p}. \quad (8.32)$$

Решая совместно уравнения (8.31) и (8.32), получаем

$$p_{\text{max}} = \frac{3}{2} \bar{p}. \quad (8.33)$$

Закон распределения гидродинамического давления на пробку по сечению потока с учетом выражений (8.30) и (8.27) примет вид

$$p_{\text{гд}} = \frac{3}{2} \rho g L \left( \frac{Q}{K_{\text{ф}} w_{\text{кп}}} - 1 \right) (1 - j^2). \quad (8.34)$$

Кроме гидродинамического давления на свод гравийной пробки действует статическое усилие, равное весу вышележащих гравийных частиц

$$p_{\text{с}} = \rho g L e \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho} - 1 \right), \quad (8.35)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  — плотность породы;  $e$  — пористость породы.

Общее давление на своде пробки равно сумме гидродинамической и статической составляющих

$$p = p_{\text{гд}} + p_{\text{с}} = \rho g L \left[ \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho} - 1 \right) e + \frac{3}{2} \left( \frac{Q}{K_{\text{ф}} w_{\text{кп}}} - 1 \right) (1 - j^2) \right]. \quad (8.36)$$

Рассмотрим возможность образования устойчивого свода гравийной пробки в ламинарном потоке при заданной величине действующей нагрузки, определяемой из уравнения (8.36).

Контур гравийной пробки будет устойчив к разрушению, если моменты активных сил, действующих на свод гравийной пробки относительно некоторой точки  $N$  с координатами  $n_1$  и  $n_2$ , принадлежащей этому контуру, равны. Образование устойчивого свода равновесия гравийной пробки в кольцевом пространстве скважины при ламинарном режиме движения потока и действующая на этот контур нагрузка показаны на рис. 8.20, а, б.

Момент, стремящийся сдвинуть свод равновесия по часовой стрелке,

$$M_2 = N_1 n_1. \quad (8.37)$$

Интегрируя уравнение (8.37) от нуля до  $n_1$ , по  $dj$ , получаем

$$M_2 = 0,5n_1^2 \left[ p + \frac{3}{2} \left( \frac{Q}{K_\Phi w_{\text{кп}}} - 1 \right) \rho g L (j^2 - n_1^2) \right]. \quad (8.38)$$

Момент, стремящийся сдвинуть свод равновесия по часовой

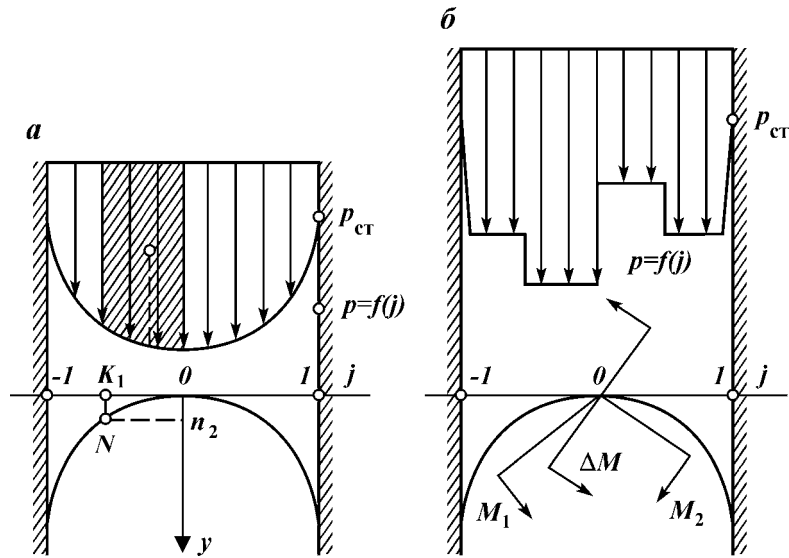


Рис. 8.20. Механизм образования и разрушения свода равновесия в гравийной пробке

стрелке, равен произведению реакции правой части свода на координату

$$M_1 = N_2 n_2. \quad (8.39)$$

Реакция правой части свода равновесия  $N_2$  равна произведению суммарного усилия активных сил на правую часть свода на коэффициент бокового распора

$$M_1 = 0,5 p w_{\text{кп}} \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90 - \theta}{2} \right) n_2, \quad (8.40)$$

где  $\theta$  — угол внутреннего трения.

Площадь кольцевого пространства скважины в системе координат  $j$  равна двум и выражение (8.40) запишем в следующем виде:

$$M_1 = p \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90 - \theta}{2} \right) n_2. \quad (8.41)$$

Согласно условию равновесия свода гравийной пробки  $M_2 = M_1$ . Решая совместно уравнения (8.38) и (8.41) и принимая, что коэффициент бокового распора равен 0,5, получаем уравнение свода равновесия

$$y = x \left[ 1 + \frac{p_{\text{гд}}}{p} (j^2 - x^2) \right]. \quad (8.42)$$

В начальный период образования пробки ее высота незначительна и статической составляющей нагрузки на свод пробки можно пренебречь. В этом случае уравнение (8.42) запишется в более простом виде

$$y = x^2 (2 - x^2). \quad (8.43)$$

Из выражений (8.42) и (8.43) следует, что при ламинарном режиме движения потока в кольцевом пространстве скважины гравийные пробки, сформировавшиеся за счет налипания, записания частиц гравия неправильной формы на стенках скважины и обсадных труб сохраняют устойчивое состояние и препятствуют надежной доставке гравия в зону фильтра. Свод гравийной пробки в ламинарном потоке жидкости принимает вид параболы, причем с увеличением высоты гравийной пробки (возрастает статическая составляющая нагрузки на пробку) ветви параболы занимают более крутое положение, что свидетельствует о повышении устойчивости гравийной пробки к разрушению.

### Пробкообразование в турбулентном потоке жидкости

Сложность оценки перемещения частиц в турбулентном потоке связана с отсутствием количественного описания турбулентности. Из многочисленных работ, посвященных этой проблеме, целесообразно выделить и взять за основу последующих исследований работу Х. Шуберта, Т. Нессе и П. Коха, в которой предложена оригинальная качественная теория переноса частиц в турбулентном потоке. Турбулентный поток представлен как некоторое постоянно изменяющееся поле вихревых скоростей, наложенное на поле осредненных скоростей. В этой связи турбулентный перенос частиц в потоке определяется с одной стороны вихревым полем изменяющихся скоростей, а с другой — полем осредненных скоростей

$$q_i = -D_t \frac{dn_i}{dx} - \bar{v}_x n_i, \quad (8.44)$$

где  $q_i$  — показатель турбулентного переноса  $i$ -ой частицы гравия;  $D_t$  — коэффициент диффузии;  $n_i$  — число частиц гравия, проходящих через некоторую вертикальную плоскость.

Первый член уравнения (8.44) определяет количество частиц, проходящих через некоторую вертикальную плоскость в потоке гравийной смеси за счет турбулентной диффузии. Горизонтальное перемещение частиц в потоке под действием вихревого поля скоростей определяется коэффициентом диффузии  $D_t$ , значения которого находятся только опытным путем. Очевидно, что такой подход к оценке перемещений частиц в потоке может объяснить экспериментальный материал, но не позволяет оценить условия прижатия частиц к стенкам скважины и обсадных труб и выявить определяющие его факторы.

Рассмотрим влияние вихревого поля скоростей потока на горизонтальное перемещение частиц. Согласно теореме Жуковского, подъемная сила, возникающая вследствие циркуляции вихрей и перпендикулярная к оси потока, который движется в бесконечности с некоторой скоростью, равна плотности жидкости, умноженной на циркуляцию, скорость потока и длину обтекаемого тела. Теорема Жуковского применима для определения подъемной силы любых тел, движущихся в жидкости. Н.Е. Жуковский разработал теорию присоединения вихрей, основная идея которой заключается в том, что обтекаемые тела могут быть заменены вихрями. Поэтому можно воспользоваться теоремой Жуковского применительно к движению самих вихрей. На любой вихрь, когда он перемещается внутри жидкости, всегда действует сила, направленная так же, как и сила Жуковского, т.е.

нормально к оси обтекающего вихрь потока. Под действием этой силы вихри будут смещаться в направлении, где скорость больше, т.е. от периферии к оси потока.

Вихрь, двигаясь в направлении, перпендикулярном к оси потока, подвергается также действию сил трения и поэтому его путь не будет прямой линией, а будет изогнут в виде дуги, обращенной своей выпуклостью навстречу потоку. Кроме того, вихри создают определенное поле скоростей в жидкостях. Поскольку вихри образуются в слоях с малыми скоростями, они будут тормозить движение этих слоев и, следовательно, уменьшать их скорость. Итак, вихри будут выравнивать скорости в поперечном сечении потока, что имеет большое значение для процессов массообмена и распределения гравийных частиц в поперечном сечении потока.

Определим соотношение между подъемной силой вихря и силой сопротивления  $F_c$ , испытываемой им при перемещении в жидкости. Заменяя циркуляционную скорость в уравнении (8.13) работой силы на поверхности вихря поперечного сечения  $S_v$ , получаем

$$F_v = C_n \rho S_v \frac{\bar{u}^2}{2}, \quad (8.45)$$

где  $F_v$  — подъемная сила вихря;  $C_n$  — коэффициент подъемной силы, определяемый опытным путем;  $\bar{u}$  — осредненная скорость турбулентного потока.

При перемещении вихря необходимо преодолеть силу сопротивления, которая определяется по формуле

$$F_c = C_0 \rho S_v \frac{\bar{u}_v^2}{2}, \quad (8.46)$$

где  $C_0$  — коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса;  $\bar{u}_v$  — скорость подъема турбулентного вихря.

Приравняв силы  $F_v$  и  $F_c$ , получаем скорость подъема вихря

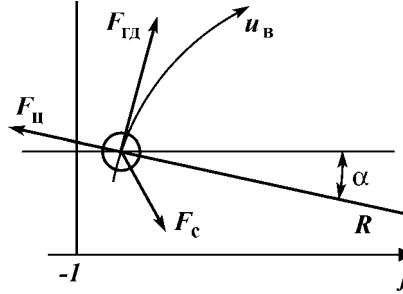
$$\bar{u}_v = \sqrt{\frac{C_n}{C_0}} \bar{u}. \quad (8.47)$$

Судя по опытам Прандтля, величины  $C_n$  и  $C_0$  имеют один порядок и поэтому можно полагать, что скорость вихря  $\bar{u}_v$  будет соизмерима со скоростью потока  $\bar{u}$ .

Рассмотрим движение частиц гравия в единичном вихре, перемещающемся согласно теореме Жуковского о подъемной силе от периферии к оси симметрии потока по дугообразной траектории (рис. 8.21). В горизонтальной плоскости перемещение частиц



Рис. 8.21. Движение частицы в вихревом потоке и действующие на нее силы



под действием единичного вихря определяет соотношение трех сил: горизонтальной составляющей центробежной  $F_{ц}$ , гидродинамического давления  $F_{гд}$  и сопротивления  $F_{с}$ . Дифференциальное уравнение движения гравийной частицы в потоке запишем в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum_{i=1}^{i=n} F_x = -F_{ц} + F_{гд} \pm F_{с}. \quad (8.48)$$

Центробежная сила  $F_{ц}$ , действующая на гравийную частицу, определяется массой частицы  $m$ , скоростью движения частицы  $v$  и радиусом закручивания вихря  $R$ . Как отмечалось выше, скорость движения частиц в турбулентном потоке приравнивается к скорости движения самого потока вследствие малости относительных скоростей движения жидкости и частиц в сравнении со скоростью потока. Поэтому при оценке величины центробежной силы удобнее пользоваться не скоростью частицы  $v$ , а скоростью потока  $\bar{u}$ . Вихри зарождаются у границ потока, а затем закручиваются к его центру, в связи с чем радиус закручивания вихря можно приравнять к радиусу потока гравийной смеси. Если учесть принятые обозначения, то величина центробежной силы

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R} = \frac{\pi d^3 \rho_n}{3\Delta S} \bar{u}^2 \cos \alpha, \quad (8.49)$$

где  $\alpha$  — угол наклона вихря к оси потока.

Горизонтальная составляющая гидродинамического давления определится по аналогии с уравнением (8.17)

$$F_{гд} = \psi \rho \bar{S} \frac{\bar{u}^2}{2} \sin \alpha. \quad (8.50)$$

Очевидно, что центробежная сила способствует смещению частиц к периферии потока, а сила гидродинамического давления вихря — наоборот — к его центру. Сила сопротивления  $F_{с}$  имеет

направление, противоположное направлению движения частицы, и не может самостоятельно вызывать горизонтальное перемещение частиц в потоке, так как определяет только скорость и время движения частиц, не изменяя его направления. В этой связи, тенденцию перемещения частиц в горизонтальной плоскости определяют только первые две составляющие дифференциального уравнения (8.48), а сила сопротивления считается их производной. Из выражений (8.49) и (8.50) следует, что центробежная сила пропорциональна диаметру частицы гравия в кубе, а сила гидродинамического давления — квадрату диаметра частицы. С увеличением размеров частиц центробежная сила возрастает быстрее, чем сила гидродинамического давления, и при определенном диаметре частиц будет наблюдаться смещение частиц к границам потока и их зависание на стенках скважины и обсадных труб, что приводит к образованию гравийной пробки. Приравнивая правые части уравнений (8.49) и (8.50), получаем выражение для определения критического диаметра частиц гравия, выше которого под действием единичного вихря частицы налипают, зависают на границах потока

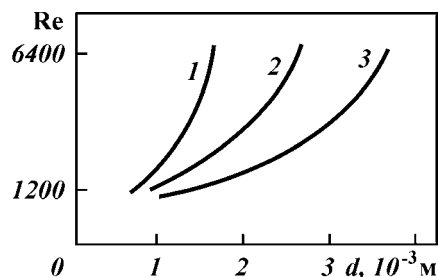
$$d_{кр} = 0,375\psi\Delta S \operatorname{tg} \alpha. \quad (8.51)$$

Угол наклона вектора скорости вихря к вертикали  $\alpha$  определяется соотношением вертикальной и горизонтальной составляющих скоростей вихря. Как показали исследования, в зависимости от числа Рейнольдса горизонтальная проекция вектора скорости вихря может достигать трех десятых вертикальной скорости вихря  $\bar{u}_v$  или в соответствии с уравнением (8.47) трех десятых средней скорости потока  $\bar{u}$ . При незначительной степени турбулизации потока, что наблюдается при переходе от ламинарного к турбулентному потоку ( $Re = 1200$ ), горизонтальная составляющая проекции скорости вихря равна приблизительно десятой части средней скорости потока. В этой связи угол  $\alpha$  — функция числа Рейнольдса, в зависимости от степени турбулизации потока — изменяется от 6 до 16°.

На рис. 8.22 представлена зависимость критического диаметра гравийных частиц, при котором наблюдается пробкообразование, от числа Рейнольдса для различных сечений кольцевого пространства скважины  $f$ . При зазоре между стенками скважины (обсадных труб) в 100 мм при незначительной турбулизации потока ( $Re = 1200$ ) частицы размером более 0,6 мм зависают на границах потока. С ростом степени турбулизации потока критический диаметр зависших частиц увеличивается и достигает при развитой турбулентности ( $Re = 6400$ ) 1,7 мм, что свиде-

Рис. 8.22. Зависимость критического диаметра частиц гравия, смещающихся к границам потока в турбулентном потоке, от числа Рейнольдса при разных значениях  $f$ :

1 – 0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,2



тельствует об уменьшении вероятности пробкообразования с ростом числа Рейнольдса. Из формулы (8.51) следует, что при увеличении межтрубного зазора в скважине  $\Delta S$  критический диаметр частиц также возрастет. Если учесть, что размер гравийных частиц, засыпаемых в скважину, редко превышает 2–3 мм, то согласно уравнению (8.51) при кольцевом зазоре  $\Delta S \geq 0,5$  м налипания частиц на границы потока под влиянием вихрей можно избежать.

Горизонтальное перемещение в турбулентном потоке определяется не только влиянием вихревого поля скоростей, но и поля осредненных скоростей потока [см. формулу (8.44)]. Дифференциальное уравнение движения частиц в горизонтальной плоскости под действием поля осредненных скоростей потока соответствует выражению (8.22). Отметим, что при турбулентном потоке частицы распределяются по сечению в зависимости от их формы, однако характер этого распределения будет отличаться от распределения в ламинарном потоке. Отличие заключается в различных изменениях осредненных скоростей потока по его сечению и градиенте скорости, который согласно формулам (8.15), (8.18) и (8.20) определяет горизонтальное перемещение частиц в потоке.

Характер изменения осредненных скоростей турбулентного потока описывается следующим уравнением:

$$u_i = \bar{u} \frac{8}{7} \left( 1 - \frac{2x}{\Delta S} \right)^{1/7}, \quad (8.52)$$

где  $u_i$  – скорость турбулентного потока в сечении, соответствующем центру тяжести  $i$ -ой частицы.

Решая дифференциальное уравнение (8.22) с учетом равенства (8.52), получим кривые распределения частиц по сечению турбулентного потока в зависимости от их формы (см. рис. 8.16). Коэффициент критической формы  $K_{кр}$  для турбулентного потока соответствует критическому коэффициенту формы для ламинарного потока и равен для восходящего направления движения

гравийной смеси 0,76, а для нисходящего — 0,31. При коэффициенте формы, меньшем критического, гравийная частица под действием осредненного поля скоростей стремится зависнуть, налипнуть на границы потока, что способствует пробкообразованию.

При турбулентном потоке (в отличие от ламинарного) влияние формы частиц наблюдается только для определенных сечений вертикального потока, которые принято называть в технической литературе пограничным слоем. В ядре потока частицы различной формы распределены равномерно и движутся хаотично, подчиняясь законам диффузии. В пограничном слое влияние формы частиц на их горизонтальное перемещение особенно велико, что качественно отличает этот слой от ядра потока.

Распределение гравийных частиц по поперечному сечению турбулентного потока в зависимости от коэффициента критической формы будет искажаться за счет воздействия вихревого поля скоростей. Однако вихревое воздействие носит временный характер и за счет наличия градиента осредненной скорости по сечению потока будет наблюдаться смещение частицы в зависимости от ее формы либо к границам, либо к ядру потока.

В турбулентном потоке могут возникнуть условия, способствующие смещению частиц к периферии потока и их зависанию на стенках скважины и обсадных труб (см. рис. 8.16–8.22). Вероятность пробкообразования в турбулентном потоке увеличивается с ростом размеров гравийных частиц и уменьшении коэффициента их формы. Поэтому в первую очередь налипнуть на стенки скважины и обсадных труб должны частицы неправильной формы наиболее крупной фракции гравия, используемого при засыпке. Увеличение степени турбулизации, а также площади сечения потока гравийной смеси позволяет уменьшить вероятность пробкообразования, но не устраняет его, так как для исключения возможного зависания частиц кольцевой зазор скважины должен быть более 0,5 м, что не соответствует установленным требованиям к конструкциям скважин.

В связи с тем, что турбулентный режим движения гравийной смеси не устраняет (в большинстве случаев) горизонтального смещения частиц от центра к периферии потока, их налипания на стенки скважины, особую важность приобретает вопрос оценки устойчивости образующихся первичных структур гравийной пробки к разрушению в турбулентном потоке. Предположим, что за счет смещения гравийных частиц к периферии потока образовалась гравийная пробка. Тогда на каждую точку устойчивого свода равновесия действуют моменты  $M_1$  и  $M_2$  от статической и гидродинамической нагрузки, уравновешивающие друг друга (см. рис. 8.20, б).

Известно, что турбулентный поток характеризуется наличием пульсирующей продольной составляющей скорости потока, т.е. на некотором интервале потока, равном размеру вихря, мгновенные скорости увеличиваются, но согласно условию постоянства расхода жидкости в процессе закачки гравия, на противоположном от центра потока интервале мгновенная скорость вихря уменьшается на такую же величину (при равенстве площадей сечения, возросшего и уменьшающегося по скорости вихря). За счет мгновенного изменения скоростей потока относительно центра симметрии свода возникает дополнительный момент  $\Delta M$ , стремящийся повернуть свод образовавшейся пробки. Согласно гипотезе М.М. Протодяконова устойчивый контур равновесия в сыпучих породах будет разрушаться при выполнении условия

$$\Delta M > M_{1,2}. \quad (8.53)$$

В начальный период образования гравийной пробки статической нагрузкой, действующей на свод пробки от веса вышележащих гравийных частиц, можно пренебречь. Тогда из уравнения моментов для центра симметрии свода равновесия получим величину отношения приращения гидродинамической нагрузки  $\Delta F_{гд}$  за счет мгновенного изменения скоростей потока к гидродинамической нагрузке  $F_{гд}$  от поля осредненных скоростей потока, при котором гравийная пробка в турбулентном потоке будет разрушаться, т.е. справедливо выражение

$$\frac{\Delta F_{гд}}{F_{гд}} \geq 0,25 \frac{j}{x}. \quad (8.54)$$

Приняв, что мощность турбулентного вихря в 4 раза меньше сечения потока, что наблюдается при развитом турбулентном режиме, преобразуем выражение (8.54)

$$\frac{\Delta F_{гд}}{F_{гд}} \geq 0,5. \quad (8.55)$$

Сила гидродинамического давления на свод пробки пропорциональна квадрату скорости потока и поэтому справедливо следующее соотношение

$$\frac{\Delta u^2}{\bar{u}^2} \geq 0,5, \quad (8.56)$$

или

$$\Delta u \geq 1,41 \bar{u}, \quad \Delta u = \bar{u}_b - \bar{u}. \quad (8.57)$$

Из выражения (8.57) следует, что структура гравийной пробки, при принятом (согласно М.М. Протодьяконову) запасе устойчивости, будет всегда разрушаться, если мгновенная скорость потока превышает осредненную скорость в 1,41 раза. Известно, что при развитом турбулентном режиме движения потока мгновенные скорости могут в два и даже более раз превышать средние. Следовательно, в начальный период образования пробка будет всегда разрушаться.

При увеличении высоты гравийной пробки, образовавшейся в кольцевом пространстве скважины, статическая составляющая нагрузки от веса вышележащих гравийных частиц на свод равновесия растет и соответственно снижается роль дополнительной составляющей гидродинамической нагрузки, возникающей за счет наличия пульсации скоростей потока. При определенной высоте гравийной пробки она не будет подвержена разрушению в турбулентном потоке. Для определения критической высоты гравийной пробки, при которой она сохраняет свою устойчивость, запишем выражение (8.55) с учетом статической нагрузки  $F_{ст}$

$$\frac{\Delta F_{гд}}{F_{гд} + F_{ст}} \geq 0,5. \quad (8.58)$$

Учитывая, что мгновенные скорости турбулентного потока могут примерно в 2 раза превышать средние и величина  $\Delta F_{гд}$  согласно уравнению (8.50) будет достигать значений, в 4 раза превышающих  $F_{гд}$ , получим критическое соотношение между статической и гидродинамической нагрузками на свод равновесия гравийной пробки

$$F_{ст} = 7F_{гд}. \quad (8.59)$$

Подставляя в выражение (8.36) значения  $F_{ст}$  и  $F_{гд}$ , определенные выше, и решая уравнение относительно критической длины гравийной пробки, при которой она не подвержена разрушению в турбулентном потоке, получаем

$$L_{кр} = \frac{7\psi Q^2}{\pi g(\rho_n / \rho - 1)(1 - e)}, \quad (8.60)$$

где  $e$  — пористость гравийной пробки.

При увеличении высоты пробки выше  $L_{кр}$  ее устойчивость в соответствии с формулой (8.60) будет расти и работы по ликвидации пробкообразования в кольцевом пространстве скважины осложнятся.

### 8.3.2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В практике изучения гидравлических явлений очень широко распространен метод экспериментальных исследований, позволяющий оценить комплекс факторов, определяющих тот или иной процесс в условиях, доступных для визуального контроля. Ниже приведены материалы экспериментальных исследований процессов сооружения гравийных фильтров на лабораторной модели. В ходе проведения эксперимента исследовали механизм пробкообразования в процессе транспортировки гравия в вертикальном потоке.

В основу экспериментальных исследований процесса сооружения гравийного фильтра в скважине легли теоретические разработки автора. Основная задача при проведении эксперимента — проверка правомерности теоретических выводов, их корректировка в соответствии с данными, полученными в лабораторных условиях. Большое внимание уделялось выявлению дополнительных факторов, влияющих на процесс сооружения гравийного фильтра в скважине, оценить которые на основании теоретических исследований сложно.

#### Общие принципы построения модели

При исследовании гидравлических процессов на лабораторной модели необходимо максимально приблизить условия проведения эксперимента к практическим условиям, так как только при соблюдении подобия природы и модели возможно изучение практических вопросов на основании данных, полученных на модели.

В гидравлике известны геометрическое и гидродинамическое подобия природы и модели. Геометрическое подобие предполагает определенное постоянное соотношение между геометрическими размерами природы и модели, которое выражается коэффициентом подобия. Обеспечить геометрическое подобие при построении модели гораздо проще, чем гидродинамическое. Гидродинамическое подобие выражается критериями подобия, которые устанавливают соотношение между преобладающими в потоке силами. При преобладании в потоке сил трения и инерции моделирование осуществляют по критерию Рейнольдса, сил тяжести и инерции — по критерию Фруда, сил трения и тяжести — по критерию Стокса, сил перепада давления и инерции — по критерию Эйлера, сил трения и перепада давления — по критерию Лагранжа. Существуют критерии подобия Сен-Венана — Ильюшина, Струхала и другие, позволяющие учесть также силы пластичности, поверхностного натяжения для стационарного и не-

стационарного режимов. Соблюдение гидродинамического подобия по одному из критериев предполагает его нарушение по всем остальным. В этой связи чрезвычайно важно при построении модели выбрать критерий подобия, который учитывает все действующие в потоке силы, влияющие на изучаемый процесс.

Пробкообразование в скважине зависит от соотношения трех сил, две из которых были впервые предложено учитывать автором. Введение двух новых сил, горизонтальной составляющей силы гидродинамического давления (сопротивления) на частицу и второй составляющей силы Жуковского, определяющейся формой частицы, осложняет выбор для моделирования процесса пробкообразования известных критериев подобия, так как их применение не позволяет выявить соотношение между силами Жуковского и гидродинамического давления для натуры и модели. Рассмотрим вопрос разработки критерия подобия, позволяющего моделировать процессы перемещения частиц в поперечном сечении потока под воздействием предложенных выше сил. Основными параметрами, определяющими процесс пробкообразования согласно формулам (8.21), (8.22), (8.49) и (8.50), следует считать разницу квадратов скоростей обтекания частицы по противоположным от оси симметрии потока сторонам, среднюю скорость потока  $\bar{u}$ , крупность  $d$  и коэффициент формы гравийных частиц  $k$ , характеристики несущей гравий среды  $v$ , режимы движения гравийной смеси  $Re$ , площадь кольцевого пространства скважины  $w_{\text{кп}}$ , площадь поверхности и высота образовавшейся гравийной пробки  $L$ . Учитывая, что разницу квадратов скоростей обтекания частиц гравия по противоположным от вертикальной оси симметрии сторонам можно выразить через градиент скорости по сечению потока  $\text{grad } \bar{u}$  и среднюю скорость потока, запишем процесс пробкообразования в скважине как функцию следующих параметров:

$$y = f(\text{grad } \bar{u}; \bar{u}; k; d; Re; w_{\text{кп}}, L, v). \quad (8.61)$$

Для обеспечения достоверности изучаемого на модели процесса пробкообразования необходимо, чтобы параметры гравийной засыпки, записанные в формуле (8.61), в натуре и на модели были подобны.

Геометрическое подобие натуры и модели будет соблюдено, если отношение размеров скважины и модели будет постоянно. Пусть величина кольцевого зазора скважины —  $\Delta S$ , диаметр скважины —  $D_0$ , а диаметр фильтра —  $D_{\text{ф}}$ , тогда для натуры и модели получим



$$\frac{D_{0н}}{D_{0м}} = \frac{D_{фн}}{D_{фм}} = \frac{\Delta S_n}{\Delta S_m} = \text{idem.} \quad (8.62)$$

Соответственно справедливо и подобие площадей кольцевого пространства натуры и модели

$$\frac{w_{кп.н}}{w_{кп.м}} = \text{idem.} \quad (8.63)$$

Очевидно, размеры частиц гравия и сечения потока, в котором они перемещаются для натуры и модели, также должны быть подобны. Поэтому с учетом постоянного для модели и натуры коэффициента формы частиц

$$J = \frac{d}{D_0 - D_\phi} = \frac{d}{\Delta S} = \text{idem.} \quad (8.64)$$

Выражение (8.64) представляет собой геометрический критерий подобия, принятый при построении лабораторной модели. Критерий гидродинамического подобия процессов возникновения и разрушения гравийных пробок в потоках различного направления для натуры и модели, позволяющий максимально приблизить условия эксперимента к практическим, был получен на основании формул (8.61) и (8.64) методом анализа размерностей. Критерий гидродинамического подобия  $D$  для начального периода образования и разрушения гравийной пробки выразим через основные факторы, влияющие на пробкообразование и постоянные коэффициенты, известные из  $\pi$ -теоремы. Для критерия подобия Рейнольдса справедливо следующее выражение:

$$D = \frac{\text{Re}}{(\text{grad } \vec{v}) q_{1\vec{u}} q_{2\Delta S} q_{3g} q_{4\vec{d}} q_5}. \quad (8.65)$$

Решим уравнение (8.65) по известной из  $\pi$ -теоремы методике и получим значения коэффициентов  $q_1$ ;  $q_2$ ;  $q_3$ ;  $q_4$ ;  $q_5$ . Окончательно выражение для определения критерия гидродинамического подобия натуры и модели принимает вид

$$D = \text{Re} \frac{\text{grad } \vec{v} \vec{u} w_{кп}}{g \vec{d}^3} = \frac{\vec{u}^2 \text{grad } \vec{v} w_{кп} \Delta S}{D g \vec{d}^3}. \quad (8.66)$$

Подобие произведения средней скорости потока  $u$ , изменения скорости по сечению потока  $\text{grad } v$  и площади сечения потока  $w_{кп}$ , отнесенное к произведению куба диаметра гравийной частицы  $\vec{d}^3$  на ускорения свободного падения  $g$ , обеспечивает подобие активных сил, действующих на частицу в ламинарном потоке, а следовательно, и процесс пробкообразования. Для турбулентного потока перемещение частиц определяется, с одной

стороны, полем осредненных скоростей, а с другой — полем вихревых скоростей. Активная нагрузка на частицу от осредненного поля скоростей турбулентного потока выражается, как и для ламинарного потока, произведением  $(\text{grad } v w_{\text{кл}})/gd^3$ . Влияние вихревого поля скоростей на перемещение частицы в поперечном сечении потока, а также устойчивость сформировавшейся гравийной пробки учитывается через критерий подобия Рейнольдса  $Re$ .

Кроме геометрического и гидродинамического подобия в процессе сооружения гравийного фильтра в скважине и на модели необходимо соблюдать также подобие технологических операций. Назовем это подобие технологическим. Технологическое подобие применительно к процессу пробкообразования и гидравлической классификации частиц в поперечном сечении потока предполагает постоянное значение концентрации гравия  $c$  и коэффициента формы  $k$  частиц в потоке, в натуре и на модели:

$$T = \frac{c_n k_n}{c_m k_m} = \text{idem.} \quad (8.67)$$

Сопоставляя значения геометрического, гидродинамического и технологического подобия, определяемые в формулах (8.64), (8.66) и (8.67) отметим, что критерий гидродинамического подобия предполагает и геометрическое подобие потока, так как в выражение (8.66) включена величина, обратная критерию геометрического подобия  $J$ , равная отношению величины кольцевого пространства скважины к диаметру гравийной частицы. Учитывая, что осуществлять моделирование сразу по трем параметрам сложно, выведем обобщенный критерий подобия, позволяющий учесть как геометрическое, так гидродинамическое и технологическое подобия. Вводя в равенство (8.66) значения коэффициента формы гравийных частиц и концентрации гравия в потоке, получаем обобщенный критерий подобия натуре и модели, на основании которого осуществлялась разработка лабораторной модели и методики проведения эксперимента,

$$G = \frac{Re \text{grad } \bar{v} \bar{u}}{J g d} T = \frac{\text{grad } \bar{v} \bar{u}^2 w_{\text{кл}} \Delta S k}{v g d^3 C}. \quad (8.68)$$

Увеличение произведения сомножителей в числителе формулы (8.68), а также уменьшение сомножителей в знаменателе снижает вероятность пробкообразования в скважине. Это свидетельствует о наличии некоторого критического значения обобщенного критерия подобия. Ведение работ при значениях  $G$  меньших критических сопровождается пробкообразованием, а выше критических обеспечивает надежную транспортировку гравия в зону фильтра.

### **Пробкообразование при различных способах доставки гравия в зону фильтра**

Исследование пробкообразования проводили на лабораторной модели, построенной на основании равенства (8.68), с учетом типовых конструкций скважин. Кольцевое пространство скважины имитировалось двумя стеклянными коаксиально установленными трубами длиной 2200 мм. Внутренний диаметр трубы, имитирующей стенки скважины или обсадных труб, принимался равным 150 мм. Наружный диаметр трубы, имитирующей эксплуатационную (фильтровую) колонну, менялся от 100 до 50 мм. Максимальный диаметр внутренней стеклянной трубы выбирался (с учетом типовых межтрубных зазоров между стенками эксплуатационной и обсадной колонн) для скважин, пробуренных с прямой промывкой и ударно-канатным станком, а минимальный — для скважин, пробуренных с обратной промывкой, а также для участка расширения скважины в зоне установки фильтра.

#### *Пробкообразование в восходящем потоке в кольцевом пространстве скважины*

Восходящий поток жидкости в кольцевом пространстве скважины возникает при следующих способах закачки гравия в скважину:

- в восходящем потоке через кольцевое пространство скважины;
- через вспомогательную колонну труб, спущенную в кольцевое пространство скважины;

- через вспомогательную колонну труб и распределительный узел по методике ПСО «Востокбурвод»;

- по методике фирм «Бейкер» и «Лайенс» при нарушении герметизации кольцевого пространства скважины;

- гидровмыве каркаса фильтра в предварительно закачанный в скважину гравий.

Отличительная особенность технологии сооружения гравийных фильтров в скважине при наличии восходящего потока в кольцевом пространстве — малая скорость восходящего потока, ограниченная возможностью выноса гравийных частиц на поверхность при их гидравлической крупности меньшей, чем скорость потока. Скорость потока при размерах гравийных частиц 1,5–2 мм не должна превышать 0,1 м/с. Закон распределения скоростей по поперечному сечению потока описывается параболой вида

$$\bar{u} = a\bar{u}(1 - j^2). \quad (8.69)$$

Дифференцируя уравнение (8.69) по  $dj$  и подставляя результат в выражение для нахождения значений критерия гидродинамического подобия (8.68) и исключая из полученного постоянный коэффициент  $a$  для ламинарного потока, получаем

$$G = \frac{\bar{u}^3 w_{\text{кп}} \Delta S k}{v g \bar{d}^3 c}. \quad (8.70)$$

Принимая во внимание, что средняя скорость восходящего потока равна 0,1 м/с, в качестве жидкости-носителя используют воду, с учетом типовых конструкций скважин получаем значение  $G$  для натуры, составляющее  $0,38 \cdot 10^3$ . Решая равенство (8.70) при условии  $G = 0,38 \cdot 10^3$ ;  $w_{\text{кп}} = 9,81 \cdot 10^{-3}$ ;  $\Delta S = 0,025$ ;  $v = 1 \cdot 10^{-2}$ , получаем соотношение между средней скоростью потока  $\bar{u}$  и диаметром гравийных частиц. Средний диаметр гравия, который необходимо использовать на модели, получим из уравнения (8.70). На основании полученного размера гравия  $\bar{d} = 0,0015 \div 0,002$  м была найдена средняя скорость восходящего потока на модели, равная 0,09 м/с. При установлении в кольцевом пространстве восходящего потока со средней скоростью 0,09 м/с осуществлялась засыпка гравия среднего диаметра 0,0015 в пространство между двумя стеклянными трубами. В процессе засыпки часть гравийного материала осаждалась, часть выносилась из кольцевого пространства модели, а некоторые частицы зависали в восходящем потоке, образуя подобие облака. С увеличением объема засыпаемого гравия плотность облака зависших частиц увеличивалась, а количество гравия, выносимого из кольцевого пространства, сначала постепенно уменьшилось, а затем резко прекратилось. Спустя некоторое время в межтрубном пространстве из облака скопления частиц определенной фракции образовалась гравийная пробка, нижняя поверхность которой приняла форму арки. Под гравийной пробкой образовалась пустота, т.е. гравийный фильтр в восходящем потоке намылся не в зоне установки фильтра-каркаса, а в кольцевом пространстве над сформировавшейся пробкой. Лишь незначительный объем наиболее крупных фракций гравия преимущественно правильной формы осаждался в начальный период закачки у башмака фильтра-каркаса.

Восходящим потоком выносился гравий размером менее 0,5 мм. Однако в вынесенном материале были частицы более крупных фракций (до 1 мм) правильной, окатанной формы. Анализ материала, слагающего гравийную пробку, показал, что он состоит из частиц размером до 0,8 мм.

Описанный опыт подтверждает выдвинутый ранее первый вариант пробкообразования, согласно которому в кольцевом пространстве скважины пробка образуется за счет постепенного повышения концентрации частиц гравия определенной крупности на некотором участке потока.

Аналогичные опыты были проведены при средних скоростях восходящего потока соответственно 0,07; 0,05; 0,03 и 0,015 м/с. В отличие от первого опыта, сформировавшаяся гравийная пробка в кольцевом пространстве при меньших скоростях потока состояла из более мелких фракций гравия. При  $\bar{u} = 0,05$  м/с диаметр частиц пробки не превышал 0,0005 м, а для  $\bar{u} = 0,03$  м/с — 0,004 м. Необходимо отметить, что при уменьшении скорости восходящего потока процесс формирования гравийной пробки затягивался и при  $\bar{u} = 0,015$  м/с  $D = 0,08$  гравийная пробка не сформировалась и только незначительная часть гравийных частиц налипла на стенках скважины над кольцом, имитирующим муфту эксплуатационной колонны. При прекращении подачи жидкости в модель зависшие частицы оседают на поверхности гравийного фильтра.

Из проведенных опытов следует, что в восходящем потоке образование пробок протекает двумя путями. При наличии в гравийном материале, используемом при засыпке, частиц с гидравлической крупностью, равной средней скорости потока, наблюдаются их зависание в определенном интервале, постепенное увеличение концентрации частиц и затем пробкообразование.

Опыт при средней скорости в кольцевом пространстве модели  $u = 0,0015$  м/с показал, что при отсутствии в гравийном материале частиц гидравлической крупности, близкой к средней скорости потока, часть частиц вытянутой, неправильной формы зависает на стенках скважины. Очевидно, с увеличением концентрации частиц неправильной формы в материале засыпки, что наблюдается при засыпке гравия больших, чем на модели, объемов, за счет налипания частиц на стенки колонны вероятность пробкообразования увеличивается. Это предположение было подтверждено экспериментально. В восходящем потоке жидкости в межтрубное пространство модели засыпался гравий и из пристенных областей отбирались частицы неправильной формы.

При отборе частиц неправильной формы ( $k < k_{\text{KD}}$ ) в объеме, достаточном для гравийной засыпки, на модели провели следующий опыт. В кольцевое пространство модели в восходящий поток подавался только гравий неправильной формы. В процессе эксперимента на направляющем фанаре была получена гравийная пробка, не разрушавшаяся при остановке и повторном включении циркуляции воды на модели. Образование пробок по пер-

второму варианту протекает гораздо быстрее, чем по второму, и поэтому первый вариант — доминирующий для восходящих потоков.

Избежать пробкообразования по первому варианту на первый взгляд можно, если использовать при засыпке гравийный материал гидравлической крупностью большей, чем скорость потока на любом интервале движения гравийной смеси. Однако, как было доказано выше, гидравлическая крупность определяется не только средним размером, но и формой частиц. В любом материале засыпки имеются частицы гидравлической крупности меньшей или равной скорости восходящего потока, и частицы неправильной формы даже при значениях  $k > k_{кр}$  могут застрять в потоке, способствуя пробкообразованию. Кроме этого, на практике соосно установить эксплуатационную колонну внутри стенок скважины или обсадных труб невозможно.

Эксплуатационная колонна на некоторых участках скважины приближается к стенкам скважины, а иногда и контактирует с ними. Из теории промывки скважин известно, что при определенном приближении колонны к стенкам скважины образуется застойная зона, восходящий поток в которой отсутствует. Поэтому по мере приближения эксплуатационной колонны к стенкам скважины будет изменяться активная площадь сечения потока и соответственно его средняя скорость. На участках скважины, где застойная зона наиболее велика, средняя скорость восходящего потока значительно возрастает, что увеличивает вероятность пробкообразования.

Предположение, что несоосность установки фильтровой колонны в скважине влияет на пробкообразование, подтвердилось опытом. Внутренняя стеклянная труба была установлена на расстоянии 1,5 см от внутренней поверхности большой трубы. При засыпке гравия при значениях  $u = 0,015$  м/с сформировалась гравийная пробка, получить которую при центрированной установке внутренней трубы при тех же значениях расхода и том же гравийном материале невозможно.

Правомерность первой гипотезы пробкообразования подтвердилась на экспериментальной скважине. При закачке гравия по методике ПСО «Востокбурвод» над выпускными отверстиями надфильтровой трубы образовалась гравийная пробка, а проволочный фильтр почти не обсыпался и непосредственно контактировал с песком водоносного пласта. В начальный период образования пробки из скважины выносились мелкие фракции гравия, а средние зависали над фильтром. На втором этапе концентрация зависших гравийных частиц увеличилась до критических значений. В этот момент мелкие частицы были лишены возмож-

ности мигрировать через более крупные и выноситься на поверхность. При «цементации» мелкими частицами облака из частиц гравия средних фракций образовывалась пробка, которая не разрушалась при остановке и повторном пуске насоса.

Аналогичные сведения об образовании гравийных пробок в восходящем потоке жидкости были получены автором совместно с сотрудниками на геотехнологических скважинах в Средней Азии. Гравий закачивали в скважину через вспомогательную колонну труб, спущенную в кольцевое пространство. По мере закачки над фильтром-каркасом образовалась гравийная пробка, которая разрушилась в процессе эксплуатации, о чем свидетельствовало резкое проседание уровня гравийного материала (около 10 м), намытого в кольцевое пространство скважины.

Для проверки правомерности второй гипотезы пробкообразования для восходящего потока, согласно которой частицы неправильной формы смещаются к границам потока, налипая на стенку и формируя таким образом гравийные пробки, была проведена серия экспериментов. В кольцевое пространство модели устанавливали специальное устройство, состоящее из коаксиально установленных на перфорированном металлическом кольце, обтянутом латунной сеткой, и патрубков длиной 0,150 м. В процессе осаждения гравийных частиц они попадали в межтрубные зазоры между патрубками. Анализ формы частиц, отложившихся в каждом межпатрубковом зазоре, позволяет судить о распределении частиц гравия в поперечном сечении потока в зависимости от их формы (рис. 8.23, *a*).

Хорошо окатанные частицы гравия ( $k = 0,8 \div 1$ ) движутся в центральных сечениях потока. При уменьшении коэффициента формы частиц они смещаются к границам потока. Между стенками скважины и центральным сечением потока откладываются частицы гравия со средним коэффициентом формы 0,7, а между стенками фильтра и центральным сечением потока — 0,6. Частицы наиболее неправильной формы движутся и зависают у фильтровой колонны, а не у стенок скважины. Это объясняется тем, что эпюра скоростей в кольцевом пространстве скважины не носит симметричный характер, как было принято ранее. Градиент скорости у фильтровой колонны выше, чем у стенок скважины, и поэтому, согласно уравнению (8.21), частицы неправильной формы быстрее смещаются к фильтру, чем к стенкам скважины.

Во всех опытах, проведенных при ламинарном режиме движения восходящего потока, отмечалось, что центральные сечения занимают более крупные фракции гравия правильной формы, а периферийные сечения — более мелкие. Эти результаты хорошо подтверждаются данными экспериментов, проведенных А.Е. Смол-

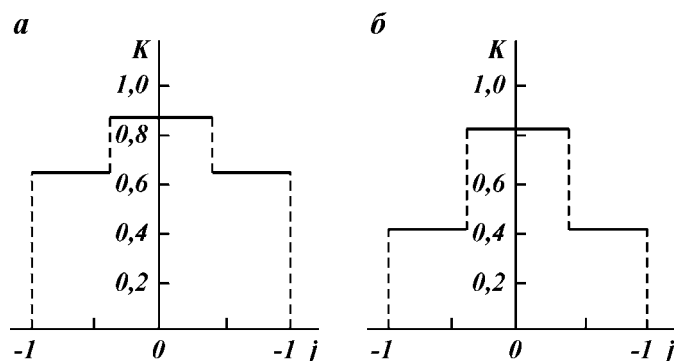


Рис. 8.23. Диаграммы распределения частиц гравия в поперечном сечении потока от формы

дыревым. Частицы правильной формы больших размеров занимают центральные сечения потока быстрее, чем более мелкие, что хорошо объясняется уравнением (8.16). Чем больше размер гравийной частицы, тем больше перепад давления на противоположных от вертикальной оси симметрии ее сторонах и соответственно больше усилие, смещающее частицы правильной формы к центру. Поэтому крупные частицы быстрее занимают центральные сечения потока, чем мелкие. Частицы неправильной формы крупных фракций быстрее занимают периферийные сечения потока.

Следовательно, частицы крупных фракций гравия быстрее распределяются по поперечному сечению потока в зависимости от формы, чем более мелкие. Перемещение в горизонтальной плоскости мелких фракций затрудняется наличием препятствий из крупных частиц гравия, уже занявших определенное положение в потоке, соответствующее их форме (см. рис. 8.16). Поэтому в эксперименте при изучении горизонтального перемещения частиц в потоке в зависимости от их формы исключение из правила составляли только мелкие фракции гравия. Так, часть частиц неправильной формы (около 5 %) двигалась в центральных сечениях потока, а некоторые мелкие частицы правильной формы — в периферийных сечениях.

Очевидно, что с увеличением длины модели (и соответственно времени движения частиц) все частицы в ламинарном восходящем потоке независимо от крупности займут строго определенное положение.

Проведенные опыты позволили выявить критерии пробкообразования в ламинарном восходящем потоке. Пробкообразование



наблюдаться не будет (первая гипотеза), если концентрация  $c$  гравийных частиц, зависящих в кольцевом пространстве скважины, в общем объеме гравия меньше некоторых критических значений

$$c < c_{кр1}. \quad (8.71)$$

Пробкообразование наблюдаться не будет (второй вариант), если при  $k < k_{кр}$  не превышает допустимых значений

$$c < c_{кр2}. \quad (8.72)$$

Значения  $c_{кр1}$  и  $c_{кр2}$  были выражены через размеры кольцевого пространства скважины. Оказалось, что критические значения концентрации некондиционного по размерам и форме гравия соответствуют 8—9 и количествам частиц, укладываемым в поперечном сечении потока. Поэтому число некондиционных гравийных частиц, используемых при закачке гравия,

$$c < 8 \div 9 \frac{D_k^2 - D_\Phi^2}{d^2}. \quad (8.73)$$

С учетом конструкций скважин на воду объем некондиционных по форме и размерам гравийных частиц, при котором не будет пробкообразования, не превышает десятых долей процента от общего объема гравия, используемого при засыпке. Очевидно, что такой качественной сортировки гравия по крупности и форме осуществить при современной технологии невозможно, поэтому способы сооружения гравийных фильтров в скважине при наличии восходящего потока в кольцевом пространстве применять не следует.

#### *Пробкообразование в нисходящем потоке в кольцевом пространстве скважины*

Пробкообразование в нисходящем потоке жидкости возникает за счет зависания частиц неправильной формы у границ потока, а затем — у слоя уже зависших частиц. Гравийная пробка формируется начиная от границ потока в направлении к его центру (вторая гипотеза пробкообразования). Это положение было проверено автором в лабораторных условиях.

В кольцевом пространстве скважины устанавливался нисходящий поток воды согласно критериям подобия  $G = 0,1 \cdot 10^3 \div 0,4 \cdot 10^4$ , что соответствовало ламинарному режиму движения смеси ( $Re < 200$ ). Процесс осаждения частиц гравия в нисходящем по-

токе контролировали визуально через стеклянную трубу. Во всех четырех опытах при использовании гравийной смеси исходного гранулометрического состава пробкообразования получить не удалось. Однако часть частиц зависала на границах потока. Особенно крупное скопление частиц наблюдалось на пластмассовом патрубке, имитирующем муфту фильтровой колонны. Зависшие частицы были вытянутой, неправильной формы.

Исследовалось распределение частиц гравия в нисходящем потоке в зависимости от формы, для чего на стеклянную трубу, имитирующую фильтровую колонну, надевалось устройство из коаксиальных патрубков, описанное выше. Опыты показали, что частицы неправильной формы в нисходящем потоке движутся в его периферийных областях, а правильной — в центральной области (рис. 8.23, б). Из графика следует, что частицы с коэффициентом формы меньшим 0,4 прижимаются к границам потока и зависают на них. Полученный опытным путем коэффициент формы превосходит найденные теоретическим путем значения  $k_{\text{кр}} = 0,31$ . Это расхождение объясняется, во-первых, погрешностью эксперимента, а во-вторых — приближенной аппроксимацией диаграмм распределения частиц (которые получены путем анализа частиц из межпатрубкового пространства устройства) в кривую распределения частиц на рис. 8.23, а.

Гравийный материал, используемый на модели, был классифицирован по форме. Для этого частицы, движущиеся в пристенных областях потока, отбирались.

Дальнейшие эксперименты проводились только с использованием гравия неправильной формы. Из четырех опытов в трех случаях была получена гравийная пробка, перекрывающая все кольцевое пространство модели. В одном эксперименте гравийная пробка перекрывала кольцевое пространство только с одной из сторон стеклянной трубы, имитирующей фильтровую колонну, а с другой стороны гравий осаждался на поверхности намываемого гравийного фильтра. Однако намываемый фильтр формировался только с одной из сторон внутренней стеклянной трубы.

Необходимо отметить, что все гравийные пробки, намываемые на модели, формировались в месте установки на внутренней стеклянной трубе пластмассового патрубка, имитирующего муфту фильтровой колонны, а нижний свод гравийной пробки после остановки насоса принимал форму арки. При критериях подобия  $G = 0,1 \cdot 10^3 \div 0,4 \cdot 10^3$  гравийные пробки не разрушались.

При использовании исходного (неклассифицированного по крупности) гравия пробкообразования удалось избежать. Это объясняется тем, что в кольцевое пространство модели попадали гравийные частицы неправильной формы меньше критических

значений. При использовании в процессе сооружения гравийного фильтра частиц только неправильной формы образование пробок наблюдалось во всех четырех опытах. Итак, если относительный объем частиц неправильной формы (используемого на модели исходного гравия) составил 0,42, то при увеличении объемов засыпаемого исходного гравия в 2,1 раза, количества некондиционных по форме частиц в этом объеме было бы достаточно для пробкообразования.

Учитывая, что длина эксплуатационных фильтров скважин на воду минимум в 5 раз превышает длину фильтра на модели, можно утверждать, что в кольцевом пространстве скважины будут образовываться пробки. Причем некоторая часть фильтра будет обсыпана нормально. Такая засыпка гравия будет наблюдаться до тех пор, пока в скважину не поступит критическое количество некондиционных по форме частиц. Приняв во внимание результаты эксперимента, можно записать, что критический объем гравийных частиц неправильной формы

$$w_{кр} = 2,1l_{\phi}(D_k^2 - D_{\phi}^2). \quad (8.74)$$

Подставляя в формулу (8.74) значения длины фильтра на модели  $l_{\phi,м} = 2,2$  м, получаем

$$w_{кр} = 4,6(D_k^2 - D_{\phi}^2). \quad (8.75)$$

Необходимо отметить, что в зависимости от качества исходного гравия (окатанности частиц) постоянный коэффициент в формуле (8.75) может измениться в широких пределах. Так, при наличии в гравийном материале некондиционных по форме частиц в объеме 20 % (что на практике встречается очень редко) значение постоянного коэффициента в равенстве (8.75) достигает 11 м. В этой связи при оборудовании гравийного фильтра в скважине длиной более 11 м даже при высококачественном гравии пробкообразование неизбежно. При использовании обычного гравия пробкообразование наблюдается уже при длине фильтра более 5 м.

Учитывая, что способов классификации частиц гравия по форме нет, можно утверждать, что на практике при засыпке гравия в нисходящем ламинарном потоке гравийные пробки образуются в кольцевом пространстве скважины всегда после подачи критического объема частиц неправильной формы. Нижняя часть фильтра-каркаса перекрывается гравием, а после пробкообразования формирование гравийного фильтра прекращается и верхние отверстия фильтра-каркаса остаются оголенными. При ис-

пользовании на практике гравия, аналогичного используемого в опытах на модели, гравийный фильтр формируется только на высоту 4,62 м от забоя скважины. Эксперименты подтвердили выдвинутое ранее предположение о возможности формирования гравийных пробок в нисходящем и восходящем потоках. При наличии в потоках любого направления предпосылок для образования гравийных пробок первостепенное значение приобретает выбор таких режимов закачки гравийной смеси, при которых предупреждается пробкообразование за счет разрушения первичных структур гравийной пробки под воздействием турбулентных вихрей.

Серия опытов была посвящена оценке устойчивости гравийных пробок в кольцевом пространстве модели при различных скоростях движения потока воды. В теоретической части было показано, что при увеличении скоростей потока (степени его турбулизации) вероятность образования гравийных пробок уменьшается. В качестве основной причины уменьшения вероятности пробкообразования была выдвинута гипотеза о разрушении гравийных пробок под воздействием пульсирующих скоростей потока (скоростей единичных вихрей). Большинство исследователей связывают величину пульсационной скорости со степенью турбулизации потока. Попробуем выявить зависимость между характером разрушений гравийной пробки и обобщенным критерием подобия потока на модели и в натуре, позволяющем учесть влияние, с одной стороны, условий, способствующих образованию гравийных пробок, а с другой стороны, через параметр Рейнольдса  $Re$ , входящего в  $G$ , степень турбулизации потока.

Опыты проводились для различных зазоров между трубами в следующем порядке. В кольцевом пространстве на модели принудительно формировывали гравийные пробки различной мощности. Затем, постепенно открывая сливной кран и включая центробежный насос на модели, обеспечивали нисходящую фильтрацию жидкости через пробку с постепенным увеличением скорости нисходящего потока. Скорость потока, при которой происходило разрушение гравийной пробки в кольцевом пространстве модели, фиксировалась. Максимальная скорость потока ограничивалась конструкцией модели и составляла 1,65 м/с.

Первая серия опытов была проведена при внутреннем диаметре стеклянной трубы, имитирующей скважину,  $D_k = 0,15$  м и наружном диаметре фильтровой колонны  $D_\phi = 0,1$  м. Высота пробки составляла 0,3; 0,6; 0,9 и 1,2 м. При высоте гравийной пробки 0,3 и 0,6 м она разрушалась при средних скоростях нисходящего потока соответственно 1,5 и 1,55 м/с. Пробка высотой 0,9 и 1,2 м при максимальной скорости потока 1,65 м/с не раз-

рушалась. Средняя скорость нисходящего потока  $\bar{u}_{кр}$ , при которой происходило разрушение пробки, рассчитывалась как среднеарифметическое от результатов двух опытов  $\bar{u}_{кр1}$  и  $\bar{u}_{кр2}$ . Обобщенный критерий подобия, при котором разрушается гравийная пробка  $G = 3,1 \cdot 10^3$  (первая серия опытов).

Во второй серии опытов значения  $D_k$  и  $D_\phi$  составили соответственно 0,15 и 0,08 м. При мощности гравийной пробки 0,3; 0,6 и 0,9 м она разрушалась в нисходящем потоке при средних критических скоростях 1,25; 1,25 и 1,3 м/с. Критические значения обобщенного критерия подобия  $G = 3,15 \cdot 10^3$  (вторая серия опытов).

В третьей серии опытов при  $D_k = 0,15$  м и  $D_\phi = 0,05$  м гравийные пробки высотой 0,3; 0,6 и 0,9 м разрушались при средних скоростях нисходящего потока 0,9; 1 и 1 м/с соответственно. Гравийная пробка высотой 1,2 м, как и в первых двух сериях опытов, не разрушалась. Значения критических значений обобщенного критерия подобия  $G$ , при которых наблюдается разрушение первичных структур гравийных пробок, составляют в среднем  $3,0 \cdot 10^3$ .

Для максимального приближения условий проведения эксперимента к натурным условиям последняя серия опытов была проведена на экспериментальной скважине. Скважина была обсажена трубами диаметром 0,377 м с внутренним диаметром  $D_k = 0,357$  м. При эксперименте использовали фильтр с проволоочной обмоткой на перфорированном каркасе диаметром 0,168 м и наружным диаметром  $D_\phi = 0,17$  м. При высоте гравийной пробки 1 м она была разрушена нисходящим потоком средней скорости 0,5 м/с, что соответствовало подаче цементировочного агрегата ЦА-320 М 0,0375 м<sup>3</sup>/с.

Эксперименты показали, что разрушение первично сформировавшихся гравийных пробок происходит при  $G = 3,0 \cdot 10^3 - 3,15 \times 10^3$ . С увеличением площади кольцевого зазора, а следовательно, и гравийной пробки ее разрушение происходит при значительно меньших скоростях нисходящего потока. При скорости нисходящего потока 1,5–1,55 м/с разрушается пробка площадью  $9,8 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, а при  $\bar{u} = 0,9 \div 1$  м/с — площадью 0,02 м<sup>2</sup>. Критическая скорость возрастает от некоторых значений  $\bar{u}_{кр1}$ , обеспечивающих переход от ламинарного к турбулентному режиму движения гравийной смеси, а следовательно, и возникновения вихрей (способствующих разрушению гравийной пробки) до значений  $\bar{u}_{кр2}$ , при которых степень турбулизации при значениях скорости выше  $\bar{u}_{кр2}$  остается постоянной.

Увеличение скорости потока выше значений  $\bar{u}_{кр2}$  не влияет на характер разрушения гравийных пробок. Опыты показали, что значения находятся в пределах 1,5–1,55 м/с, при которых обеспечивается турбулизация потока, близкая к максимальной. Возникновение единичных вихрей в потоке происходит при скоростях движения смеси около 0,4 м/с.

Учитывая, что критические значения обобщенного критерия подобия известны и составляют  $G = 3,0 \div 3,15 \cdot 10^3$  и с учетом уравнения (8.70) и рис. 8.24, можно утверждать, что при увеличении размеров кольцевого пространства скважины до  $0,09 \div 0,1 \text{ м}^2$  пробкообразования можно избежать при закачке гравия со средней скоростью движения гравийной смеси около 0,4 м/с.

Три серии экспериментов показали, что разрушение гравийной пробки происходит только в случае, если ее высота не превышает критических значений. Это положение подтверждается теоретическими исследованиями автора. Однако в отличие от равенства (8.60), устанавливающего связь между критической высотой гравийной пробки и технологией закачки, опыты показали, что значения зависят от площади сечения пробки и средней скорости нисходящего потока. При  $w_{кп} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ Л} = 0,9 \text{ м}$ , а при увеличении  $w_{кп}$  до 0,02 критическая высота пробки увеличивается до 1 м.

На модели было изучено влияние соосности установки фильтровой колонны в скважине на равномерность укладки гра-

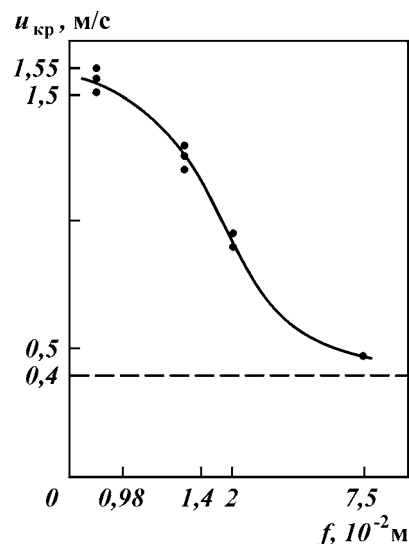


Рис. 8.24. Зависимость критической скорости нисходящего потока от площади поперечного сечения гравийной пробки

вийных частиц вокруг поверхности фильтра-каркаса. В процессе экспериментов внутренняя стеклянная труба устанавливалась на различном расстоянии от стенок наружной стеклянной трубы, имитирующей стенки скважины. В качестве параметра соосности установки фильтровой колонны в скважине принималось отношение минимального расстояния от центра симметрии фильтровой колонны до стенок скважины к максимальному  $\Phi$ . Результаты четырех опытов, полученные на модели при диаметре внутренней стеклянной трубы 100 мм при разных значениях  $\Phi$ , представлены ниже.

Отношение минимального кольцевого зазора к максимальному.....	0,5; 0,6	0,7	0,8
Характеристика обсыпки вокруг фильтра-каркаса	Обсыпка только с одной из сторон фильтра-каркаса	Обсыпка с одной из сторон; фильтр-каркас не полностью перекрыт гравием	Обсыпка равномерная

Проведенные опыты показали, что на равномерность гравийной обсыпки вокруг фильтра-каркаса в значительной степени влияет соосность установки фильтровой колонны в скважине. При определенном положении фильтровой колонны в скважине, назовем его критическим, гравий начинает осаждаться только с одной из сторон фильтра-каркаса, а с противоположной образуются пустоты. Дальнейшее приближение фильтровой колонны к близлежащей стенке скважины приводит к полному оголению фильтра-каркаса. Гравийная обсыпка будет равномерной вокруг фильтра-каркаса, если величина  $\Phi$  находится в пределах от 0,8 до 1,0. Уменьшение  $\Phi$  до значений меньших 0,8 (третий опыт) приводит к образованию пустот в гравийном фильтре, которые свидетельствуют о его неудовлетворительном качестве.

### 8.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ НАМЫВА ГРАВИЙНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

При сооружении гравийных фильтров в скважинах глубиной более 50 м основная сложность заключается в обеспечении надежной доставки гравия с поверхности на забой и его компактной и равномерной укладки вокруг каркаса фильтра. В предыдущем параграфе были обоснованы режимы транспортировки смеси в скважине, исключая возможность пробкообразования и сводящиеся к необходимости создания высоких скоростей движения потока при турбулентном режиме и критерии подобия

$G > 3,0 \cdot 10$ . Заданные режимы транспортировки гравийной смеси на всех этапах от устья до забоя обеспечиваются при комбинированной циркуляции в скважине. Над каркасом фильтра устанавливают распределительный узел, соединенный верхним торцом с колонной бурильных труб, выведенной на поверхность, а нижним — со вспомогательной колонной, башмак которой располагают под нижними отверстиями каркаса фильтра.

Гравийную смесь подают через бурильные трубы к распределительному узлу и в затрубное пространство скважины непосредственно над интервалом формирования фильтра. За счет высоких скоростей движения смеси в бурильных трубах пробкообразование исключается и обеспечивается надежная доставка гравия в заданную зону. После прохождения распределительного узла смесь поступает в кольцевое пространство скважины, расширенное в интервале установки фильтра до расчетного диаметра. За счет высокой площади сечения кольцевого пространства в расширенном стволе скважины и высоких скоростей нисходящего потока в интервале формирования фильтра наблюдается компактная и плотная укладка зерен гравия, обеспечивающая высокое качество оборудования скважины.

Гравий укладывается в каверне, в жидкость-носитель фильтруется через каркас фильтра и по вспомогательной колонне через распределительный узел, кольцевое пространство между фильтровой, бурильной и обсадной колоннами поднимается на поверхность. При намыве фильтра мелкие примеси и кольматант вымываются из обсыпки, обеспечивая тем самым ее высокое качество. Для повышения надежности работы фильтра создают запас гравия над верхними отверстиями каркаса фильтра высотой 5–10 м с учетом его проседания и возможного уплотнения при эксплуатации. В этой связи распределительный узел устанавливают, как правило, на высоте не менее 5 м над верхними отверстиями каркаса фильтра.

Для осуществления технологии намыва гравийных фильтров в различных горно-геологических условиях «Интер-Аква» и Русбурмаш разработаны три модификации скважинного инструмента.

При установке фильтровой колонны впотай следует применять устройство для сооружения гравийного фильтра в скважине УГФ модификации П, при сооружении многосекционного гравийного фильтра — модификации М. Если конструкцией скважины предусмотрено сооружение односекционного гравийного фильтра, при выводе фильтровой колонны на поверхность используют инструмент УГФ.

Сооружение односекционного гравийного фильтра в скважине, оборудованной фильтровой колонной, установленной впо-



тай с помощью инструмента УГФ-П (рис. 8.25). В скважину спускают отстойник с обратным клапаном секции фильтровой колонны и надфильтровую трубу расчетной длины. Инструмент фиксируют на устье с помощью хомута. На нижний торец УГФ-П наворачивают бурильные трубы длиной, соответствующей длине надфильтровой трубы и секций фильтровой колонны. Внутри фильтровой колонны спускают бурильные трубы и УГФ-П, которые соединяют с верхним торцом надфильтровой трубы (см. рис. 8.25, *а*). Верхний торец УГФ-П соединяют с бурильными трубами на которых инструмент плавно спускают в скважину. При задержках инструмента его проворачивают ключом. При достижении инструментом расчетной глубины отстойник встает на забой и на пакер УГФ-П передается разжимающее усилие, равное весу колонны бурильных труб. Пакер разжимается и герметизирует кольцевое пространство скважины между фильтровой и обсадной колоннами. Одновременно с распаковкой герметизируется кольцевое пространство между фильтровой и вспомогательной колоннами ниже закачных отверстий устройства (см. рис. 8.25, *б*).

Скважину промывают; в бурильные трубы на поверхности подают промывочную жидкость. По бурильным трубам жидкость в нисходящем потоке движется к УГФ-П, поступает в кольцевое пространство между фильтровой и вспомогательной колоннами, и через выпускные отверстия УГФ-П выходит в кольцевое пространство скважины между фильтровой и обсадной колоннами. При прохождении промывочной жидкости через интервал водоносного пласта она начинает фильтроваться через фильтр, из внутреннего пространства которого в восходящем потоке через вспомогательную колонну, опорные патрубки УГФ-П и кольцевое пространство скважины между бурильной и обсадной колоннами выше пакера УГФ-П поднимается на поверхность.

Итак, скважину промывают при комбинированной циркуляции (см. рис. 8.25, *в*). После промывки на поверхности в нагнетательную магистраль подают гравий, который закачивается в интервал формирования фильтра. Гравий откладывается в зафильтровом пространстве, а жидкость-носитель фильтруется через фильтр и по вспомогательной колонне через патрубки УГФ-П и кольцевое пространство между бурильными и обсадными трубами выше пакера УГФ-П поднимается к устью. Частично или полностью жидкость-носитель может поглощаться водоносным пластом.

При поглощении в качестве жидкости-носителя недопустимо использовать специальные растворы, приводящие к ухудшению фильтрационных свойств пласта. В этом случае необходимо

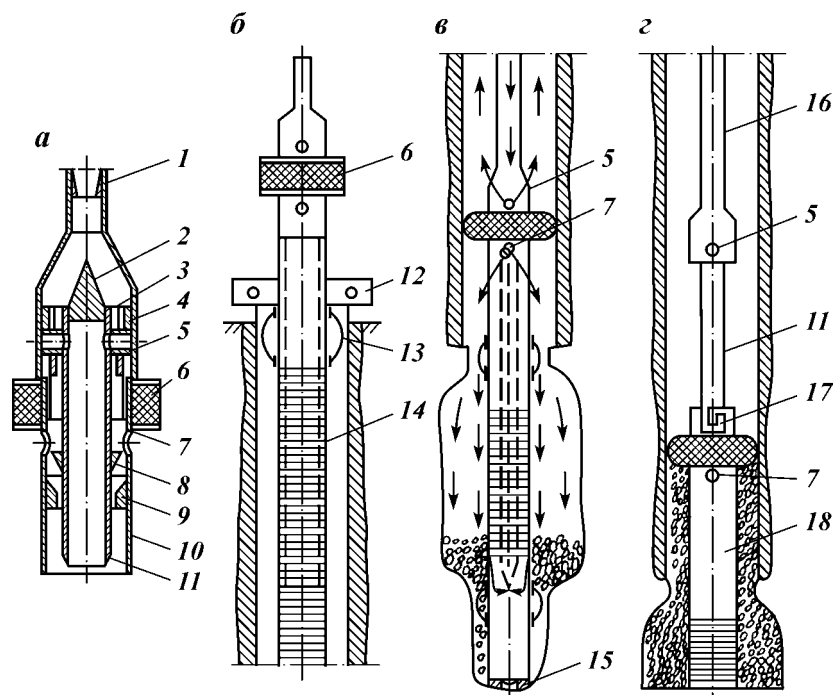


Рис. 8.25. Сооружение гравийного фильтра в скважине с установленной впотай фильтровой колонной:

1 – верхний торец УГФ-П; 2 – пробка; 3 – герметизирующая втулка; 4 – направляющая втулка; 5 – опорные патрубки; 6 – пакер; 7 – выпускные отверстия; 8 – конус; 9 – седло; 10 – переходник; 11 – вспомогательная труба; 12 – хомут; 13 – центраторы; 14 – фильтровая колонна; 15 – отстойник с обратным клапаном; 16 – буровая колонна; 17 – замковое соединение; 18 – надфильтровая труба

транспортировать гравий в воде, очищенной от инородных примесей. О заполнении гравием расчетного объема полости за фильтр свидетельствует резкое повышение давления в нагнетательной магистрали при перекрытии выпускных отверстий УГФ-П.

Инструмент взвешивают и проворачивают на 45–60°. При провороте опорные патрубки УГФ-П выходят из замкового соединения и инструмент поднимают на поверхность (см. рис. 8.26, г). При подъеме инструмента специальная втулка УГФ-П перекрывает выпускные отверстия УГФ-П, что обеспечивает требуемую герметизацию фильтровой колонны.

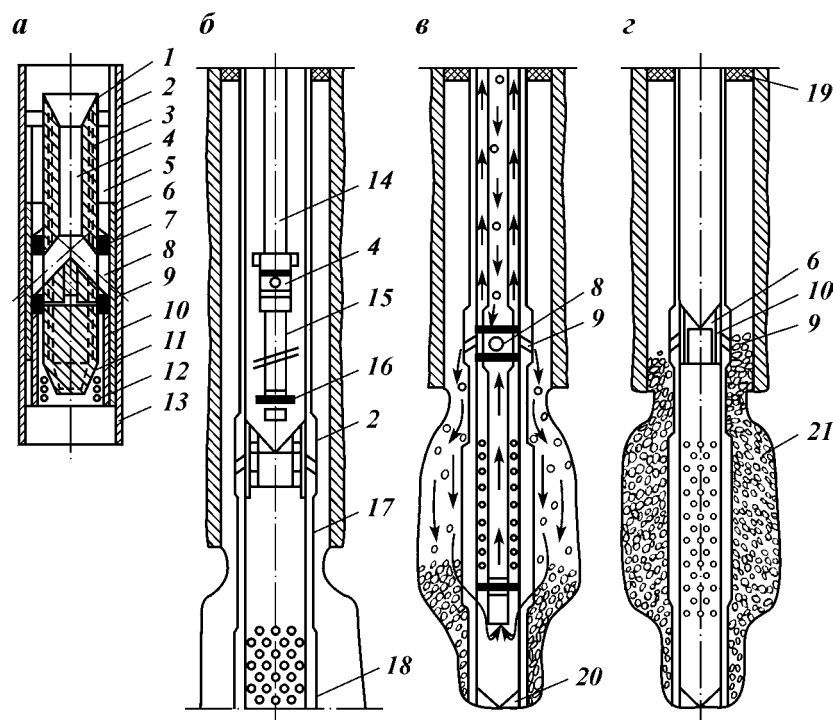
Сооружение односекционного гравийного фильтра в скважине, оборудованной фильтровой колонной, выведенной на по-

верхность с помощью инструмента УГФ показано на рис. 8.26. В скважину спускают отстойник с обратным клапаном 20, секции фильтровой колонны и надфильтровую трубу расчетной длины 17. Инструмент фиксируют на устье с помощью хомута. На надфильтровой трубе устанавливают муфту УГФ 2, после чего продолжают спуск фильтровой колонны 18, укомплектованной центраторами. Кольцевое пространство скважины между фильтровой колонной и кондуктором на устье герметизируют.

Внутри фильтровой колонны спускают бурильные трубы общей длиной, соответствующей длине секций фильтра и надфильтровой трубы. Бурильные трубы фиксируют на устье с помощью хомута или подкладной вилки. На бурильные трубы наворачивают распределительный узел УГФ. Распределительный узел УГФ 4 с присоединенной к его нижнему торцу вспомогательной колонной, представленной бурильными трубами, спускают внутрь фильтровой колонны на бурильных трубах 14. Спуск осуществляют плавно (см. рис. 8.26, а). При достижении распределительным узлом глубины установки муфты УГФ происходит фиксация инструмента, при которой закачные отверстия муфты УГФ открываются и совмещаются с закачными каналами распределительного узла.

Скважину промывают при комбинированной циркуляции. В бурильные трубы подают промывочную жидкость. По бурильным трубам жидкость в нисходящем потоке движется к распределительному узлу, через закачные каналы которого и закачные отверстия муфты УГФ поступает в кольцевое пространство скважины между фильтровой и обсадной колоннами. При прохождении нисходящего потока промывочной жидкости через интервал водоносного пласта она начинает фильтроваться через фильтр, из внутреннего пространства которого в восходящем потоке через вспомогательную колонну, распределительный узел УГФ и кольцевое пространство между фильтровой колонной и бурильными трубами поднимается к устью скважины.

В нагнетательную магистраль на поверхности подают гравий, который потоком жидкости-носителя транспортируется в интервал формирования обсыпки (см. рис. 8.26, б). Закачку гравия осуществляют при комбинированной циркуляции. В процессе сооружения фильтра жидкость-носитель может частично или полностью поглощаться водоносным пластом. При поглощении с целью минимизации колюматации недопустимо в качестве жидкости-носителя использовать полимерные и другие растворы и рекомендуется применять чистую воду. О заполнении интервала формирования обсыпки гравием свидетельствует резкое повыше-

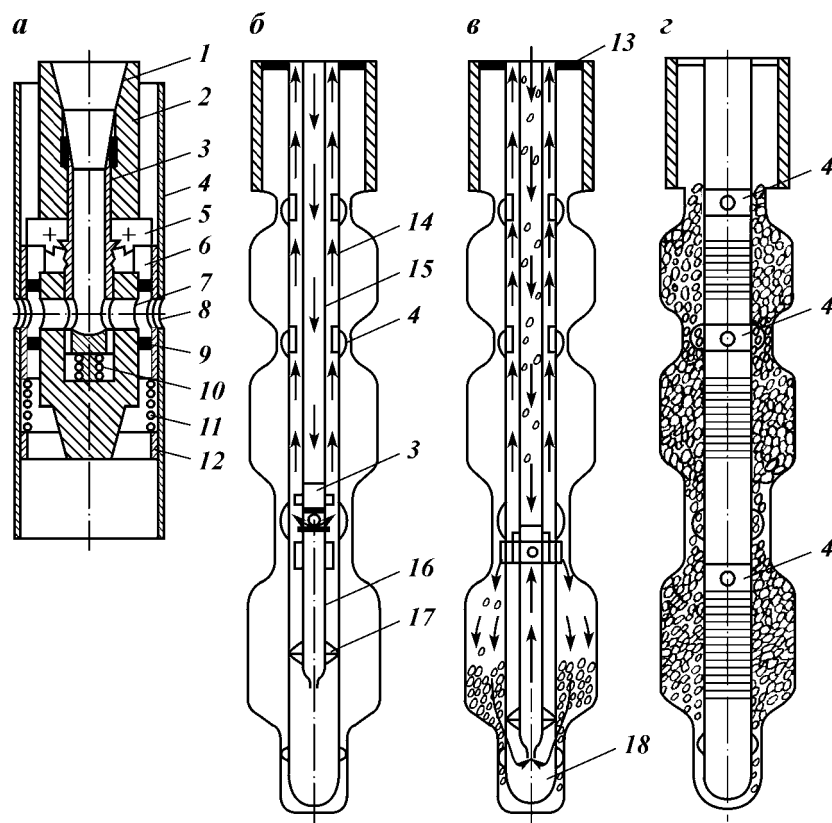


**Рис. 8.26. Сооружение гравийного фильтра в скважине с выведенной на поверхность фильтровой колонной:**

*а* — инструмент для сооружения гравийного фильтра в скважине УГФ; *б* — спуск распределительного узла; *в* — фиксация распределительного узла внутри муфты УГФ в фильтровой колонне и намыв гравия при комбинированной циркуляции; *г* — извлечение распределительного узла; 1 — переходник для соединения с буровой колонной; 2 — муфта УГФ; 3 — водоподъемные каналы; 4 — распределительный узел УГФ; 5 — опорные штыри; 6 — направляющая втулка; 7 — сальники; 8 — закачные каналы; 9 — выпускные отверстия; 10 — герметизирующая втулка; 11 — переходник для соединения со вспомогательной колонной; 12 — пружина; 13 — переходник для соединения с надфильтровой трубой; 14 — буровые трубы; 15 — вспомогательная колонна; 16 — сваб; 17 — надфильтровая труба; 18 — фильтровая колонна; 19 — герметизатор; 20 — отстойник с обратным клапаном; 21 — гравийный фильтр

ние давления в нагнетательной магистрали — следствие перекрытия закачных отверстий муфты УГФ гравием.

Из скважины извлекают буровые трубы, распределительный узел и вспомогательную колонну. При подъеме инструмента закачные отверстия муфты УГФ перекрываются специальной подпружиненной втулкой, что обеспечивает надежную герметизацию фильтровой колонны (рис. 8.27, *е*). Допускается совместно



**Рис. 8.27. Сооружение многосекционных гравийных фильтров в скважине:**  
*а* – инструмент для сооружения многосекционных гравийных фильтров в скважине УГФ-М; *б* – спуск распределительного узла, промывка и выдвижение опорных штырей; *в* – фиксация распределительного узла внутри муфты УГФ-М в фильтровой колонне и намыв гравия в интервал формирования и обсыпки; *г* – извлечение распределительного узла; 1 – переходник для соединения с бурильной колонной; 2 – распределительный узел УГФ-М; 3 – подвижной шток; 4 – муфта УГФ-М; 5 – опорные штыри; 6 – направляющая втулка; 7 – закачные каналы; 8 – выпускные отверстия; 9 – сальники; 10 – подпружинная пробка; 11 – пружина; 12 – стопорное кольцо; 13 – герметизатор; 14 – фильтровая колонна; 15 – бурильная колонна; 16 – вспомогательная колонна; 17 – сваб; 18 – отстойник с обратным клапаном

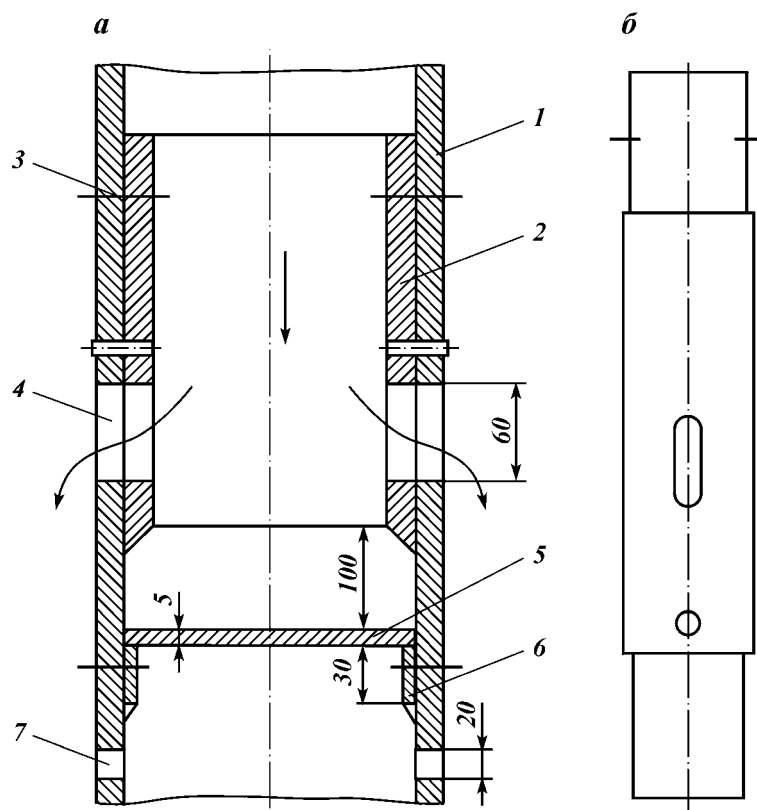
с фильтровой колонной спускать распределительный узел УГФ со вспомогательной колонной. Для этого распределительный узел и вспомогательную колонну фиксируют внутри закачной муфты УГФ на поверхности. После спуска фильтровой колонны внутри ее спускают бурильные трубы, которые при достижении

глубины фиксации распределительного узла соединяют с ним вращением. В дальнейшем технологические операции по сооружению фильтра повторяют.

Сооружение многосекционных гравийных фильтров в скважине с помощью инструмента УГФ-М (рис. 8.27). Над каждой секцией фильтра при плавном спуске фильтровой колонны устанавливают закачные муфты УГФ-М. Фильтровая колонна снабжается центраторами. Кольцевое пространство скважины между фильтровой и обсадной колонной герметизируют под головой фильтровой колонны. Внутри фильтровой колонны спускают на бурильных трубах распределительный узел УГФ-М, на нижнем торце которого предварительно закрепляется вспомогательная колонна длиной, соответствующей сумме длин надфильтровой трубы и наиболее короткой секции фильтра. Распределительный узел спускают к нижнему интервалу формирования обсыпки и фиксируют на высоте 1–3 м выше закачной муфты УГФ-М, установленной над нижней секцией фильтра.

Включают промывку. От бурового насоса жидкость поступает в бурильные трубы и распределительный узел УГФ-М, из выпускных каналов которого через кольцевое пространство между фильтровой колонной и бурильными трубами в восходящем потоке она поднимается к устью. При промывке подвижная втулка УГФ-М опускается и выдвигаются из корпуса распределительного узла опорные штыри (см. рис. 8.27, б). Продолжают спуск распределительного узла с промывкой. При достижении распределительным узлом глубины установки закачной муфты УГФ-М опорные штыри распределительного узла взаимодействуют с направляющей втулкой закачной муфты, закачные отверстия муфты открываются и совмещаются с закачными каналами распределительного узла. Происходит фиксация распределительного узла внутри закачной муфты УГФ-М, о чем свидетельствует скачок давления в нагнетательной магистрали.

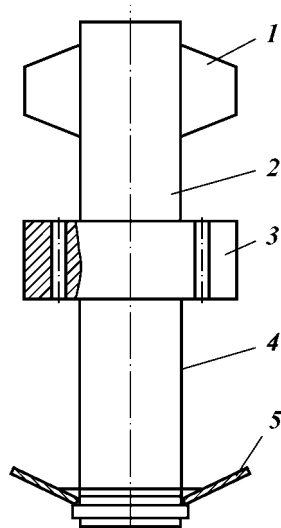
Промывают нижний интервал формирования гравийного фильтра при комбинированной циркуляции. В бурильные трубы на поверхности с помощью бурового насоса подают промывочную жидкость. Из распределительного узла через закачные каналы и отверстия муфты УГФ-М промывочная жидкость поступает в интервал формирования фильтра, где движется в нисходящем потоке. Из интервала формирования обсыпки жидкость фильтруется через фильтр и поступает внутрь фильтровой колонны, откуда через вспомогательную колонну, распределительный узел и кольцевое пространство между фильтровой и обсадной колоннами в восходящем потоке поднимается на поверхность.



**Рис. 8.28. Схема (а) и общий вид (б) клапана распределительного:**  
 1 – нагнетательная колонна; 2 – кольцо; 3 – шпонки (пластмассовые); 4 – отверстия; 5 – перегородка стеклянная; 6 – упоры; 7 – окна

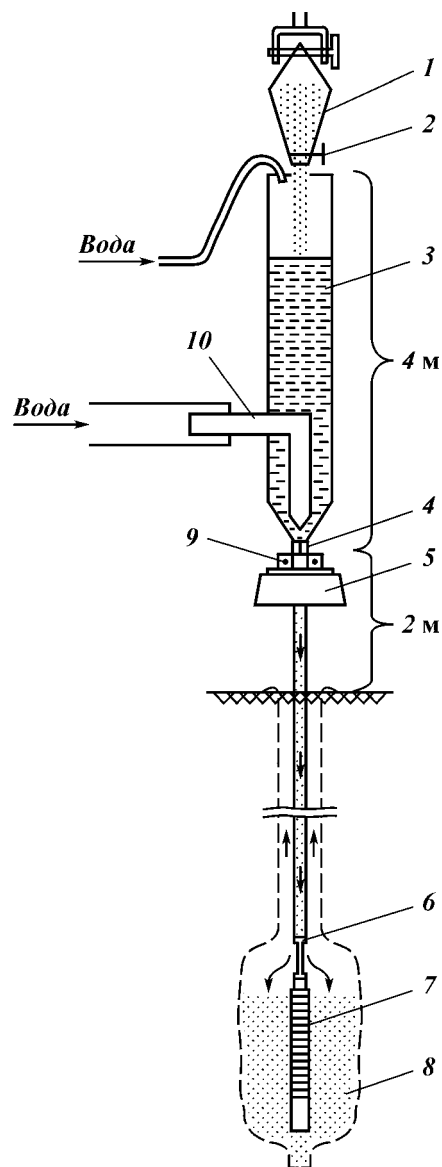
На поверхности в нагнетательную магистраль подают гравий, который в нисходящем потоке транспортируется в интервал формирования фильтра. В процессе закачки частично или даже полностью жидкость-носитель может поглощаться водоносным пластом. При наличии поглощения в качестве жидкости-носителя используют воду. О заполнении расчетного интервала свидетельствует резкое повышение давления в нагнетательной линии магистрали, обусловленное перекрытием закачных отверстий муфты УГФ-М гравием (см. рис. 8.27, в).

Закачку гравия и промывку прекращают. Инструмент поднимают и фиксируют над второй от забоя закачной муфтой УГФ-М. При подъеме инструмента опорные штыри под воздействием



**Рис. 8.29. Компоновка низа колонны:**

1 – направляющий фонарь (центратор); 2 – бурильная труба; 3 – ударная муфта; 4 – бурильная труба (нижняя часть); 5 – отражатель резиновый



**Рис. 8.30. Схема засыпки гравия с помощью эжектора и дополнительной емкости с водогравийной смесью:**

1 – емкость с гравием; 2 – дозатор; 3 – емкость для приготовления водогравийной смеси; 4 – устройство для герметизации; 5 – ротор; 6 – циркуляционный клапан; 7 – фильтр; 8 – гравийная обсыпка; 9 – хомут; 10 – эжекторное устройство

пружины убираются в корпус УГФ-М и перекрываются специальной втулкой. Вторым и последующие от забоя интервалы формирования фильтра оборудуют гравием по аналогии с пер-



**Рис. 8.31. Схема конструкции обратного клапана:**  
 1 – переходник; 2 – крышка; 3 – шарик; 4 – седло;  
 5 – пружина; 6 – гайка; 7 – корпус; 8 – труба диа-  
 метром 108 мм; 9 – насадка

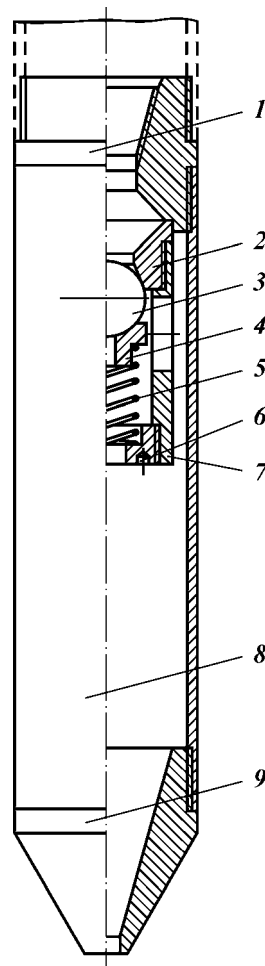
вым. После оборудования всех интервалов распределительный узел со вспомога-  
 тельной колонной и бурильные трубы  
 извлекают из скважины (см. рис. 8.27, з).

Сотрудниками ЗАО «Русбурмаш» раз-  
 работана специальная конструкция рас-  
 пределительного клапана для оборудова-  
 ния гравийными фильтрами скважин  
 подземного выщелачивания. Последова-  
 тельность технологических операций при  
 намыве гравийных фильтров в скважинах  
 ПВ аналогична описанной выше тех-  
 нологии намыва при комбинированной  
 циркуляции. Особенностью условий про-  
 ведения работ является необходимость  
 изоляции кольцевого пространства сква-  
 жины выше обсыпки гелцементным со-  
 составом и наличия в скважине эксплуата-  
 ционной колонны ПВХ, устойчивой к  
 агрессивным средам. Конструкция клапа-  
 на проста и показана на рис. 8.28.

Засыпку гравия осуществляют через  
 клапан и спущенную внутрь эксплуата-  
 ционной колонны ПВХ НКТ, оборудо-  
 ванную в нижней части специальным  
 приспособлением для фиксации и намыва  
 смеси (рис. 8.29).

Схема засыпки гравия с помощью  
 эжектора и дополнительной емкости по-  
 казана на рис. 8.30. После заполнения  
 гравием проектной полости давление в нагнетательной магистра-  
 ли увеличивается, и через инструмент подают гелцементный  
 раствор, который изолирует кольцевое пространство скважины  
 выше фильтра. После окончания работ скважину осваивают с  
 помощью ходового эрлифта конструкции Д.А. Петросова (ЗАО  
 «Русбурмаш») с расчетным доливом воды в кольцевое простран-  
 ство скважины.

Нижняя часть колонны оборудуется обратным клапаном,  
 представленным на рис. 8.31.



#### 8.3.4. ПОВЕРХНОСТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГРАВИЙНОЙ СМЕСИ И ЕЕ ПОДАЧИ В СКВАЖИНУ

Одним из наиболее сложных и важных обязательных технологических этапов при сооружении гравийных фильтров в скважине считают этап приготовления гравийной смеси на поверхности и ее подачи в скважину. Как показывает практика, по причине неудовлетворительного фракционирования гравия на поверхности, приготовления низкокачественной гравийной смеси и использования упрощенных модификаций оборудования для закачки смеси часто не удается сформировать в скважине гравийный фильтр удовлетворительного качества.

Приготовление и закачка гравийной смеси в скважину обычно считается процессом вспомогательным, второстепенным, существенно не влияющим на эффективность работ. Исследованиями, проведенными Русбурмаш и зарубежными организациями, установлено, что экономия на начальном этапе работ за счет выбора максимально упрощенной схемы поверхностного оборудования многократно перекрывается дополнительными затратами при освоении и эксплуатации скважины, обусловленными низким качеством сооружаемого гравийного фильтра. Формирование высококачественного гравийного фильтра возможно только при использовании рациональных схем поверхностного оборудования, обеспечивающих при данных условиях требуемый уровень фракционирования гравия, приготовления смеси и ее подачи в скважину при минимальных затратах.

Необходимо отметить, что в практике оборудования скважин гравийными фильтрами ведущие зарубежные фирмы используют в качестве поверхностного оборудования сложную и громоздкую технику, специально разработанную и изготовленную для приготовления гравийной смеси и ее закачки в скважину, стоимость которой превышает в некоторых случаях стоимость буровой и насосной установок. Все это свидетельствует о сложности и важности вопросов приготовления гравийной смеси и ее закачки в скважину, экономической целесообразности разработки для этих целей специального оборудования, которое отсутствует не только в геологической, но и в нефтяной, газовой и строительных отраслях.

Поверхностное оборудование в процессе сооружения гравийных фильтров (по целевому назначению) используют для:

- фракционирования гравия;
- приготовлений гравийной смеси;
- закачки гравийной смеси в скважину.

Экономически оправдано обеспечивать централизованное

фракционирование гравия на карьерах, его затаривание и транспортировку в производственные организации. Несмотря на важность вопроса снабжения фракционированным гравием производственных организаций и все возрастающие потребности отрасли в этом сырье, централизованное снабжение не налажено. В этой связи производственные организации снабжаются гравийной смесью очень низкого качества, преимущественно укрупненных фракций.

В многих случаях содержание искомой фракции в гравийной смеси составляет не более 10 %. Использовать такую смесь для гравийной обсыпки без просеивания нельзя из-за неудовлетворительных и гидравлических и суффозионных свойств таких фильтров, резкого снижения эффективности работ вплоть до необходимости проведения повторных операций по заканчиванию скважины. В связи с этим производственные организации вынуждены организовывать работы по фракционированию гравия непосредственно на своей базе или на буровой, которые вследствие неоправданно низкой стоимости и своей специфики убыточные.

Обычно гравийную смесь просеивают вручную через сита квадратного плетения непосредственно на буровой. Эта технология характеризуется следующими основными недостатками:

- высокая трудоемкость работ;
- отсутствие средств механизации для частичной или полной замены ручного труда;
- необходимость отрыва членов бригады на несвойственные им работы, т.е. использование высококвалифицированных работников не по профилю;
- увеличение транспортных расходов на перевозку к месту работ гравийного отсева, содержание которого редко бывает меньше 60—70 %;
- повышенная вероятность возникновения аварийной ситуации в скважине при фракционировании гравия после вскрытия водоносного пласта.

С целью устранения вышеперечисленных недостатков, присущих ручному просеиванию гравия непосредственно на буровой (в некоторых производственных организациях на базе экспедиции), управления или партии создан специализированный участок по подготовке гравия к использованию для обсыпки. В Краснодарском СУ НПО Спецпромстрой участок приготовления гравийной смеси представляет собой установку для просеивания гравия, которую обслуживает специальная бригада.

Установка для просеивания гравия представлена перфорированной трубой большого диаметра, наклоненной к горизонтالي под углом 10—15°. Наклонная труба может вращаться вокруг

большой оси симметрии с приводом от электромотора. Перфорированная труба обматывается в один слой сеткой квадратного плетения с размером ячейки, выбираемым исходя из нужной фракции гравия. Под перфорированной трубой устанавливают специальные поддоны для сбора искомой фракции гравия. У нижнего торца наклонной трубы устанавливают емкость для сбора гравийного отсева, который используется в строительных работах. Верхний торец наклонной трубы снабжен загрузочным люком и воронкой. Самосвал с неотсортированной гравийной смесью подъезжает к наклонной трубе и сгружает часть смеси в воронку, из которой через загрузочный люк она поступает в наклонную трубу. Наклонная труба вращается, при этом искомая фракция, просыпаясь через ячейки, попадает в поддоны, где накапливается.

Отсев гравия, представленный более крупными фракциями, чем ячейки сита, высыпает через нижний торец наклонной трубы в специальную емкость. Из поддонов гравийная смесь забирается, затаривается и отправляется к месту производства работ. С целью получения высококачественной гравийной смеси целесообразно одну и ту же смесь дважды пропустить через установку для просеивания гравия, в этих процессах сначала отсеивается некондиционная более мелкая фракция, а затем — более крупная.

В ПСО Востокбурвод для целей подготовки гравия к засыпке в скважину использовался сортировочный агрегат СА, который состоит из приемного бункера, грохота и четырех конвейеров. В приемный бункер СА засыпают исходную гравийную смесь, откуда она поступает на верхнее сито грохота. На первом сите из общей массы отсеивается фракция более 10 мм, которая первым конвейером транспортируется и складывается в 20 м от агрегата. На последующих ситах отсеивается фракция 3–7 мм, которая транспортируется вторым конвейером и складывается также в стороне от агрегата. Фракция гравия < 3 мм третьим и четвертым конвейерами транспортируется к месту складирования.

При работе агрегата в зимних условиях (как промежуточное звено) между ситами устанавливаются дробилки для размельчения смерзшихся кусков. Сортированный гравий искомой фракции затаривают в мягкие контейнеры для сыпучих материалов, выпускаемые промышленностью, и транспортируют на буровую. Основные параметры контейнеров приведены ниже.

#### Техническая характеристика мягких контейнеров

Типоразмер.....	МК-0,5	МК-0,7	МК-1
Масса, кг.....	20	25	35
Масса брутто, кг.....	1,5	1,5	2,0
Рабочий объем в загруженном состоянии, м.....	0,51	0,67	0,89

Контейнеры выпускаются двух модификаций, которые маркируются индексами П и Л. Индекс П свидетельствует о том, что контейнер выполнен с грузовыми элементами в виде несущих проушин, а индекс Л — с грузовыми элементами в виде грузовых лент с кольцами. Для механизации погрузо-разгрузочных работ с контейнерами применяют краны-укосины.

Для просеивания гравийной смеси на базе производственных организаций можно использовать вибрирующие сита, изготавливаемые для очистки промывочной жидкости. Некоторые производственные организации страны укомплектованы одинарными СВ-1 и сдвоенными СВС-2 виброситами. Техническая характеристика вибросита СВС-2 представлена ниже.

Пропускная способность, л/с.....	50–55
Угол наклона сетки, градус.....	15
Частота колебаний сетки в 1 мин.....	1400, 1600, 1800, 2000
Полезная площадь сетки, м <sup>2</sup> .....	2,5
Размеры ячеек, мм.....	0,7×2,3 1,0×2,3 1,0×5,0
Привод.....	Индивидуальный от электродвигателей типа А0 42-4 мощностью 2×2,8 кВт при 1420 об/мин

ВНИИнефтемашем разработано сдвоенное вибросито СВ-2 со следующей технической характеристикой.

Пропускная способность, л/с.....	50–60
Частота колебаний сетки в 1 мин.....	1600, 2000
Рабочая площадь сетки, м <sup>2</sup> .....	2,6
Длина сетки одной вибрирующей рамы, м.....	4,5
Тип электродвигателя.....	А0 2-31
Установленная мощность, кВт.....	2,2×2-4,4
Габариты, мм:	
длина.....	2450
ширина.....	2650
высота.....	1530
Масса, кг.....	1380

По сравнению с виброситом СВС-2 у нового вибросита значительно увеличен срок службы сетки. Кроме того, угол наклона сетки по длине вибрирующей рамы переменный, что создает условия для лучшего сбрасывания гравия.

Общий недостаток вибросит — их малая производительность, сложность механизации погрузки и разгрузки исходной фракционной смеси. Наиболее высокую производительность по твердому, а следовательно, и большую эффективность применения в процессе фракционирования имеют гидроциклоны. Принцип действия гидроциклона следующий.

В корпусе, имеющем форму воронки, создается закрученный поток жидкости с содержанием гравия исходной фракции. При попадании частиц гравия в гидроциклон на них начинает дейст-

водить центробежное поле, обуславливающее возникновение центробежной силы, стремящейся сместить частицу из центральных сечений в периферийные. Такому смещению препятствует сила сопротивления. Так как центробежная сила пропорциональна объему частицы или кубу ее характерного диаметра, а сила сопротивления — площади поверхности частицы, или квадрату характерного диаметра, можно утверждать, что с увеличением крупности частиц центробежная сила растет быстрее, чем сила сопротивления.

Решение дифференциального уравнения движения частиц гравия в центробежном поле позволяет установить, что чем больше размер частиц, тем быстрее они переместятся к периферийным сечениям гидроциклона, к его стенкам. И наоборот, чем меньше частица, тем сложнее ее сместить из центральных сечений гидроциклона. В связи с этим, если отбирать из пристенной части гидроциклона одну часть потока, то в ней будут содержаться преимущественно крупные фракции. Во второй части потока, отбираемой из центральных сечений гидроциклона, будут содержаться преимущественно мелкие фракции. За счет изменения подачи рабочего потока в гидроциклон и его геометрических характеристик добиваются заданных параметров фракционирования. Как правило, применение гидроциклонов не позволяет добиться четкого разделения гравия по фракциям в связи с тем, что существует промежуточная фракция, которая содержится как в отсеке, так и в искомой фракции.

Гидроциклоны в геологической отрасли широко используют в практике очистки промывочной жидкости от примесей. Рассмотрим типовую схему очистного оборудования с гидроциклонами.

Установка ОГХ-8Б состоит из гидроциклона и питательного насоса с электроприводом, смонтированных на общей раме. Гидроциклон выполнен в виде конусной воронки, переходящей в нижней и верхней частях в цилиндры с двумя сливными патрубками. Питательный насос центробежного типа забирает водогравийную смесь и закачивает ее в верхнюю часть гидроциклона через нагнетательный патрубок, вваренный в корпус по направлению касательной. Смесь нагнетают под давлением 0,15–0,3 МПа. При попадании в гидроциклон смесь закручивается, наиболее крупные частицы смещаются к поверхности конусной воронки и через нижний цилиндр и сливной патрубок поступают в специальную емкость, где гравий складывается, а жидкость отфильтровывается и удаляется.

Более мелкие фракции гравия из центральных сечений поступают в верхний цилиндр большего (чем нижний) диаметр и оттуда через вторую сливную магистраль поступают в другую ем-

кость, где также собираются, а отфильтрованная жидкость удаляется. С увеличением диаметра гидроциклона его подача возрастает, а качество фракционирования снижается. Для улучшения качества фракционирования могут применяться блоки гидроциклонов, состоящие из нескольких спаренных гидроциклонов. Геологическая отрасль снабжена гидроциклонами типа 1ГЦ-15ОР, которые можно эффективно применять для отсеивания наиболее применяемой фракции гравия 0,5–1,5 мм.

Техника и технология приготовления гравийной смеси и ее закачки в скважину в процессе работ должна обеспечивать при минимуме затрат:

- приготовление гравийной смеси заданной концентрации с равномерным распределением частиц по всему объему;

- равномерную подачу гравийной смеси в скважину с требуемым расходом под необходимым давлением, обусловленным суммой гидравлических потерь в циркуляционной системе в процессе закачки;

- надежную работу поверхностного оборудования при перекачке абразивных смесей;

- непрерывность процесса приготовления и закачки смеси;

- простоту технологических операций и применяемого оборудования;

- возможность механизации процесса сооружения гравийного фильтра.

В практике оборудования скважин гравийными фильтрами используют схемы поверхностной обвязки. Эти рекомендации недостаточно обоснованы и сейчас некоторые технические средства и соответствующие технологии устарели. Во ВСЕГИНГЕО теоретически и экспериментально на специально оборудованном стенде и натурных скважинах испытаны известные в практике принципиально различные схемы поверхностного оборудования и оценено их влияние на эффективность сооружения гравийного фильтра.

Способ приготовления гравийной смеси и ее закачка в скважину эжекторным смесителем широко применяется и рекламируется ПСО Востокбурвод. Согласно этой технологии жидкостеноситель от бурового насоса подается к гидросмесителю эжекторного типа, обычно представленного модификациями ГД-1 и ГДМ-1, которыми комплектуются буровые установки 1БА-15В. При прохождении жидкости-носителя через сопло увеличивается скорость потока и согласно эффекту Вентури в камере смешения гидросмесителя создается подсос 0–0,06 МПа. За счет подсоса гравий из бункера эжекторного смесителя поступает в струю жидкости-носителя и подается в нагнетательную магистраль.

На начальном этапе испытания этой схемы было установлено, что гравий крайне неравномерно поступает в нагнетательную магистраль вследствие образования в бункере гидромешалки устойчивого гравийного контура равновесия над камерой смешения. Неравномерность подачи приводит к периодическому увеличению концентрации гравийной смеси больше критических значений, которые (например, для воды) составляют приблизительно 15 %, и пробкообразованию в поверхностной обвязке. С целью минимизации неравномерности подачи гравия в струю жидкости носителя был модернизирован корпус гидромешалки таким образом, что отверстие, через которое гравий поступал в камеру смешения, было асимметричным по отношению к корпусу. Однако модернизация корпуса позволила лишь частично устранить пробкообразование. Опробовано было предложение ПСО Востокбурвод, заключающееся в формировании параллельно с основной струей жидкости-носителя после сопла вспомогательной струи, которая постоянно разрушала бы сформировавшийся контур равновесия. Испытания показали, что неравномерность подачи устраняется лишь на начальном этапе после включения насоса. В дальнейшем образовывался свод равновесия большого масштаба, который не захватывался струей и не был подвержен разрушению. Разрушение свода наблюдалось лишь при передаче вибрационного воздействия на бункер.

Итак, при использовании гидросмесителей эжекторного типа для приготовления и подачи в скважину гравийной смеси (согласно имеющимся рекомендациям) не представляется возможным устранить неравномерность подачи гравия в нагнетательную магистраль, и следовательно обеспечить надежную транспортировку гравия в скважину, минимизацию расслоения смеси в процессе движения к забою. С целью устранения сводообразования на бункер гидромешалки необходимо устанавливать вибратор, что значительно удорожает и усложняет работы.

Кроме того, установлено, что применение гидросмесителя не позволяет развить давление в нагнетательной магистрали более 0,06–0,07 МПа. Отмеченное обстоятельство исключает возможность применения гидросмесителей эжекторного типа в процессе сооружения гравийного фильтра при комбинированной и обратной циркуляции, а также при глубинах статического уровня скважин более 50 м при засыпке гравия через вспомогательную колонну труб, установленную в кольцевом пространстве скважины. Дело в том, что при стандартной подаче насосного оборудования 10–20 л/с при нисходящей фильтрации через гравийный фильтр типового размера, потери напора только в фильтре существенно превышают давление нагнетания. Поэтому гидро-



смеситель «захлебывается» и жидкость-носитель начинает вытекать из бункера гидросмесителя.

Установка гидросмесителя в нагнетательной магистрали приводит к аэрации гравийной смеси, которая в свою очередь обуславливает увеличение потерь напора при циркуляции в сравнении с неаэрированной жидкостью. Увеличение потерь напора за счет аэрации существенно сужает возможную область применения гидросмесителей эжекторного типа для целей приготовления гравийной смеси и ее подачи в скважину. С целью расширения возможной области применения гидросмесителей Русбурмаш было предложено устанавливать в нагнетательной магистрали после камеры смешения специальный тройник с фильтром, от которого отводилась сливная магистраль.

Часть жидкости-носителя фильтровалась через фильтр, на котором оседал и задерживался гравий и поступала на слив, снижая тем самым рабочий расход смеси, а следовательно и потери напора в циркуляционной системе. Таким образом, за счет уменьшения подачи смеси в скважину после смесителя удалось снизить требуемое рабочее давление нагнетания и несколько расширить область применения гидросмесителей при сооружении гравийных фильтров. Однако, как показали испытания, такое расширение области применения этой технологии незначительно вследствие невозможности существенного снижения расхода смеси в скважине исходя из необходимости поддержания в циркуляционной системе турбулентного режима движения, позволяющего предотвратить пробкообразование и обеспечить надежную транспортировку частиц гравия в интервал формирования фильтра. Кроме этого, вести закачку смеси при ограниченных режимах экономически невыгодно. Единственное преимущество схемы приготовления и закачки гравийной смеси гидросмесителями эжекторного типа — простота технологических операций и доступность технических средств. Однако применение этой схемы в практике, как правило, не обеспечивает формирования гравийного фильтра высокого качества и эффективного проведения работ в целом.

Приготовление гравийной смеси в герметичных бункерах и закачка приготовленной смеси насосами высокого давления при попеременном подключении к бункерам рекомендовали ВНИИ-газ и ВНИПИ Термнефть при оборудовании гравийными фильтрами глубоких нефтяных и газовых скважин. Бункерные смесители широко применяют в практике гидротранспорта. Впервые для приготовления гравийной смеси и ее подачи в скважину, герметичные бункера предложил использовать в 30-х гг. прошлого столетия Л. Лайенс. Бункер представлял собой обсадную

трубу длиной 1,5–2 м, с одного торца заваренную металлическим диском, а с противоположного — металлическим кольцом с загрузочным люком. В нижней части бункера высверливали два отверстия, в которых жестко закрепляли входной и рабочий патрубки. Входной патрубок соединяли с поршневым насосом, а рабочий — со скважиной. Герметичный бункер через загрузочный люк заполняли гравием. После герметизации загрузочного люка от насоса в бункер через входной патрубок нагнетали жидкость-носитель, которая, смешиваясь с гравием, образовывала смесь. Гравийная смесь через рабочий патрубок герметичного бункера и гибкие шланги подавалась в скважину.

Схемы поверхностного оборудования ВНИИгаз и ВНИПИ Термнефть принципиально аналогичны схеме расположения поверхностного оборудования с герметичным бункером, рекомендованной Л. Лайенсом. Отличие заключается в том, что применяемые схемы обеспечивают одновременную разгрузку сразу нескольких герметичных бункеров, соединенных с поршневыми насосами цементировочных агрегатов, а нижняя часть бункера выполнена в виде полусферы или конусной воронки.

Автором с НПО Спецпромстрой проведены исследования по выявлению преимуществ, недостатков и рациональных областей применения герметичных бункеров для приготовления и подачи в скважину гравийной смеси. Работы проводились на экспериментальной скважине Московского СУ НПО Спецпромстрой. Первоначально испытывалась поверхностная обвязка, рекомендуемая для применения в нефтяных и газовых скважинах и аналогичная схеме Л. Лайенса при малых давлениях, не превышающих 0,02 МПа. В ходе испытаний выявлены следующие недостатки схемы поверхностной обвязки с герметичными бункерами:

- невозможность приготовления гравийной смеси с заданной постоянной объемной концентрацией;

- неравномерность поступления гравия в струю жидкости-носителя вследствие сводообразования, зависания гравия;

- необходимость прерывистого ведения работ вследствие прекращения закачки на время загрузки бункеров;

- сложность герметизации загрузочного люка и высокая трудоемкость работ в процессе загрузки бункера гравием;

- сложность контроля за опорожнением бункера и технологическим процессом закачки.

В начальный момент закачки в рабочий патрубок поступал большой объем гравия, средние величины которого по мере опорожнения герметичного бункера уменьшились. Высокие концентрации гравийной смеси при подключении насоса к герметичному бункеру приводили к пробкообразованию еще до поступле-

ния гравия в скважину, т.е. в поверхностной обвязке. Образование гравийных пробок происходило не только в начальный период закачки. По мере опорожнения бункера образовывались устойчивые гравийные своды над отверстием рабочего патрубка и концентрация гравия в смеси уменьшалась до нуля.

При обрушении свода, которое наблюдалось при передаче ударных нагрузок на корпус герметичного бункера, концентрация смеси резко возрастала, что приводило к образованию пробки. Следует отметить, что неравномерность поступления гравия в скважину, прерывистость технологических операций в процессе работ недопустимы не только из условия необходимости предупреждения пробкообразования, но также исходя из соображений повышения качества намываемого гравийного фильтра, за счет минимизации расслоения.

В процессе испытаний для обеспечения равномерной подачи гравия в скважину поверхностная обвязка с герметичными бункерами была модернизирована. Во-первых, герметичные бункера, выполненные из обсадных труб диаметром 426 мм, были установлены под углом  $20-30^\circ$  к вертикали, что исключило вероятность возникновения в бункере устойчивых сводов равновесия. Дело в том, что при асимметричной форме поверхности бункера (по отношению к отверстию рабочего патрубка) свод равновесия возникать теоретически не должен. Во-вторых, за счет установки в корпусе специальной муфты обеспечили возможность перемещения входного патрубка в герметичном бункере относительно продольной оси, что позволило в процессе закачки регулировать объем камеры смешения, который определяется расстоянием между отверстием рабочего патрубка и нагнетательным патрубком. Перед заполнением бункера гравием нагнетательный патрубок перемещали к рабочему до упора, т.е. камеры смешения практически не было.

При включении насоса жидкость-носитель из нагнетательного патрубка поступала через отверстие в рабочий патрубок и в скважину не обогащаясь гравием. Постепенным отодвиганием нагнетательного патрубка от отверстия рабочего патрубка путем вращения обеспечивали заданную концентрацию гравия в жидкости-носителе. По мере опорожнения бункера объем камеры смешения увеличивали с целью поддержания постоянной объемной концентрации смеси.

Режимы закачки отрабатывали в лабораторных условиях на базе построения графиков зависимости объема поступающего в рабочий патрубок гравия от объема камеры смешения при типовых расходах используемого насосного оборудования по мере опорожнения бункера. Необходимо отметить, что в настоящее

время отсутствуют теоретические исследования, позволяющие определить режимы закачки без проведения эксперимента.

При использовании герметичных бункеров для поддержания концентрации гравия в воде 5–7 % расстояние между нагнетательным патрубком и отверстием рабочего патрубка увеличивали плавно по мере опорожнения бункера с 15–20 до 50–60 мм. Использование полученных соотношений для бункеров других конструкций возможно только для ориентировочных оценок. Для обеспечения непрерывности работ по закачке гравия в скважину использовали два бункера, причем пока первый разгружался, второй заполняли гравием, и наоборот. Попеременное подключение насоса к каждому из бункеров осуществляли с помощью трехходовых кранов.

При увеличении давления нагнетания растет давление в герметичном бункере и усложняется его эксплуатация. В некоторых случаях работы под большим давлением при использовании герметичных бункеров могут оказаться небезопасными. В процессе испытаний при давлении нагнетания 1,2 МПа нарушилась герметичность загрузочного люка, а при давлении 1,8 МПа в другом бункере оторвало кольцо с загрузочным люком. Аналогичные аварии наблюдались при испытании герметичных бункеров при сооружении гравийных фильтров в скважине.

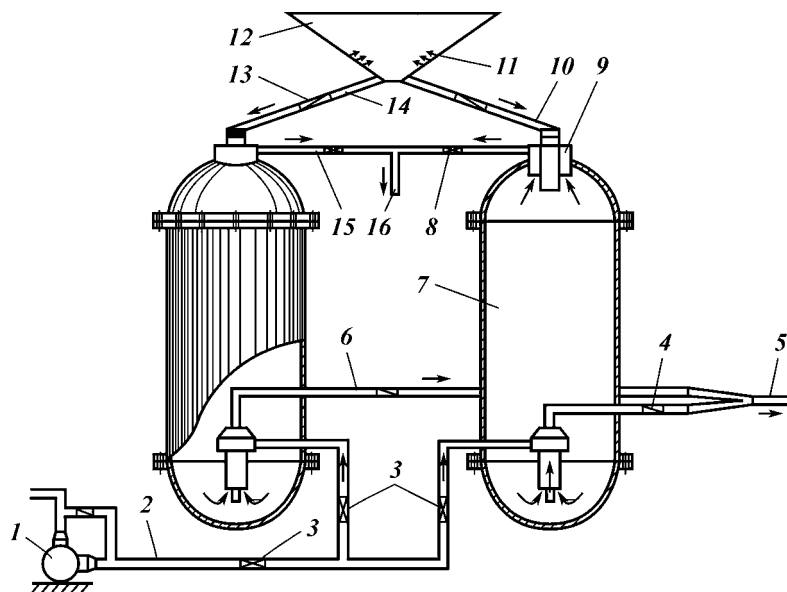
Таким образом, при использовании в поверхностной обвязке герметичных бункеров к ним необходимо предъявлять соответствующие требования как к сосудам, работающим под большим давлением, что значительно усложняет и удорожает работы. Поэтому использовать бункерные схемы поверхностного оборудования в процессе оборудования глубоких скважин при высоких давлениях нагнетания не рекомендуется.

В.Я. Мешков предложил уменьшить объем герметичного бункера до размеров, обеспечивающих его безопасную работу при полуторакратных рабочих давлениях. В качестве герметичного бункера использовали стандартные газовые баллоны, испытанные на определенное давление. Баллон жестко закрепляли в специальном патрубке перпендикулярно его продольной оси и устанавливаемом в нагнетательной магистрали таким образом, чтобы расстояние между выпускным отверстием баллона и нижней поверхностью патрубка было 5–10 мм. В противоположном торце баллона устанавливали загрузочный люк, через который засыпали гравий.

После засыпки гравия люк закрывали и включали насос. При прохождении жидкости через патрубок, в который был вмонтирован торец баллона с выпускным отверстием, гравий захватывался струей и закачивался в скважину. Практика оборудования

скважин на объектах треста Промбурвод при использовании в качестве герметичных бункеров газовых баллонов показала ее пригодность при оборудовании глубоких скважин гравийными фильтрами, гидроразрыве пласта, установке песчано-гравийного моста и других работах. Недостаток предложенной схемы — очень высокие затраты труда на открытие и герметизацию грузозачных люков при заполнении баллонов малого объема гравием, сложность контроля за поступлением гравия в скважину, неравномерность подачи гравия в скважину вследствие сводообразования в баллоне. Особенно ярко проявляются недостатки этой схемы при необходимости засыпки в скважину больших объемов гравия.

При оборудовании глубоких скважин ПВ давления в нагнетательной магистрали после эжекторного смесителя недостаточно для обеспечения циркуляции в скважине. Для таких условий в ЗАО «Русбурмаш» разработан и изготовлен грузозачно-обменный аппарат, показанный на рис. 8.32. Значительный объем бун-



**Рис. 8.32. Грузозачно-обменные емкости гидротранспортного аппарата:**  
1 – насос; 2 – напорный водовод; 3, 8 – электроздвижки; 4, 13 – обратные клапаны; 5 – магистральный пульповод; 6 – разгрузочный пульповод; 7 – грузозачно-обменные емкости; 9 – патрубки для слива жидкости; 10, 14 – загрузочные пульповоды; 11 – напорная вода для смачивания загрузочного материала; 12 – загрузочный бункер; 15 – водоводы; 16 – сброс воды или шламовой пульпы

керов позволяет существенно снизить затраты на оборудование скважин гравийного фильтра. Данная установка успешно применяется для транспортировки гравийной смеси на поверхности от места разгрузки и просеивания по рудному полю к скважинам.

В последние два-три десятилетия в зарубежной практике четко прослеживается тенденция перехода на закачку гравийной смеси поршневыми насосами высокого давления. Сегодня почти все ведущие фирмы используют для закачки гравия в скважину такую технологию. В нашей стране ранее при сооружении гравийных фильтров схема закачки гравийной смеси поршневыми насосами не использовалась. Имелся единичный опыт использования поршневых насосов преимущественно цементировочных агрегатов для закачки в скважину небольших объемов песчано-гравийной смеси в процессе проведения гидро-разрыва продуктивных пластов нефтяных и газовых скважин. Основная причина ограниченного применения технологии закачки гравийной смеси поршневыми насосами заключалась в повышенном износе цилиндрических втулок, клапанных седел и других частей насоса в процессе работ.

Автором проведен анализ работ, посвященных надежности работы насосного оборудования при перекачке абразивных смесей, и комплекс экспериментальных и полевых исследований. Анализ показал, что при качественном просеивании гравия, удаления из его состава фракций более 4–5 мм возможна удовлетворительная работа насоса при перекачке абразивной смеси в течение длительного срока. По данным А.С. Волкова, надежная работа поршневых насосов при перекачке водо-гравийной смеси концентрации до 5 % с размером частиц не более 2 мм обеспечивается в течение 700–800 ч непрерывной работы, после которых необходимо заменить изношенные детали гидравлической части насоса. На оборудование гидрогеологической скважины типовой конструкции требуется приблизительно 1 м<sup>3</sup> гравия. Основываясь на данных А.С. Волкова с учетом подачи насоса 5–10 л/с при концентрациях смеси порядка 5 %, можно определить, что одного поршневого насоса будет достаточно для оборудования без ремонта порядка 1000 скважин.

С целью проверки этих данных были проведены испытания схемы поверхностного оборудования, при которой гравийная смесь поршневым насосом закачивалась в скважину. Испытания проводились на объектах треста НПО Спецпромстрой в Ярославской области, Краснодарском крае, Башкирской АССР и в ПО Молдавгеология СССР в южных районах.

Для перекачки гравийной смеси в Краснодарском СУ НПО Спецпромстрой использовали гравийную смесь фракции от 2 до

10 мм. Перекачка гравийной смеси осуществлялась поршневым насосом цементировочного агрегата ЦА-320М. В процессе перекачки водогравийной смеси концентрации 2–3 % со временем уменьшалась подача цементировочного агрегата. Это было связано с засорением всасывающего патрубка и клапанов наиболее крупными фракциями гравия.

Прекращение подачи наблюдалось через 10–15 мин после промывки насоса. Засорение клапанов и всасывающего патрубка насоса наблюдалось по причине невозможности перекачки поршневым насосом данной конструкции частиц крупностью более 5 мм вследствие ограниченной высоты подъема клапана. По мере проведения закачки концентрация крупных фракций в гидравлической части увеличивалась, что приводило к увеличению гидравлического сопротивления во всасывающей магистрали и как следствие — к снижению подачи. При достижении концентрации скопившихся частиц критических значений подача насоса прекращалась и требовалась промывка гидравлической части.

Проведенные работы показали, что использование поршневых насосов для перекачки гравийной смеси возможно только при качественном просеивании гравия, в процессе которого удаляется фракция более 5 мм. Необходимо отметить, что использование для гравийной засыпки фракций гравия более 3 мм, а тем более крупнее 5 мм, согласно имеющимся нормативным документам ни для одного района работ нашей страны рекомендовано быть не может. Намыв фильтра такого фракционного состава не только не обеспечит предупреждения пескования скважины, но и приведет к увеличению гидравлического сопротивления фильтрационному потоку и как следствие — к снижению удельных дебитов.

Перекачку гравийной смеси состава 1–3 мм с концентрациями 5–7 % на Ярославском участке Московского СУ НПО Спецпромстрой осуществляли поршневым насосом НБ-125, установленным на насосном блоке НП-15А. Гравийную смесь закачивали при расходах 10 л/с в течение 12 и 18 ч. Осложнений в процессе работ не наблюдалось. В Уфимском СУ треста Промбурвод для закачки аналогичной по фракционному составу гравийной смеси использовали насос 11ГР. В процессе оборудования скважины гравийным фильтром снижения подачи и перерывов циркуляции не наблюдалось.

При оборудовании гравийными фильтрами скважин, пробуренных в сложных условиях юга Молдавии, для закачки гравия фракции 0,3–1,5 мм насосом цементировочного агрегата ЦА-100 осложнений также не наблюдалось.

В ходе испытаний установлено, что для целесообразности снижения абразивного износа деталей насоса в качестве жидко-

сти-носителя нужно использовать более вязкую жидкость, чем воду, и обеспечивать равномерную подачу гравия во всасывающую часть насоса с дополнительным подпором 0,01–0,03 МПа.

Итак, установлено, что поршневые насосы — единственное техническое средство, которое при правильной эксплуатации и контроле может подавать гравийную смесь в скважину под большим давлением. Это позволяет формировать гравийные фильтры высокого качества. Применение других схем поверхностного оборудования не позволяет обеспечить в скважине обратную или комбинированную циркуляцию, нисходящую фильтрацию жидкости-носителя через уже намывтый гравийный слой. Экономически целесообразно модернизировать поршневые насосы специально для перекачки абразивных смесей. Эти работы можно осуществлять на базе принципа гидравлической или механической защиты контактирующих с гравием частей насоса, выбора рациональных конструкций клапанов, седел, уплотнений поршня и т.д. В ПГО Гидроспецгеология, Молдавской ГГЭ и других организациях при использовании поршневых насосов для целей перекачки абразивных смесей обычные тарельчатые клапана заменяют на шаровые. Надежность работы клапанов при такой модернизации увеличивается.

В зависимости от оборудования, используемого для приготовления гравийной смеси, и типа поршневого насоса, используемого для закачки гравия в скважину, возможно применение четырех принципиальных схем поверхностной обвязки (рис. 8.33):

приготовление гравийной смеси в пескосмесительных агрегатах и ее закачка в скважину цементировочными агрегатами (см. рис. 8.33, а);

приготовление и закачка гравийной смеси в скважину цементировочными агрегатами (см. рис. 8.33, б);

приготовление гравийной смеси в установленной на поверхности специальной емкости с помощью вспомогательного насоса и ее закачка в скважину буровым насосом (см. рис. 8.33, в);

приготовление гравийной смеси в установленной в отстойнике специальной емкости с помощью вспомогательного насоса и ее закачка в скважину буровым насосом (см. рис. 8.33, г).

Наиболее качественная гравийная смесь заданных параметров готовится в пескосмесительных агрегатах. Пескосмесительные агрегаты УСП-50, 4ПА и 3ПА предназначены для транспортировки песка, приготовления песчано-жидкостной смеси и ее подачи к насосным установкам при гидроразрыве нефтяных и газовых пластов, а также при гидропескоструйной перфорации. В нефтяной и газовой отраслях пескосмесительные агрегаты ис-



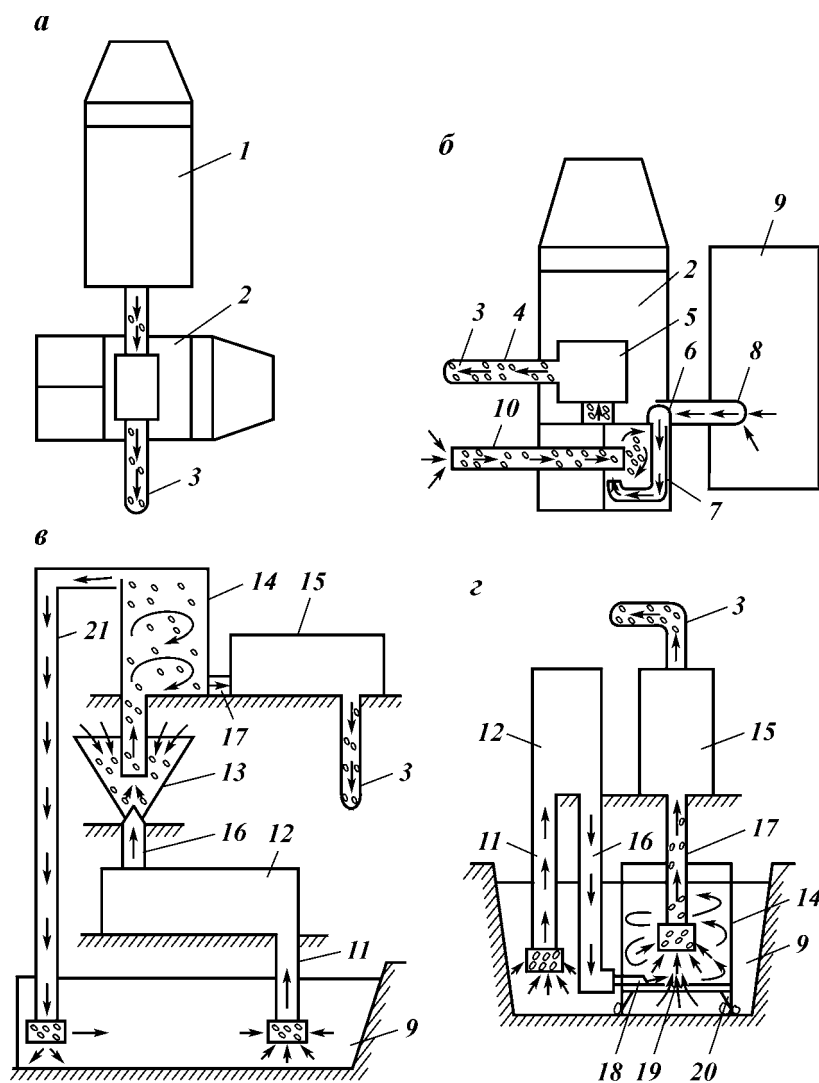


Рис. 8.33. Схемы поверхностной обвязки:

а — приготовление гравийной смеси в пескосмесительном агрегате и ее закачка в скважину цементировочным агрегатом; б — приготовление и закачка гравийной смеси цементировочным агрегатом; в — приготовление гравийной смеси в специальной емкости с помощью вспомогательного насоса и ее закачка в скважину буровым насосом; г — приготовление гравийной смеси в установленной в отстойнике специальной емкости с помощью вспомогательного насоса и ее закачка в скважину буровым насосом; 1 — пескосмесительный агрегат УСП-50; 2 — цементировочный агрегат; 3 — скважина; 4 — нагнетательная магистраль; 5 — насос

пользуют для приготовления гравийной смеси при оборудовании скважин гравийными фильтрами.

Пескосмесительные агрегаты смонтированы на базе автомобиля КраЗ-257 и состоят из бункера, разделенного перегородкой на две секции для песка двух различных фракций, установленных на стенках бункера пневмовибраторов, рабочего и загрузочного шнеков, регулятора выдачи сыпучего материала, смесителя, представляющего собой цилиндрическую емкость с коническим днищем и лопастной мешалкой, раздаточного и приемного коллекторов, а также центробежного пескового насоса.

С помощью рабочего шнека песок подается из отсеков бункера в смеситель. На коническом дне бункера установленные пневмовибраторы, приводимые в действие от пневмосистемы автомобиля, улучшают условия поступления песка в рабочий шнек. Из рабочего шнека песок поступает в смеситель, где при помощи лопастной мешалки он перемешивается с жидкостью-носителем. Регулированием частоты вращения рабочего шнека можно готовить смесь различной концентрации. Смеситель укомплектован показателем уровня. Готовая смесь отбирается центробежным насосом и подается к насосным установкам.

Техническая характеристика пескосмесительных агрегатов УСП-50 и ЧПА представлена ниже.

Тип агрегата.....	УСП-50	4ПА
Монтажная база – шасси автомобиля	КраЗ-257 Б1А	КраЗ-257
Масса транспортируемого песка, т.....	9	9
Максимальная производительность шнеков, т/ч:		
рабочего.....	50	50
загрузочного.....	25	12–15
Объем, м <sup>3</sup> :		
бункера.....	6,83	6,50
смесителя.....	1	1
Песковой насос:		
шифр.....	5 ПС-10	5 ПС-10
напор, МПа.....	0,22	0,22
габариты, мм.....	9530×2630×3750	8750×2630×3750
Масса, кг:		
без груза.....	13735	13775
с грузом.....	22735	23000

Техническая характеристика пескосмесительного агрегата ЗПА от 4ПА отличается тем, что емкость бункера увеличена с 6,5 до 6,7 м<sup>3</sup>, а масса транспортируемого песка с 9 до 10 т. Модифика-

цементировочного агрегата; 6 – центробежный насос; 7 – нагнетательная магистраль центробежного насоса; 8 – всасывающая магистраль центробежного насоса; 9 – отстойник; 10 – транспортер гравия; 11 – всасывающая магистраль; 12 – вспомогательный насос; 13 – гидросмеситель; 14 – емкость для приготовления гравийной смеси; 15 – буровой насос; 16 – нагнетательная магистраль бурового насоса; 17 – всасывающая магистраль бурового насоса; 18 – нагнетательный патрубок вспомогательного насоса; 19 – отверстие в емкости для приготовления гравийной смеси; 20 – опоры; 21 – сливная магистраль

ции 4ПА и 3ПА на производстве заменяются более совершенной конструкцией УСП-50.

Готовая гравийная смесь заданной концентрации подается к насосам, как правило, к насосам цементировочных агрегатов, которыми и закачивается в скважину. Преимуществом данной схемы считается наличие подпора во всасывающей магистрали насоса, который способствует улучшению условий работы клапанов при перекачке абразивной смеси.

Схема поверхностного оборудования из пескосмесительных и цементировочных агрегатов широко используется в практике по инициативе ВНИИгаза при сооружении гравийных фильтров в скважинах подземных хранилищ газа. Очевидно, эксплуатация дорогостоящих пескосмесительных и цементировочных агрегатов, а тем более комплексов, состоящих из нескольких пескосмесительных и цементировочных агрегатов, не всегда экономически оправдана. Прежде всего это относится к организациям, имеющим малые объемы гравийных обсыпок, при их разбросанности по территории.

В гидрогеологических организациях пескосмесительные агрегаты отсутствуют, а приобретение их редко обосновано экономической необходимостью из-за сравнительно незначительных концентраций объемов гравийной обсыпки. Поэтому рекомендуется использовать для приготовления гравийной смеси и ее заправки в скважину цементировочные агрегаты ЦА-400, ЦА-320М, ЦА-100 (рис. 8.33, б).

Гравийная смесь готовится непосредственно в емкостях цементировочного агрегата. Всасывающий шланг центробежного насоса цементировочного агрегата спускается в отстойник, а нагнетательный крепится внутри любой из двух емкостей так, чтобы выходящая струя создавала внутри емкости замкнутую круговую циркуляцию. Емкости заполняются из отстойника жидкостью-носителем. При необходимости в емкости добавляют реагенты, способствующие повышению вязкости структурных свойств раствора. Через верхний открытый торец емкости, в которой создана замкнутая круговая циркуляция, подают гравий. Концентрация приготавливаемой смеси регулируется подачей центробежного насоса и подачей гравия.

Вместо центробежного насоса цементировочного агрегата для создания циркуляции в емкости можно использовать буровой насос. Приготовленная гравийная смесь забирается поршневым насосом цементировочного агрегата и закачивается в скважину. Внедрение данной схемы поверхностного оборудования, разработанной автором, показало, что часть гравия откладывается в углах емкости прямоугольного сечения и не захватывается порш-

невым насосом, что усложняет технологический процесс вследствие повышения доли ручного труда, необходимого для приведения осадка во взвешенное состояние.

Для исключения откладывания частиц гравия в стороне от всасывающего клапана рекомендуется устанавливать внутри емкости цементирующего агрегата специальный направляющий кожух. Последний выполняется из жести и имеет форму воронки с открытым нижним отверстием на 40–50 мм большем диаметра всасывающего клапана. Гравийная смесь поступает во всасывающую магистраль насоса с подпором, равным превышению уровня жидкости в емкости по отношению к уровню всасывающего клапана, что создает благоприятные условия для перекачки абразивной смеси. Схема поверхностного оборудования с использованием цементирующего агрегата проста и надежна.

В некоторых случаях на практике не удастся обеспечить работы по сооружению гравийных фильтров в скважине цементирующими агрегатами. Для таких условий рекомендуется схема поверхностной обвязки со стандартным буровым оборудованием. Гравийную смесь готовят в специальной емкости, установленной на поверхности таким образом, чтобы уровень в ней превышал уровень всасывающего клапана насоса, которым предполагается закачивать гравийную смесь в скважину.

Емкость может быть выполнена из отрезка обсадной трубы большого диаметра объема 0,5–0,8 м<sup>3</sup>. В нижней части емкости вырезается отверстие под хrapок всасывающего шланга насоса, закачивающего гравийную смесь в скважину. Хrapок герметично закрепляется в этом отверстии. В нижней части емкости в направлении касательной к корпусу закрепляют входной патрубок, который соединяют гибким шлангом с нагнетательной магистралью гидросмесителя.

Гравийную смесь готовят с помощью вспомогательного насоса, который может быть представлен как поршневой, плунжерной, так и центробежной конструкцией. Жидкость-носитель забирается из отстойника вспомогательным насосом и подается через гибкий шланг к гидросмесителю. В бункер гидросмесителя засыпают гравий, который, смешиваясь со струей после сопла, поступает через гибкий шланг и входной патрубок в емкость. За счет пространственного расположения входного патрубка в емкости создается замкнутая циркуляция, способствующая равномерному распределению твердых частиц по ее сечению и приготовлению высококачественной гравийной смеси. Концентрацию гравийной смеси регулируют путем изменения подачи гравия в бункер гидросмесителя. Готовая гравийная смесь забирается поршневым насосом (табл. 8.14) и закачивается в скважину.

Таблица 8.14

Типоразмер насоса	Диаметр сменных втулок, мм	Удельная подача (в $\text{дм}^3/\text{с}$ ) при частоте двойных ходов поршня в 1 мин			Наибольшее давление на выходе из насоса (в МПа) при частоте двойных ходов поршня в 1 мин			Длина хода поршня, мм	Диаметр патрубка, мм	
		105	95	75	105	95	70		всасывающего	нагнетательного
НБ-32	80	4,9	—	—	4	—	—	160	113	50
	90	6,4	—	—	4	—	—			
	100	8,1	—	—	3,2	—	—			
	110	9,9	—	—	2,6	—	—			
НБ-50	40	6,4	—	—	6,3	—	—	160	113	50
	100	8,1	—	—	5,0	—	—			
	110	9,9	—	—	4,1	—	—			
	120	11,9	—	—	3,4	—	—			
НБ-80	80	6,1	—	—	10,0	—	—	200	113	50
	90	8,0	—	—	8,0	—	—			
	100	10,1	—	—	6,3	—	—			
	110	12,4	—	—	5,2	—	—			
НБ-125 (9МГР)	120	14,9	—	—	4,3	—	—	250	100	60
	40	—	8,8	6,49	—	13	16			
	100	—	11,2	8,25	—	10	13			
	110	—	13,75	10,15	—	8	10			
	125	—	18,15	13,37	—	6	8			

*Примечание.* Степень неравномерности давления на выходе из насоса не более 12 %.

При необходимости из схемы поверхностной обвязки можно исключить гидросмеситель за счет обеспечения подачи гравия непосредственно в емкость через верхнее отверстие. Реализация схемы на практике усложняется необходимостью уравнивать подачу вспомогательного и закачивающего гравийную смесь насоса. Решить проблему уравнивания подачи двух насосов можно за счет оборудования специальной сливной магистрали от верхнего торца емкости к отстойнику двумя путями. Первый путь заключается в развитии вспомогательным насосом большей подачи, чем закачным, а второй — в дополнительной подпитке емкости от трубопровода.

В случае невозможности обеспечения вспомогательным насосом подачи большей, чем закачным и подпитке емкости от трубопровода возможна установка емкости в отстойник (см. рис. 8.33, в). Для этого в дне емкости вырезается дополнительное отверстие диаметром 7–10 мм, а к корпусу привариваются опорные лапы. При погружении емкости в отстойник в них устанавливается единый уровень. Всасывающий шланг закачного насоса опускается в емкость ниже уровня непосредственно через верхний открытый торец. Приготовление смеси в емкости обеспечивается за счет непрерывной циркуляции, создаваемой вспомогательным насосом. Гравий может подаваться в емкость либо непосредственно через ее открытый верхний торец, либо по аналогии с третьей схемой с помощью гидросмесителя, устанавливаемого в нагнетательной магистрали вспомогательного насоса через эксцентричный входной патрубок емкости.

Подача вспомогательного и закачного насосов уравнивается путем перетока жидкости через отверстие в дне либо из отстойника в емкость, либо наоборот. Недостаток этой схемы — менее надежная работа насоса при перекачке абразивной смеси вследствие отсутствия подпора во всасывающей линии закачного насоса. При возможности следует максимально приблизить уровень всасывающих клапанов закачных насосов к уровню жидкости в отстойнике или применять первые три схемы поверхностной обвязки.

Рассмотренные схемы поверхностного оборудования для приготовления гравийной смеси и ее закачки в скважину охватывают практически все многообразие условий проведения работ и обеспечивают успешное решение поставленной цели в случае правильной оценки ситуации, рационального выбора типа оборудования и его компоновки. В табл. 8.15 представлены сведения относительно преимуществ, недостатков и рациональных областей применения различных схем поверхностного оборудования для приготовления гравийной смеси и ее закачки в скважину.

Таблица 8.15

Оборудование	Преимущества	Недостатки	Рациональные области применения	Примечание
Гидросмесители эжекторного типа	Простота выполнения технологических операций, доступность оборудования	Ограниченное рабочее давление в нагнетательной магистрали и как следствие – невозможность использования для подачи гравия в скважину при намыве гравийного фильтра методом обратной или комбинированной циркуляции. Неравномерность поступления гравия в нагнетательную магистраль, сложность регулирования концентрации смеси, предотвращения пробкообразования расслоения и других осложнений	Механизация процесса транспортировки гравия на поверхности, подача гравия в смесительные емкости песко-смесительных и цементировочных агрегатов. Допускается использование для подачи гравия в кольцевое пространство скважины при намыве гравийного фильтра в восходящем потоке и при отсутствии циркуляции	Использование возможно только при обеспечении равномерного поступления гравия в струю жидкости, которое достигается установкой на корпусе гидросмесителя вибратора, эксцентричного выполнения камеры смешения и т.д.
Смесители бункерного типа	Возможность заправки смеси под большим давлением при исключении контакта насоса с абразивной смесью	Сложность изготовления и эксплуатации бункеров, как сосудов, работающих под большим давлением. Повышенная опасность ведения работ. Трудоемкость процессов, связанных с герметизацией люка	Сооружение гравийных фильтров при незначительных объемах засыпки преимущественно крупной фракции гравия при малых глубинах скважин	Использование возможно только при малых объемах бункера, например при замене бункера на газовые баллоны. Перед началом работ необходимо произвести опрессовку обвязки на полуторакратное рабочее давление

Продолжение табл. 8.15

Оборудование	Преимущества	Недостатки	Рациональные области применения	Примечание
Поршневые насосы высокого давления для закачки гравийной смеси в скважину	Возможность закачки гравийной смеси на любую глубину при сооружении гравийного фильтра методом комбинированной или обратной циркуляции	Повышенный износ гидравлической части насоса при перекачке абразивной смеси. Повышенные требования к качеству фракционирования гравия	Сооружение гравийных фильтров в скважинах любой глубины и конструкции при размере частиц не более 4–5 мм	Необходимо тщательное фракционирование гравия перед закачкой в скважину с целью исключения некондиционных частиц
Пескосмесительные агрегаты	Приготовление гравийной смеси высокого качества, механизация процесса закачки гравия. Улучшенная работа насоса при перекачке абразивной смеси за счет подпора	Большая стоимость оборудования	Оборудование гравийными фильтрами крупных и ответственных объектов	То же
Цементировочные агрегаты	Приготовление гравийной смеси высокого качества. Технологичность процесса. Улучшенная работа насоса при перекачке абразивной смеси за счет подпора	Неудовлетворительная укомплектованность отрасли цементировочными агрегатами	Оборудование скважин любой глубины и конструкции гравийными фильтрами высокого качества методом комбинированной и обратной циркуляции	«
Смесительная емкость	Простота и доступность используемого оборудования. Возможно получение гравийной смеси высокого качества при правильном использовании	Сложность уравнивания подачи вспомогательного и закачного насоса, трудоемкость процессов	Для приготовления гравийной смеси в случае отсутствия пескосмесительных и цементировочных агрегатов	«



Некоторыми зарубежными фирмами созданы комплексы поверхностного оборудования для проведения работ по гравийной обсыпке. Комплексы поверхностного оборудования смонтированы на базе тяжелых автомобилей и включают:

- смесительный блок для приготовления гравийной смеси;
- насос высокого давления для закачки гравийной смеси в скважину;
- бункера для гравия;
- бункер для жидкости-носителя;
- вспомогательный насос для приготовления смеси и подачи жидкости-носителя в смесительный блок;
- систему транспортеров для загрузки бункеров гравием и их разгрузки в смесительный блок;
- контрольно-измерительную аппаратуру.

Поверхностное оборудование для проведения работ по гравийной засыпке сложнее и дороже цементировочного и другого оборудования, используемого на скважинах. Несмотря на это разработано много модификаций различных агрегатов, что свидетельствует о важности этапа подготовки гравийной смеси на поверхности и ее закачки в скважину в общем цикле строительства. В нашей стране комплексы поверхностного оборудования для приготовления гравийной смеси и ее подачи в скважину на единой транспортной базе не разработаны.

## **8.4. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГРАВИЙНОГО ФИЛЬТРА**

### **8.4.1. ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ГРАВИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ФИЛЬТРА**

Размер частиц гравийных фильтров в поперечном сечении плавно уменьшается от каркаса в направлении водоносного пласта. Такие фильтры характеризуются повышенной суффозионной устойчивостью и минимальным гидравлическим сопротивлением. В практике создания фильтров в экспериментальных объемах использовали многослойные гравийные фильтры, которые являются самой упрощенной моделью фильтра с плавным изменением размера частиц в поперечном сечении. Фильтры с постепенным уменьшением диаметра гравийных частиц от каркаса в направлении пласта (ФПУ) не нашли практического применения из-за отсутствия разработанной методики фракционирования частиц при закачке, технологии намыва гравия и соответствующих технических средств.

Автором разработаны теоретические основы фракционирования частиц в скважине, проведен комплекс экспериментальных исследований и предложена технология намыва гравийного фильтра типа ФПУ и соответствующие технические средства. Разделение частиц гравия по фракциям в поперечном сечении потока и затем фильтра, при котором наиболее крупные фракции откладываются у каркаса, а наиболее мелкие — у стенок скважины, происходит при создании в кольцевом пространстве градиента давления или после прохождения смеси специальных устройств — отклонителей. Автор считает необходимым привести ниже теоретические основы разделения частиц в поле градиента давления и после прохождения отклонителей.

### Намыв фильтра в поле градиента давления

Предположим, что в поперечном сечении кольцевого пространства скважины в зоне фильтра существует некоторый градиент давления, причем давление постепенно убывает от стенок скважины к поверхности фильтра-каркаса.

На частицу гравия, движущуюся в потоке и попадающую в зону влияния градиента давления, будет действовать сила  $F_d$ , смещающая ее к поверхности фильтра-каркаса.

$$F_d = \int_S d \operatorname{grad} p dS = \pi d^3 \operatorname{grad} p, \quad (8.76)$$

где  $F_d$  — сила градиента давления;  $d$  — характерный размер частицы гравия;  $\operatorname{grad} p$  — градиент давления в кольцевом пространстве скважины;  $S$  — площадь поверхности частицы.

В процессе смещения частицы к фильтру-каркасу возникает сила сопротивления  $F_c$ , пытающаяся замедлить такое перемещение

$$F_c = \psi \rho d^2 v_x^2, \quad (8.77)$$

где  $\psi$  — коэффициент сопротивления обтеканию частицы гравия;  $\rho$  — плотность жидкости-носителя;  $v_x$  — скорость частицы гравия в поперечном сечении потока в направлении фильтровой колонны, т.е. в направлении оси  $x$ .

Запишем дифференциальное уравнение движения частицы гравия в поле градиента давления

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_d - F_c = \pi d^3 \operatorname{grad} p - \psi \rho d^2 v_x^2, \quad (8.78)$$

где  $m$  — масса частицы гравия;  $x$  — расстояние, проходимое час-

тицей в поперечном сечении потока в направлении к фильтровой колонне, т.е. в направлении оси  $x$ , под влиянием силы градиента давления;  $t$  — время.

Разделим (8.78) на массу частицы  $m$  и получим

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{6 \text{grad } p}{\rho} - \frac{6\psi}{\pi d} v_x^2 = \frac{6\psi}{\pi d} \left( \frac{\text{grad } p \pi d}{\psi \rho} - v_x^2 \right). \quad (8.79)$$

Введем обозначения

$$\frac{6\psi}{\pi d} = a. \quad (8.80)$$

$$b = \frac{\pi d \text{grad } p}{\psi \rho}. \quad (8.81)$$

Перепишем уравнения (8.79) с учетом равенств (8.80) и (8.81) в следующем виде:

$$\frac{dv_x}{dt} = a(b - v_x^2). \quad (8.82)$$

Разделяя переменные, получаем

$$\frac{dv_x}{b - v_x^2} = a dt. \quad (8.83)$$

Интегрируя выражение (8.83), получаем

$$\frac{1}{2\sqrt{b}} \ln \frac{v_x + \sqrt{b}}{v_x - \sqrt{b}} = at + c_1. \quad (8.84)$$

Определим постоянную интегрирования  $c_1$ , подставив в равенство (8.84) начальные условия  $x = 0$ ;  $t = 0$ ;  $v_x = 0$ :

$$c_1 = \frac{1}{2\sqrt{b}} \ln 1 = 0; \quad c_1 = 0. \quad (8.85)$$

Преобразуем уравнение (8.84)

$$\ln \frac{v_x + \sqrt{b}}{v_x - \sqrt{b}} = 2\sqrt{b} at; \quad (8.86)$$

$$\ln \frac{\sqrt{b} \left( \frac{v_x}{\sqrt{b}} + 1 \right)}{\sqrt{b} \left( \frac{v_x}{\sqrt{b}} - 1 \right)} = 2\sqrt{b} at. \quad (8.87)$$

После сокращения  $\sqrt{b}$  под знаком логарифма с учетом того, что

$$\ln \frac{\frac{v_x}{\sqrt{b}} + 1}{\frac{v_x}{\sqrt{b}} - 1} = 2 \operatorname{arth} \frac{v_x}{\sqrt{b}}. \quad (8.88)$$

Имеем

$$\operatorname{arth} \frac{v_x}{\sqrt{b}} = \sqrt{b} at \quad (8.89)$$

или

$$\frac{v_x}{\sqrt{b}} = \operatorname{th} \sqrt{b} at. \quad (8.90)$$

Отсюда

$$v_x = \sqrt{b} \operatorname{th} \sqrt{b} at. \quad (8.91)$$

Однако  $v_x = dx/dt$ , тогда

$$dx = \sqrt{b} \operatorname{th} \sqrt{b} at dt. \quad (8.92)$$

Интегрируя уравнение (8.92), получаем

$$x = \sqrt{b} \frac{1}{a\sqrt{b}} \ln \operatorname{ch} \sqrt{b} at + c_2. \quad (8.93)$$

Подставляя начальные условия (8.85) в равенство (8.93), определяем постоянную интегрирования  $c_2$ , так как  $\operatorname{ch} 0 = 1$ , а  $\ln 1 = 0$ , то  $c_2 = 0$ .

Преобразовав выражение (8.93), получим

$$x = \frac{1}{d} \ln \operatorname{ch} \sqrt{b} at. \quad (8.94)$$

Подставляя в равенство (8.94) значения  $a$  и  $b$  из (8.80) и (8.81), получим

$$x = \frac{\pi d}{6\psi} \ln \operatorname{ch} \frac{6\psi t}{\pi d} \sqrt{\frac{\operatorname{grad} \rho}{\psi \rho}}. \quad (8.95)$$

Решая уравнение (8.95) относительно времени  $t$ , необходимо-го для смещения частицы в поперечном сечении потока в направлении фильтровой колонны на расстояние  $x = r$ , получаем

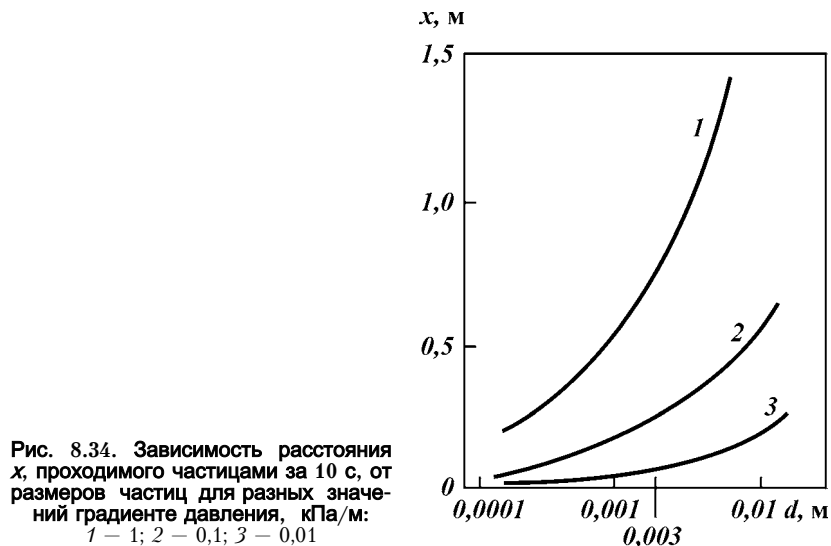
$$t = \frac{\pi d}{6\psi} \frac{\operatorname{arch} e^{\frac{6\psi r}{\pi d}}}{\sqrt{\frac{\operatorname{grad} p \pi d}{\psi \rho}}}. \quad (8.96)$$

Решая уравнение (8.95) относительно градиента давления в кольцевом пространстве скважины  $\operatorname{grad} p$ , необходимого для смещения частицы заданной крупности в поперечном сечении потока в направлении фильтровой колонны на расстояние  $r$  за время  $t$ , имеем

$$\operatorname{grad} p = \frac{\pi \rho d}{36\psi t^2} \operatorname{arch}^2 e^{\frac{6\psi r}{\pi d}}. \quad (8.97)$$

Из уравнений (8.95) и (8.96) следует, что частицы гравия больших размеров проходят расстояние  $r$  быстрее, чем мелкие частицы. Это объясняется тем, что с ростом размеров частиц сила градиента давления на частицу увеличивается быстрее силы сопротивления, так как первая пропорциональна диаметру частицы в кубе, а вторая — квадрату диаметра частиц.

При больших значениях градиента давления увеличивается различие между расстояниями, проходимыми частицами различной крупности в поперечном сечении потока за одно и то же время  $t$  (рис. 8.34). За 10 с при градиенте давления 1 кПа/м частицы гравия размером 3 мм переместятся в сторону фильтра-



каркаса на 200 мм дальше, чем частицы размером 1 мм. При уменьшении градиента давления до 10 Па/м это различие уменьшается с 200 до 30 мм. В связи с этим регулировать процесс разделения частиц в потоке в зависимости от их крупности можно посредством изменения градиента давления в кольцевом пространстве скважины в зоне установки фильтра, величина которого регулируется технологическими параметрами закачки гравия в скважину.

Для выбора рабочего градиента давления не только важно знать расстояние, проходимое частицей за определенный промежуток времени, так как необходимая величина этого расстояния известна, но и время, необходимое для преодоления частицей различной крупности известного, расстояния (рис. 8.35).

При больших градиентах давления разница во времени прохождения частицами различной крупности определенного расстояния уменьшается, поэтому обеспечить надежную классификацию частиц гравия в зоне фильтра в зависимости от их крупности при больших градиентах давления сложно. С уменьшением градиента давления в кольцевом пространстве скважины крутизна графиков (см. рис. 8.35) увеличивается и соответственно улучшаются рабочие характеристики гидравлической классификации. Однако при малых градиентах давления увеличивается время, необходимое для прохождения частицей определенной крупности известного расстояния, которое с другой стороны ог-

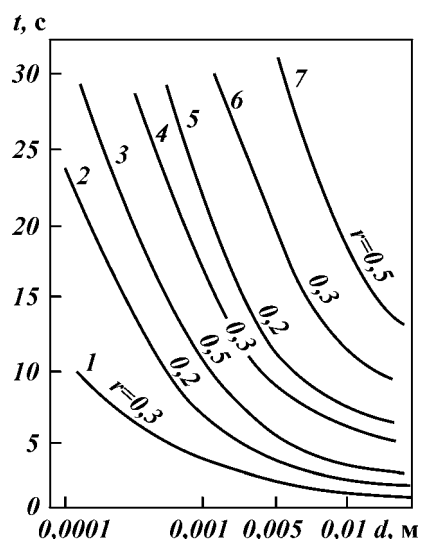


Рис. 8.35. Зависимость времени прохождения определенного расстояния  $r$  (в м) частицей гравия от ее крупности при разных значениях градиента давления, кПа/м:  
1 – 1; 2, 3, 4 – 0,1; 5, 6, 7 – 0,01

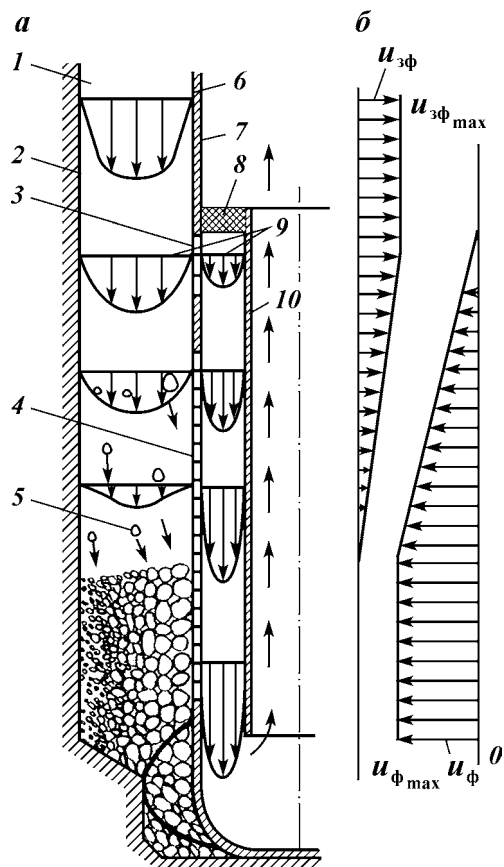
раничивается временем прохождения частицей в вертикальной плоскости зоны влияния градиента давления (от верхних отверстий фильтра до поверхности уже намытого гравия).

Рассмотрим возможные варианты создания в кольцевом пространстве скважины требуемого для нормального процесса фракционирования градиента давления. Наиболее простой способ сводится к обеспечению внутри фильтровой колонны больших скоростей потока, чем за фильтром (рис. 8.36).

Гравий выбранного фракционного состава закачивают в нисходящем потоке через кольцевое пространство скважины 1 или через специальный распределительный узел. Внутри фильтра устанавливают вспомогательную колонну труб, причем зазор между фильтровой и вспомогательной колоннами герметизируют

Рис. 8.36. Принципиальная схема создания градиента давления в кольцевом пространстве скважины (а) и эпюры скоростей нисходящего потока за фильтром и внутри его (б):

1 — кольцевое пространство скважины; 2 — скважина; 3 — верхние отверстия фильтра; 4 — фильтр; 5 — частица гравия; 6 — фильтровая колонна; 7 — глухая труба; 8 — герметизирующий элемент; 9 — эпюры скоростей нисходящего потока за и внутри фильтра; 10 — вспомогательная колонна



выше верхних отверстий фильтра сальником. Скорости движения смеси в кольцевом пространстве постепенно уменьшаются от максимальных значений в глухой части над верхними отверстиями фильтра до нуля у уровня уже намытого гравийного слоя за счет перетекания жидкости через отверстия каркаса фильтра. Скорости движения жидкости-носителя внутри фильтровой колонны  $u_{\phi}$  увеличиваются от нуля у верхних отверстий фильтра до максимальных значений у уровня уже намытого гравийного слоя. Нисходящая фильтрация через намытый фильтр почти отсутствует вследствие высоких гидравлических сопротивлений.

Средние скорости нисходящего потока внутри фильтровой колонны  $u_{\phi}$  могут быть выше средних скоростей за фильтром  $u_{зф}$  в случае, если площадь кольцевого пространства между стенками скважины и фильтровой колонной больше площади кольцевого пространства между фильтром и вспомогательной колонной. Отмеченное соотношение справедливо только при отсутствии поглощения жидкости-носителя в процессе закачки, т.е. при постоянном расходе в нагнетательной и сливной магистралях. Если жидкость-носитель частично поглощается, то площадь кольцевого пространства между стенками скважины и фильтровой колонной должна превышать площадь кольцевого пространства между фильтром и вспомогательной колонной более чем в  $Q/(Q - Q_{\text{п}})$  ( $Q$  и  $Q_{\text{п}}$  — расход соответственно закачки и поглощения).

С учетом потерь напора в каркасе фильтра при перетекании жидкости из кольцевого пространства скважины внутрь фильтровой колонны  $\Delta p'$  перепад давления в кольцевом пространстве составляет

$$\Delta p = \rho(\bar{u}_{\phi}^2 - \bar{u}_{зф}^2) - \Delta p', \quad (8.98)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости-носителя;  $\bar{u}_{\phi}$  — средняя скорость нисходящего потока внутри фильтра;  $\bar{u}_{зф}$  — средняя скорость нисходящего потока в кольцевом пространстве скважины.

Разница давлений в кольцевом пространстве за фильтром и внутри него обуславливает возникновение и поддержание между стенками скважины и фильтровой колонной градиента давления, средняя величина которого определяется из выражения

$$\text{grad } p = 2 \frac{\rho(\bar{u}_{\phi}^2 - \bar{u}_{зф}^2) - \Delta p'}{D_0 - D_{\phi}}, \quad (8.99)$$

где  $D_0$  — диаметр скважины;  $D_{\phi}$  — диаметр фильтровой колонны.

Средняя скорость нисходящего потока в кольцевом пространстве скважины за фильтром (см. рис. 8.36, б)



$$\bar{u}_{\text{эф}} = 0,5u_{\text{эф max}} = \frac{Q}{1,57(D_0^2 - D_{\text{ф}}^2)}. \quad (8.100)$$

По аналогии средняя скорость нисходящего потока в кольцевом пространстве внутри фильтра (см. рис. 8.36, б)

$$\bar{u}_{\text{ф}} = 0,5u_{\text{ф max}} = \frac{Q}{1,57(D_0^2 - D_{\text{в}}^2)}. \quad (8.101)$$

Приравнивая выражения (8.100) и (8.101), находим уравнение для определения диаметра вспомогательной колонны, которую следует установить внутри фильтровой с целью создания в кольцевом пространстве скважины расчетного среднего градиента давления

$$D_{\text{в}} = \sqrt{2D_{\text{ф}}^2 - D_0^2}. \quad (8.102)$$

В случае установки внутри фильтра вспомогательной колонны постоянного диаметра качество фракционирования гравия в поперечном сечении по высоте фильтра неравномерное. В начальный момент закачки время движения частиц в поле градиента давления значительное и к каркасу фильтра успевают переместиться не только крупные фракции, но и более мелкие. При намыве верхних интервалов фильтра время нахождения частиц в поле градиента давления минимальное и смесь не успевает расщелиться на фракции. Поэтому в верхних и нижних интервалах фильтра плавного уменьшения размеров частиц от каркаса к стенкам скважины не наблюдается.

В оптимальном случае градиент давления в зафильтровом пространстве должен расти по мере намыва фильтра. При этом уменьшение времени движения частиц в поле градиента давления будет компенсироваться увеличением величины градиента давления. Автором предложено устанавливать внутри фильтра вспомогательную трубу, диаметр которой увеличивается от нижних к верхним отверстиям фильтра, что при правильном выборе геометрических соотношений обеспечивает требуемое изменение градиента давления по мере намыва фильтра.

С целью обеспечения фракционирования частиц (рис. 8.37) в поперечном сечении верхних интервалов фильтра над основным каркасом рекомендуется устанавливать дополнительный фильтр 7 расчетной длины. Кроме создания в кольцевом пространстве скважины 2 градиента давления дополнительный фильтр при закачке гравия (методом обратной или комбинированной циркуляции) может выполнять функцию контроля за окончанием на-

мыва гравия. При перекрытии поверхности дополнительного фильтра гравием давление нагнетания на насосе резко возрастает, что свидетельствует о заполнении расчетной полости гравием и окончании работ.

Учитывая, что время движения частицы гравия в поле градиента давления уменьшается с максимума (в начальный этап закачки) до минимума (в конечный этап закачки), градиент давления в кольцевом пространстве скважины при постоянных значениях  $r$  должен увеличиваться. Максимальное и минимальное время движения частицы определяется уравнением Риттингера. При подстановке полученных значений времени в уравнение (8.97) можно определить требуемое увеличение градиента давления в кольцевом пространстве скважины в процессе закачки.

Максимальное время движения частицы в кольцевом пространстве скважины в поле градиента давления определяется выражением

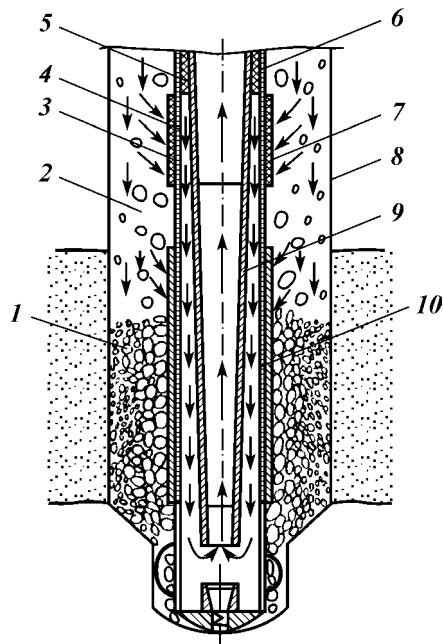
$$t_{\max} = \frac{l_d + l_{\text{осн}} + l_{\text{отс}}}{\bar{u}_{\text{зф}} + v}, \quad (8.103)$$

где  $l_d$ ,  $l_{\text{осн}}$ ,  $l_{\text{отс}}$  — длина соответственно дополнительного фильтра, основного фильтра, отстойника;  $v$  — гидравлическая крупность частиц гравия.

Минимальное время движения частицы от верхних отверстий дополнительного фильтра до забоя

$$t_{\min} = \frac{l_d}{\bar{u}_{\text{зф}} + v}. \quad (8.104)$$

Текущее время движения частицы гравия в поле градиента давления



**Рис. 8.37. Устройство для фракционирования гравия в поле градиента давления:**

1 — гравий; 2 — кольцевое пространство скважины; 3 — верхние отверстия дополнительного фильтра; 4 — глухая труба; 5 — герметизирующий элемент; 6 — фильтровая колонна; 7 — дополнительный фильтр; 8 — скважина; 9 — вспомогательная колонна; 10 — фильтр

$$t = \frac{(l_d + H)w_{\text{кп}} - w}{Q + vw_{\text{кп}}}, \quad (8.105)$$

где  $H$  — расстояние от забоя скважины до верхних отверстий основного фильтра;  $w_{\text{кп}}$  — площадь поперечного сечения кольцевого пространства скважины (живое сечение потока);  $w$  — объем закачанного к моменту  $t$  гравия.

За период времени между  $t_{\text{max}}$  и  $t_{\text{min}}$  градиент давления должен возрасти с минимальных  $\text{grad } p_{\text{min}}$  до максимальных  $\text{grad } p_{\text{max}}$  значений

$$\text{grad } p_{\text{min}} = \frac{\pi d(Q + vw_{\text{кп}})^2}{36\psi(l_d + H)^2 w_{\text{кп}}^2} \text{arch}^2 e^{\frac{6\psi r}{\pi d}}; \quad (8.106)$$

$$\text{grad } p_{\text{max}} = \frac{\pi d(Q + vw_{\text{кп}})^2}{36\psi l_d^2 w_{\text{кп}}^2} \text{arch}^2 e^{\frac{6\psi r}{\pi d}}. \quad (8.107)$$

Диаметр вспомогательной трубы, установленной внутри фильтровой колонны, должен обеспечивать требуемые максимальные скорости нисходящего потока за фильтровой колонной на уровне поверхности намытого гравийного фильтра, а следовательно, и средние скорости потока внутри фильтровой колонны и соответственно требуемый градиент давления.

Совместное решение уравнений (8.97) и (8.98) с (8.106) и (8.107) позволяет получить выражение для определения скоростей нисходящего потока внутри фильтровой колонны у слоя намытого гравия, которые равны удвоенным средним скоростям. Средняя скорость нисходящего потока внутри фильтровой колонны в интервале между верхними отверстиями основного и дополнительного фильтров, требующаяся для поддержания величины максимального градиента давления в конечный момент закачки, определяется следующей формулой:

$$u_{\phi_k} = \sqrt{\bar{u}_{3\phi}^2 - \frac{\pi d(D_0 - D_{\phi})}{72\psi t_{\text{max}}^2} \text{arch}^2 e^{\frac{6\psi r}{\pi d}}}. \quad (8.108)$$

Средняя скорость нисходящего потока внутри фильтровой колонны в начальный момент закачки в интервале от верхних отверстий дополнительного фильтра до нижних отверстий основного фильтра может быть найдена из равенства

$$u_{\phi_0} = \sqrt{\bar{u}_{3\phi}^2 - \frac{\pi d(D_0 - D_{\phi})}{72\psi t_{\text{min}}^2} \text{arch}^2 e^{\frac{6\psi r}{\pi d}}}. \quad (8.109)$$

Для поддержания требуемых скоростей можно установить внутри фильтровой колонны вспомогательную трубу в виде усеченного конуса с минимальным диаметром у нижних отверстий и максимальным диаметром у верхних отверстий основного фильтра. Диаметр вспомогательной колонны выбирается таким образом, чтобы скорость нисходящего потока внутри фильтровой колонны у поверхности намытого слоя гравия соответствовала расчетным значениям [см. формулы (8.108), (8.109)]. Площадь кольцевого пространства между фильтровой и вспомогательной колоннами  $w'_{\text{кп}}$  должна обеспечивать удвоенные скорости нисходящего потока при заданном расходе закачки

$$w'_{\text{кп}} = \frac{Q}{2u_{\text{ф}}}. \quad (8.110)$$

Если выразить величину  $w'_{\text{кп}}$  через диаметр вспомогательной  $D_{\text{в}}$  и фильтровой  $D_{\text{ф}}$  колонн, то

$$D_{\text{в}} = \sqrt{D_{\text{ф}}^2 - \frac{Q}{2 \cdot 0,785 u_{\text{ф}}}}. \quad (8.111)$$

Подставляя в равенство (8.111) значения  $u_{\text{ф}}$  из уравнений (8.99) и (8.100), получаем необходимый диаметр вспомогательной колонны у верхних и нижних отверстий основного фильтра

$$D_{\text{вmax}} = \sqrt{D_{\text{ф}}^2 - \frac{2Q}{\pi} \left( \frac{\text{grad } p_{\text{max}} (D_0 - D_{\text{ф}}) + 2\Delta p'}{2p} + \frac{16Q^2}{\pi^2 (D_{\text{с}}^2 - D_{\text{ф}}^2)^2} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (8.112)$$

$$D_{\text{вmin}} = \sqrt{D_{\text{ф}}^2 - \frac{2Q}{\pi} \left( \frac{\text{grad } p_{\text{min}} (D_0 - D_{\text{ф}}) + 2\Delta p'}{2p} + \frac{16Q^2}{\pi^2 (D_{\text{с}}^2 - D_{\text{ф}}^2)^2} \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (8.113)$$

На основании полученных значений большего (у верхних отверстий основного фильтра) и меньшего (у нижних отверстий основного фильтра) диаметров вспомогательной колонны, отнесенных к длине основного фильтра, можно определить угол наклона образующей конусной вспомогательной трубы к оси скважины.

Длина дополнительного фильтра выбирается из условий необходимости обеспечения перемещения частицы заданной крупности в поперечном сечении потока в направлении фильтровой колонны на заданное расстояние при максимально возможном (из условий проведения работ) градиенте давления за время осе-

вого перемещения частицы в интервале между верхними отверстиями дополнительного и основного фильтров, определяемое на основе уравнений Риттингера

$$l_d = \frac{\pi d (Q + v w_{\text{кп}})}{6 \psi w_{\text{кп}}} \frac{\operatorname{arch} e^{\frac{6 \psi \Gamma}{\pi d}}}{\sqrt{\frac{\operatorname{grad} p_{\max} \pi d}{\psi \rho}}}. \quad (8.114)$$

Характеристики гидравлической классификации не зависят от расхода жидкости  $Q$ , а определяются геометрическим соотношением между размерами скважины, фильтра и внутрифильтровой трубы. Это объясняется тем, что согласно принятому допущению о равенстве скоростей движения жидкости и частицы в кольцевом пространстве скважины с уменьшением  $Q$  увеличивается время движения частицы в зоне влияния градиента давления. За счет увеличения времени движения частицы даже при меньших значениях градиента давления возможно качественное разделение их по крупности. Очевидно, что такой вывод справедлив только в случаях, когда скоростью свободного падения частиц в сравнении со скоростью жидкости можно пренебречь. При одном порядке этих величин, что наблюдается особенно в нижних интервалах фильтра, где скорость потока уменьшается, характеристика классификации частиц по крупности в поперечном сечении потока зависит от расхода жидкости. При проверке этого положения опытным путем было установлено влияние на характеристики гидравлической классификации величин градиента давления, времени движения частиц. Градиент давления в кольцевом пространстве скважины изменился за счет изменения расхода жидкости и диаметра внутрифильтровой трубы. Время движения частиц изменялось путем изменения расхода жидкости или интервала отбора проб частиц из кольцевого пространства модели. Результаты опытов представлены в табл. 8.16.

Из проведенных данных опытов следует, что в процессе гидравлической классификации частиц гравия в зоне фильтра под воздействием градиента давления возможно получение оптимального гидравлического фильтра, в котором размер частиц постепенно уменьшается от фильтра-каркаса к стенкам скважины. Распределение частиц гравия в поперечном сечении фильтра, намываемого на модели, близкое к оптимальному, было получено только в одном опыте при  $G = 3,0 \cdot 10^3$  и интервале отбора проб 2 м (от верхних отверстий фильтра). С уменьшением времени движения частиц под влиянием градиента давления, что наблюдается при увеличении гидродинамического критерия подобия  $G$

Таблица 8.16

**Результаты экспериментов по гидравлической классификации частиц гравия  
в зоне фильтра под воздействием градиента давления**

Но- мер опы- та	Крите- рий гид- родина- миче- ского подобия $G$	Градиент давления $\text{grad } p$ , [кПа/м]	Интер- вал от- бора проб от верхних отвер- стий фильтра	Диаграмма распределе- ния частиц в зависимо- сти от крупности					Характери- стика гидрав- лической классифика- ции частиц в поперечном сечении фильтра
				-1	-0,5	0	0,5	$\frac{1}{\mu}$	
1	$3,0 \cdot 10^3$	1	$0,5 \bar{d}$						Классифика- ция не проис- ходит. Части- цы максималь- ных размеров движутся в центре потока Наблюдается слабая клас- сификация вблизи стенок скважины
			$1 \bar{d}$						Наблюдается хорошее разделение ча- стиц по круп- ности Разделение частиц близ- кое к опти- мальному. Частицы мак- симальных размеров ук- ладываются у поверхности фильтра, а ми- нимальных – у стенок сква- жины
			$1,5 \bar{d}$						Классифика- ция наблюда- ется То же
		0,5	$2,0 \bar{d}$						Наблюдается слабая класси- сификация в центральных сечениях пото- ка и вблизи стенок сква- жины
			$0,5 \bar{d}$						
			$1 \bar{d}$ $1,5 \bar{d}$						

Продолжение табл. 8.16

Но- мер опы- та	Крите- рий гид- родина- миче- ского подобия $G$	Градиент давления $\text{grad } p$ , [кПа/м]	Интер- вал от- бора проб от верхних отвер- стий фильтра	Диаграмма распределе- ния частиц в зависимо- сти от крупности					Характери- стика гидрав- лической классифика- ции частиц в поперечном сечении фильтра
				-1	-0,5	0	0,5	$1_j$	
2	100	1	$2,0 \bar{d}$						Хорошая классифика- ция частиц по всему сечению потока
			0,5						Классифика- ция частиц в потоке по крупности не происходит
			$1$ $1,5$ $2 \bar{d}$						Наблюдается слабая клас- сификация частиц в цен- тральных се- чениях потока и вблизи сте- нок скважины Классифика- ция не наблю- дается То же
			$0,5 \bar{d}$						Слабая клас- сификация вблизи стенок скважины
			$1 \bar{d}$ $1,5 \bar{d}$						Хорошая классифика- ция по всему сечению фильтра
			$2,0 \bar{d}$						
		0,5	$1,5 \bar{d}$						Классифика- ция не наблю- дается
			$2,0 \bar{d}$						

Продолжение табл. 8.16

Но- мер опы- та	Крите- рий гид- родина- миче- ского подобия $G$	Градиент давления $\text{grad } p$ , [кПа/м]	Интер- вал от- бора проб от верхних отвер- стий фильтра	Диаграмма распределе- ния частиц в зависимо- сти от крупности					Характери- стика гидрав- лической классифика- ции частиц в поперечном сечении фильтра
				-1	-0,5	0	0,5	$1_j$	
		0,1							Классифика- ция не наблю- дается
3	1000	1	$2,0 \bar{d}$						Слабая клас- сификация частиц вблизи фильтра-кар- каса Классифика- ция не наблю- дается
	$5,0 \cdot 10^3$	1	$\bar{d}$						
4	1000		$\bar{d}$						То же
	$6,0 \cdot 10^3$								

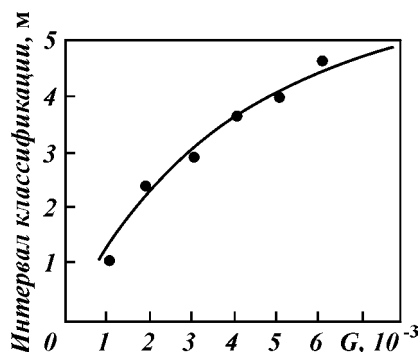
или уменьшении интервала отбора проб, качество гидравлической классификации ухудшается. Так при интервале отбора проб 0,5 м от верхних отверстий фильтра-каркаса гидравлической классификации частиц на модели не наблюдалось при любых значениях критерия подобия  $G$ .

С увеличением значений  $G$ , а следовательно, и расхода жидкости в процессе сооружения гравийного фильтра, качество классификации при аналогичных интервалах отбора проб снижается. Необходимо отметить, что указанного снижения качества классификации можно избежать за счет увеличения интервала отбора проб. При увеличении интервала отбора проб с 1 до 1,5 м или с 1,5 до 2 м и была получена диаграмма распределения частиц по крупности при  $G = 4 \cdot 10^3$ , аналогичная полученным диаграммам при  $G = 5 \cdot 10^3$ .

Очевидно, что в опытах 3 и 4 не было получено гидравлической классификации частиц именно за счет недостаточного интервала отбора проб, ограниченного размерами модели. С увеличением интервала отбора проб при значениях  $G = 5 \cdot 10^3$  может быть получена диаграмма распределения частиц в поперечном сечении фильтра в зависимости от крупности, аналогичная полученным в опытах 1 и 2. На практике важно правильно задаться



Рис. 8.38. Зависимость интервала классификации частиц в зоне фильтра под влиянием поля градиента давления от критерия пробкообразования



интервалом классификации частиц гравия, достаточным для обеспечения разделения частиц по фракциям близкого к оптимальному. В этой связи на основании экспериментов была проделана следующая экстраполяция интервалов классификации частиц в зависимости от критерия подобия потока (рис. 8.38). Определенным значениям  $G$ , выбранным с учетом предотвращения пробкообразования, соответствует строго определенный интервал классификации частиц, при котором частицы успевают разделиться по крупности. Значениям  $G = (3-4) \cdot 10^3$  соответствует интервал классификации частиц, равный 3 м. С увеличением критерия подобия до  $6 \cdot 10^3$  минимально допустимый интервал классификации составляет 5 м.

#### Фракционирование гравия после прохождения смесью отклонителей

Предположим, что поток гравийной смеси над фильтром движется под некоторым углом  $\eta$  к фильтровой колонне. Такое направление потока можно задавать, например, установкой на внешней поверхности фильтровой колонны над верхними отверстиями фильтра отклонителей. Рассмотрим распределение частиц гравия по крупности после прохождения потоком отклонителей (рис. 8.39).

Частицы гравия различной крупности над фильтром движутся с некоторой скоростью  $v_0$  под углом  $\eta$  к фильтровой колонне. Дифференциальное уравнение движения частицы в направлении оси  $x$  запишем в следующей форме:

$$m = \frac{d^2x}{dt} = -F_c = -\psi \rho d^2 v_x^2, \quad (8.115)$$

где  $F_c$  — сила сопротивления;  $\psi$  — коэффициент сопротивления;

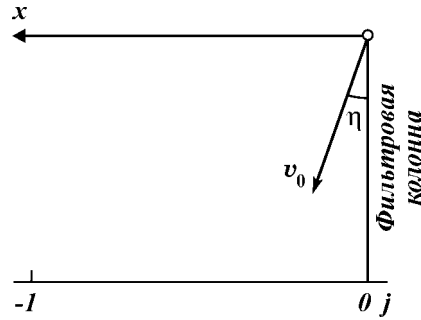


Рис. 8.39. Расчетная схема гидравлической классификации частиц гравия в поперечном сечении потока по крупности после прохождения отклонителей

$\rho$  — плотность жидкости;  $d$  — диаметр гравия;  $v_x$  — скорость частицы в направлении оси  $x$ .

Разделив уравнение (8.115) на массу частицы  $m$  и умножив на время  $dx$ , а затем разделив переменные, получим

$$\frac{v_x dv_x}{\frac{6\psi}{\pi d} v_x^2} = -dx. \quad (8.116)$$

В результате интегрирования выражения (8.116) и подстановки начальных условий  $x = 0$ ;  $v_x = v_0 \sin \eta$  можно записать

$$x = \frac{3\psi}{\pi d} \ln \frac{v_0^2}{v_x^2} \sin^2 \eta. \quad (8.117)$$

Логарифмируя уравнение (8.117) и решая относительно  $v_x$ , получаем

$$v_x = \frac{v_0 \sin \eta}{e^{\frac{\pi dx}{6\psi}}}. \quad (8.118)$$

Заменяя  $v_x$  на  $dx/dt$ , разделяя переменные и интегрируя с учетом начальных условий  $t = 0$ ;  $x = 0$  и после преобразования получаем уравнение движения частицы в направлении оси  $x$

$$x = \frac{\pi d}{6\psi} \ln \left( \frac{6\psi}{\pi d v_0 t \sin \eta} + 1 \right). \quad (8.119)$$

Решив уравнение (8.119) относительно  $t$ , запишем

$$t = \frac{\pi d}{6\psi v_0 \sin \eta} \left( e^{\frac{6\psi x}{\pi d}} - 1 \right). \quad (8.120)$$

Уравнение (8.120) характеризует время, необходимое для преодоления частицей после прохождения отклонителя расстояния  $r$  в горизонтальной плоскости от фильтра к стенкам скважины.

На рис. 8.40 показана функция расстояния в горизонтальной плоскости, проходимого частицей после отклонителя, в зависи-

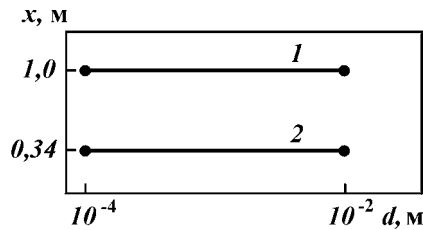
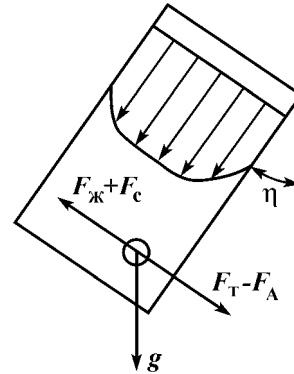


Рис. 8.40. Зависимость расстояния в горизонтальной плоскости, проходимого частицей различной крупности, от ее диаметра

Рис. 8.41. Гравийная частица в отклонителе и действующие на нее силы



мости от ее диаметра. Из представленных графиков, построенных для значений  $\eta = 10^\circ$   $t = 10$  с и  $v_0 = 0,2$  (2) и  $v_0 = 0,3$  м/с 1, следует, что на расстояние, которое частица проходит от фильтровой колонны к стенкам скважины, практически не влияет размер гравийных частиц, используемых при закачке.

Проанализировав равенства (8.119) и (8.120), можно прийти к выводу, что расстояние  $r$ , которое частица преодолевает за определенный промежуток времени, зависит от начальной скорости частицы  $v_0$  на выходном конце отклонителя. Принимая во внимание, что скорость движения частиц в турбулентном потоке приблизительно равна скорости самого потока, можно предположить, что если частицы различной крупности определенным образом распределяются по сечению отклонителя, то они соответственно движутся в нем со скоростью сечения потока, в котором находятся, и характеризуются на выходном сечении различными скоростями движения  $v_0$ .

Рассмотрим распределение частиц по крупности в поперечном сечении отклонителя. Частица будет двигаться в некотором сечении потока, если действующие на нее силы уравниваются друг друга. В поперечном сечении потока (вдоль оси  $z$ ) на частицу (рис. 8.41) действуют сила тяжести  $F_t$  за вычетом силы Архимеда  $F_a$ , подъемная сила Жуковского  $F_{ж}$ , сила гидродинамического сопротивления  $F_{гд}$  и сила сопротивления  $F_c$ . Запишем дифференциальное уравнение движения частицы в отклонителе

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_t - F_a - F_{ж} - F_{гд} \pm F_c. \quad (8.121)$$

С учетом условия равновесия частицы в некотором сечении потока  $d^2 z / dt^2 = 0$ ;  $dz / dt = 0$  можно записать

$$F_T - F_A - F_{\text{Ж}} - F_{\text{гд}} = 0. \quad (8.122)$$

Сила тяжести за вычетом силы Архимеда пытается сместить гравийную частицу к лежащему боку наклонного желоба, а сила Жуковского и гидродинамического сопротивления — наоборот, в зону максимальных скоростей потока, т.е. к оси симметрии наклонного желоба.

Усилие, смещающее частицу к лежащему боку отклонителя, определится из уравнения

$$F_T - F_A = \frac{\pi d^3}{6} g (\rho_{\text{п}} - \rho). \quad (8.123)$$

Усилие, способствующее смещению частиц гравия к оси симметрии потока,

$$F_{\text{Ж}} + F_{\text{гд}} = 1,287 \psi \rho d^2 (u_1^2 - u_2^2)^{\frac{1}{7}} \sin \eta, \quad (8.124)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  — скорости обтекания частицы по противоположным сторонам относительно  $z$ .

Учитывая закон распределения скоростей в турбулентном потоке после разложения в ряд Тейлора  $(u_1^2 - u_2^2)^{\frac{1}{7}}$ , получаем выражение для определения скоростей обтекания частицы потоком по ее противоположным относительно оси симметрии потока сторонам

$$\begin{aligned} u_1 &= 1,45 \frac{Q}{D_{\text{от}}^2} \left( 1 - \frac{2(z - 0,5d)}{D_{\text{от}}} \right), \\ u_2 &= 1,45 \frac{Q}{D_{\text{от}}^2} \left( 1 - \frac{2(z + 0,5d)}{D_{\text{от}}} \right), \end{aligned} \quad (8.125)$$

где  $Q$  — расход смеси;  $D_{\text{от}}$  — диаметр отклонителя или расстояние между лежащим и висющим боками.

Подставляя значения (8.125) в (8.124), имеем

$$F_{\text{Ж}} + F_{\text{гд}} = \frac{3,09 \psi \rho d^2 Q^2 \left( 1 - \frac{5d}{7D_{\text{от}}} \right)}{D_{\text{от}}^5} z. \quad (8.126)$$

Приравнивая правые части уравнений (8.123) и (8.126) в соответствии с равенством (8.122), получаем выражение для определения координаты частицы в поперечном сечении потока в зависимости от ее крупности

$$z = \frac{0,168dD_{от}^5 g (\rho_{п} - \rho) \sin \eta}{\psi \rho Q^2 \left(1 - \frac{5d}{7D_{от}}\right)}. \quad (8.127)$$

Подставляя равенство (8.127) в уравнение (8.52), находим скорость движения частиц гравия в зависимости от их крупности на выходе из отклонителя

$$v_0 = 14,56 \frac{Q}{D_{от}^2} \left(1 - \frac{2z}{D_{от}}\right)^{\frac{1}{7}}. \quad (8.128)$$

Ранее в уравнении (8.119) было показано, что расстояние, которое частицы проходит в кольцевом пространстве скважины после прохождения отклонителя от поверхности фильтровой колонны в направлении к стенкам скважины, является функцией скорости, с которой частицы движутся на выходе из отклонителя. Скорость частиц на выходе, из отклонителя зависит от диаметра частиц гравия [см. формулу (8.128)]. Частицы более крупных фракций гравия движутся в непосредственной близости от лежащего бока отклонителя с меньшими скоростями, чем более мелкие частицы, движущиеся в ядре потока. В связи с этим, решая совместно уравнение (8.119) и (8.128), получаем уравнение, характеризующее зависимость между диаметром гравийных частиц и расстоянием, которое проходят эти частицы после прохождения отклонителя от фильтровой колонны к стенкам скважины

$$x = \frac{\pi d}{6\psi} \ln \left[ \frac{6\psi}{\pi d t \sin \eta} \frac{14,56Q}{D_{от}^2} \left(1 - \frac{0,336D_{от}^6 g (\rho_{п} - \rho) \sin \eta}{\psi d \rho Q^2 \left(1 - \frac{5d}{7D_{от}}\right)}\right)^{\frac{1}{7}} + 1 \right]. \quad (8.129)$$

При выводе уравнения (8.129) было сделано допущение, что величина  $x$  непосредственно не зависит от диаметра частиц  $d$  (рис. 8.40). Ошибка расчетов при таком допущении при диапазоне диаметров частиц от 0,1 мм до 10 мм составляет 2 %, что допустимо для практических расчетов. Влияние величины  $d$  на  $x$  определяется только через промежуточную величину  $v_0$ , значения которой определяются по формуле (8.128). Зависимость между диаметром гравийных частиц  $d$  и скоростью их движения показана на рис. 8.42. Графики построены для значений угла наклона к вертикали  $5^\circ$  (1, 2) и  $10^\circ$  (1', 2') при расходах жидкости 0,0076 (2, 2' и 0,01 м<sup>3</sup>/с (1, 1')).

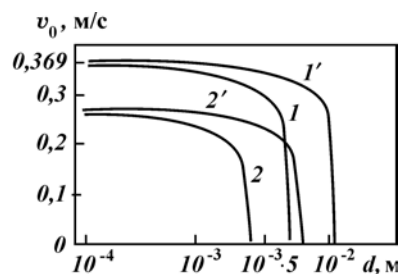
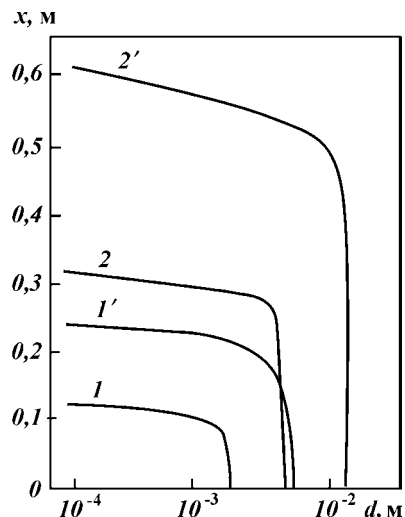


Рис. 8.42. Зависимость скорости движения частиц гравия на выходе из отклонителя от их крупности

Рис. 8.43. Зависимость расстояния  $x$ , проходимого частицей за 10 с, от ее диаметра при  $\eta = 5^\circ$  (1, 2),  $\eta = 10^\circ$  (1', 2'),  $Q = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$  (2, 2') и  $Q = 0,0076 \text{ м}^3/\text{с}$  (1, 1')

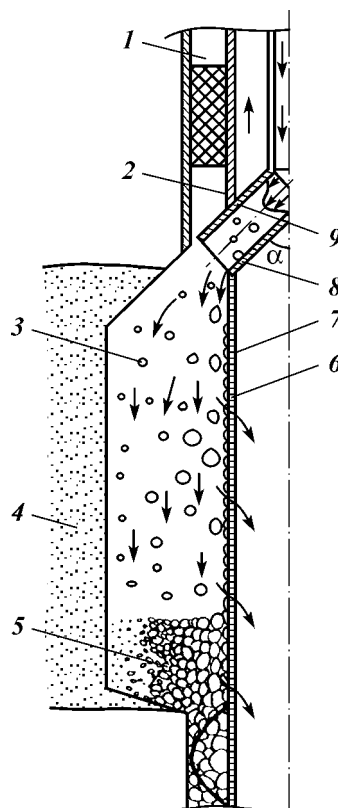


Расстояние, на которое частицы гравия после прохождения отклонителя удаляется от фильтровой колонны в направлении стенок скважины [см. уравнение (8.119)], зависит от скорости движения частиц (рис. 8.43). Частицы в процессе расслоения в поперечном сечении кольцевого пространства скважины будут осаждаться в непосредственной близости от фильтра-каркаса. Частицы гравия крупности от значений, соответствующих точке пересечения графиков с осью  $d$ , до значений, соответствующих точке перегиба этих графиков, равномерно укладываются в процессе убывании размеров от поверхности фильтра-каркаса в направлении стенок скважины. Частицы размера меньшего значений  $d$ , соответствующих точке перегиба (см. рис. 8.43), почти не классифицируются по крупности и укладываются в кольцевом пространстве скважины в области, близлежащей к стенкам скважины.

Автором отработана технология намыва гравийных фильтров с плавным уменьшением размера частиц от каркаса фильтра в направлении пласта при помощи отклонителей. На расчетном расстоянии от верхних отверстий каркаса фильтра устанавливают отклонитель. Рекомендуется использовать отклонители двух типов. Отклонитель первого типа устанавливается в кольцевом пространстве скважины между обсадной и фильтровой колонной (рис. 8.44) и предназначен для фильтров, устанавливаемых впотай. Отклонитель второго типа устанавливается внутри фильтровой колонны (рис. 8.45).

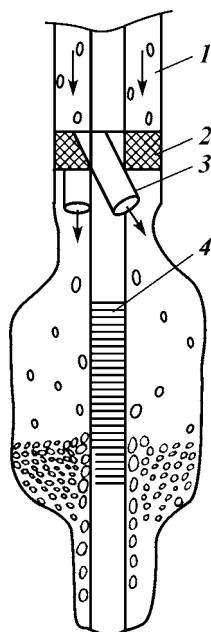
**Рис. 8.44. Схема установки отклонителя  
внутри фильтровой колонны:**

1 — кольцевое пространство скважины; 2 — надфильтровая труба; 3 — частица гравия; 4 — продуктивный пласт; 5 — гравийный фильтр; 6 — фильтр; 7 — отверстия фильтра; 8 — лежащий бок отклонителя; 9 — отклонитель



При прохождении через отклонитель гравийная смесь отклоняется от оси скважины. Установлено, что наиболее стабильное отклонение направления движения смеси наблюдается при углах установки отклонителя  $5\text{--}20^\circ$  к оси скважины. При больших углах отклонитель в скважине практически не обеспечивает отклонения смеси, а играет роль местного сопротивления. При угле отклонения меньше  $5^\circ$  ухудшается качество фракционирования частиц в отклонителе и зафильтровом пространстве скважины. Длина отклонителя выбирается исходя из обеспечения устойчивого, установившегося режима движения частиц на выходе из отклонителя.

При прохождении гравийной смеси через отклонитель наиболее крупные частицы движутся у лежащего бока, а мелкие взвешиваются в потоке, причем чем мельче частицы, тем ближе они движутся в установившемся режиме к продольной оси симмет-



**Рис. 8.45. Схема установки отклонителя в кольцевом пространстве скважины:**  
1 — кольцевое пространство; 2 — пакер; 3 — отклоняющие каналы; 4 — фильтр

рии отклонителя и тем с большей горизонтальной скоростью они перемещаются от фильтровой колонны к стенкам скважины после прохождения отклонителя и на тем большее расстояние удаляются от каркаса фильтра в процессе формирования гравийной обсыпки.

Взвешивание частиц гравия в отклонителе происходит под действием подъемной силы, обусловленной градиентом скорости в поперечном сечении потока отклонителя. В процессе закачки необходимо, чтобы наиболее крупные частицы гравия фракции  $D_n$  и большей откладывались в непосредственной близости от каркаса фильтра. Это условие будет выполняться, если частицы крупностью  $D_n$  и более движутся по лежащему боку отклонителя. Учитывая влияние действующих на частицу гравия сил, можно записать, что она будет двигаться в отклонителе в устойчивом режиме, если подъемная сила или сила Жуковского  $F_{\text{Ж}}$  компенсирует силу тяжести за вычетом силы Архимеда  $F_{\text{Т}} - F_{\text{А}}$ .

Частица крупностью  $D_n$  будет в установившемся режиме двигаться у лежащего бока отклонителя, если градиент скорости у лежащего бока отклонителя равен

$$\frac{u_1^2 - u_2^2}{D_n} = \frac{2}{3} \frac{\rho_{\text{п}} - \rho}{\rho} \frac{g \sin \eta}{\psi}. \quad (8.130)$$



Требуемый градиент скорости у лежащего бока отклонителя обеспечивается заданием определенного расхода закачки:  
для ламинарного потока

$$Q = \frac{\pi D_{от}^2}{\sqrt{24}} \frac{1}{\left(1 - \frac{(D_{от} - 2D_{п})^2}{D_{от}^2}\right)} \sqrt{\frac{\rho_{п} - \rho}{\rho} \frac{g D_{п} \sin \eta}{\psi}}, \quad (8.131)$$

для турбулентного режима

$$Q = \frac{7\pi}{96} \left( \frac{D_{от}^{15}}{2D_{от}^2} \right)^{\frac{1}{7}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\rho_{п} - \rho}{\rho} \frac{g D_{п} \sin \eta}{\psi}}. \quad (8.132)$$

Анализ уравнений для ламинарного и турбулентного режимов движения смеси показывает их хорошую сходимость для пристенной области потока.

При установлении в процессе закачки расхода смеси через отклонитель, рассчитанного по формулам, частицы крупностью  $D_{п}$  и более движутся у лежащего бока отклонителя с минимальными скоростями, а более мелкие взвешиваются в потоке и движутся с большими скоростями. Учитывая, что чем больше скорость движения частицы на выходе отклонителя, тем на большее расстояние она удаляется от фильтровой колонны в процессе формирования обсыпки, можно утверждать, что в процессе закачки по предложенной технологии формируется гравийный фильтр с размером частиц, постепенно уменьшающимся от каркаса фильтра и стенкам скважины.

Отклонитель устанавливается от верхних отверстий каркаса фильтра на расстоянии, при котором происходит стабилизация движения частиц в потоке после прохождения отклонителя. Стабилизация (установившийся режим) наступает в том случае, если с увеличением времени движения частицы в потоке, расстояние между ней и фильтровой колонной почти не увеличивается. Высоту установки отклонителя от верхних отверстий каркаса фильтра при заданных режимах закачки, конструкции скважины и отклонителя определяют решением дифференциального уравнения движения частицы после отклонителя в кольцевом пространстве скважины. Высота установки отклонителя от верхних отверстий каркаса фильтра составляет от 5 до 10 м.

С целью отработки технологии фракционирования гравия при намыве провели серию экспериментов. В верхней части внутренней стеклянной трубы, имитирующей фильтровую колонну на модели, устанавливали четыре отклонителя гравийной смеси, обеспечивающих изменение траектории потока. Опыт показал,

что при длине отклонителя более 0,4—0,5 м происходит устойчивое отклонение траектории движения потока под углом установки отклонителя к вертикали. Отклонители в опытах устанавливались под различным углом к вертикали, изменяющимся от 5 до 30°.

В кольцевом пространстве модели устанавливали специальное устройство из коаксиальных патрубков, служащее для отбора гравийных частиц, движущихся в различных сечениях вертикального потока. Устройство устанавливалось на различном расстоянии от наклонного желоба через каждые 0,5 м. Характер распределения частиц в поперечном сечении потока изучался при различных режимах движения гравийной смеси, соответствующих критерию подобия  $G$ , изменяющемуся от  $3,0 \cdot 10^3$  до  $4,0 \cdot 10^3$  ( $u = 0,8 \div 1,5$  м/с). Результаты экспериментов представлены в табл. 8.17.

Характеристики гидравлической классификации частиц в поперечном сечении потока (в зависимости от крупности) в большей степени зависят от критерия гидродинамического подобия (см. табл. 8.17). При  $G = 3,0 \cdot 10^3$  практически все частицы гравия в отклонителе перемещаются по лежащему боку, а в кольцевом пространстве модели движутся вблизи внутренней стеклянной трубы, имитирующей фильтр-каркас.

Лишь незначительный объем наиболее мелких частиц взвешивается в потоке, который проходит через отклонитель и движется (откадывается в процессе формирования гравийного фильтра) около стенки внешней стеклянной трубы, имитирующей стенки скважины.

С увеличением критерия подобия, а следовательно, и скорости потока в отклонителе, характер классификации улучшается. Практически все частицы наиболее крупных фракций откладываются вблизи поверхности фильтра-каркаса. В центральных сечениях потока, а также вблизи стенок скважины классификации частиц по крупности не отмечалось. Возрастание скорости потока в сравнении с первым опытом приводит к взвешиванию все более крупных фракций гравия и только частицы крупностью более 1—2 мм продолжают перемещаться по лежащему боку отклонителя. В этой связи частицы наиболее крупных фракций гравия движутся на выходе из желоба с горизонтальными скоростями, близкими к нулю, что приводит к их осаждению вблизи фильтра-каркаса.

Третья серия опытов проводилась при  $G = 5 \cdot 10^3$ . При скорости потока гравийной смеси, соответствующей таким значениям, происходило взвешивание всех гравийных частиц крупностью менее 2 мм. Поэтому в процессе классификации частицы разме-

Таблица 8.17

Результаты экспериментов по изучению горизонтальной классификации частиц в поперечном сечении вертикального потока в зависимости от их крупности

Но- мер опы- та	Критерий гидродина- мического подобия $G$	Угол наклона $\eta$ , градус	Интер- вал от- бора проб, м	Распределение частиц в поперечном се- чении потока		
				вблизи филътра- каркаса	в центре потока	вблизи стенок скважины
1	$3 \cdot 10^3$	5  10	0,5–1,5	Классификации не про- исходит Около 80 % всех час- тиц гравия в потоке То же	Классификации не про- исходит	Частицы раз- мером 0,5 мм  То же
2	$4 \cdot 10^3$	5	0,5–1,5  10  30	Все частицы крупностью 2 мм 70 % частиц размером 1 мм Все частицы крупностью 2 мм 50 % частиц крупностью 1 мм Большин- ство частиц 2 мм Классификации частиц 2 мм не прои- сходит	30 % частиц размером более 1 мм  Классификации частиц размером 1 мм не прои- сходит 50 % частиц 1 мм  Классификации частиц размером 1 мм не прои- сходит	
3	$5 \cdot 10^3$	5  10  30	0,5–1,0  0,5  1,0	Все частицы 2 мм 50 % частиц 1 мм  70 % частиц 2 мм Классификации частиц > 2 мм не про- исходит Классификации частиц не происходит	50 % частиц 1 мм  Классификации частиц размером 1 мм не прои- сходит	
4	$6 \cdot 10^3$	5  10 30	0,5–1,0	Слабое пре- обладание крупных фракций гравия То же Классификации частиц не происходит		Классифи- кации частиц не происходит  То же
5	$10^4$	5  10 30	0,5–1,0  0,5–1,0	Классификации частиц не происходит	То же  «	

ром более 2 мм, движущиеся по лежащему боку отклонителя, осаждались вблизи фильтра-каркаса, а более мелких фракций гравия практически не классифицировались по крупности.

Увеличение критерия гидродинамического подобия  $G$  до  $6 \cdot 10^3$  и  $10^4$  в опытах 4 и 5 привело только к ухудшению характеристик гидравлической классификации. При  $G = 6 \cdot 10^3$  наблюдалось очень слабое преобладание вблизи поверхности фильтра-каркаса крупных фракций гравия. Крупные гравийные частицы, осаждаемые у фильтра-каркаса, характеризовались неправильной формой. Это обстоятельство объясняется тем, что частицы такой формы тяжелее взвешиваются в потоках, чем частицы правильной формы. При  $G = 7 \cdot 10^3$  и  $G = 10^4$  классификации частиц гравия по крупности в поперечном сечении потока не наблюдалось.

Во всех опытах оценивалось влияние угла наклона отклонителя гравия к вертикали на характеристики классификации. Было отмечено, что наиболее четкое разделение частиц гравия по крупности происходит при угле наклона отклонителя  $\eta = 5^\circ$ . С увеличением угла наклона отклонитель гравия не четко изменяет направление потока, а скорее создает на его пути только временное препятствие, сопротивление. Этим, по мнению автора, объясняется ухудшение характеристик классификации частиц. Очевидно, что с ростом длины отклонителя гравия ухудшения классификации за счет увеличения угла наклона  $\eta$  к вертикали можно избежать, однако это положение не было проверено экспериментально в связи с ограниченной длиной модели.

Пробы частиц гравия отбирались на расстоянии 0,5; 0,1 и 0,15 м от отклонителя и при этом не было выявлено существенных отличий в характере гидравлической классификации. В связи с этим был сделан вывод о незначительном влиянии интервала отбора проб гравийных частиц из потока на точность оценки гидравлической классификации после прохождения отклонителя.

Оборудование скважин гравийными фильтрами с постепенным уменьшением размеров частиц песка (ФПУ) в интервале водоносного пласта со средним размером песчаных частиц 0,1 мм при помощи отклонителей осуществлялось следующим образом.

С учетом заданных режимов эксплуатации диаметр расширения скважины составил 350 мм, диаметр фильтра-каркаса 0,168 м с шириной щели 3 мм. Средний размер гравия  $\bar{D}$  выбирался из условия

$$\bar{D} = \frac{k\bar{d} + t}{2}; \quad \bar{D} = \frac{4 \cdot 0,1 + 30}{2} = 1,7 \text{ мм}, \quad (8.133)$$

где  $k$  – коэффициент межслойности;  $\bar{d}$  – средний размер песка;  $t$  – ширина щели фильтра.

Эксперименты показали, что задержание более мелких частиц обеспечивается при заданных режимах эксплуатации и окатанности гравия при четырех-пяти слоях гравия одного размера. На основании этого значения коэффициентов надежности  $a, b$  были приняты равными пяти.

Процент ситового отсева, после которого размер частиц гравия соответствует среднему размеру частиц водоносного пласта, умноженному на  $k$ ,

$$m = a \frac{D_0^2 - (D_0 - 2\bar{d}k)^2}{D_0^2 - D_\Phi^2} 100 \%;$$

$$m = \frac{5(0,35^2 - (0,35 - 0,0008)^2)100}{0,35^2 - 0,168^2} = 3 \%, \quad (8.134)$$

где  $D_0$  — диаметр скважины;  $D_\Phi$  — диаметр фильтра-каркаса.

Для экранирования песка водоносного пласта по всей поверхности необходимо иметь в обсыпке 3 % частиц размером  $k\bar{d}$ .

Процент ситового отсева, после которого размер частиц гравия соответствует размеру отверстий фильтра, определили по формуле

$$n = \left( 1 - b \frac{(D_\Phi + 2t)^2 - D_\Phi^2}{D_0^2 - D_\Phi^2} \right) 100 \%;$$

$$n = \left( 1 - 5 \frac{(0,168 + 0,006)^2 - 0,168^2}{0,35^2 - 0,168^2} \right) 100 \% = 90 \%. \quad (8.135)$$

Для экранирования фильтра-каркаса по всей поверхности и предупреждения проникновения гравия внутрь скважины необходимо иметь в обсыпке около 10 % частиц фракции, соответствующей ширине щели  $t$ .

На основании полученного

$$D_3 = k\bar{d}; \quad D_3 = 4 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ мм}; \quad D_{90} = t = 3 \text{ мм}; \quad k_n = D_{90} / D_3;$$

$$k_n = 3,0 / 0,4 = 7,5,$$

где  $k_n$  — коэффициент неоднородности смеси.

В скважину установили фильтровую колонну с каркасом фильтра. На высоте 10 м над верхними отверстиями фильтра установили отклонитель, состоящий из трех труб длиной 1,5 м, диаметром 0,08, наклоненных под углом  $10^\circ$  к оси фильтровой колонны.

Гравийную смесь закачивали в нисходящем потоке при рас-

ходе через каждую трубу отклонителя, определенном из формулы (8.132) для турбулентного режима

$$Q = \frac{7\pi}{96} \left( \frac{D_{от}^{1,5}}{2D_{п}} \right)^{\frac{1}{7}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\rho_{п} - \rho}{\rho} \frac{g D_{п} \sin \eta}{\psi}},$$

$$Q = \frac{7\pi}{96} \left( \frac{0,08^{1,5}}{0,006} \right)^{\frac{1}{7}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{2500 - 1000}{1000} \frac{9,8 \cdot 0,003 \cdot 0,156}{0,1}} = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Общий расход составлял 3 Q, т.е. 23,1 л/с.

Расход, определенный из формулы (8.131), для ламинарного режима составил

$$Q = \frac{\pi D_{от}^2}{\sqrt{24}} \frac{1}{\left( 1 - \frac{(D_{от} - 2D_{п})^2}{D_{от}^2} \right)} \sqrt{\frac{\rho_{п} - \rho}{\rho} \frac{g D_{п} \sin \eta}{\psi}},$$

$$Q = \frac{\pi \cdot 0,08^2}{\sqrt{24}} \frac{1}{\left( 1 - \frac{(0,08 - 0,006)^2}{0,08^2} \right)} \sqrt{\frac{2500 - 1000}{1000} \frac{9,8 \cdot 0,003 \cdot 0,156}{0,1}} =$$

$$= 7,83 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Общий расход смеси составлял 3 Q, т.е. 23,5 л/с.

Учитывая, что при расчетном расходе режим движения смеси в отклонителе будет турбулентным, общий расход смеси выбирался равным 23,1 л/с.

Смесь закачали при комбинированной циркуляции в нисходящем потоке при концентрациях гравия в воде около 5 % в течение 35 мин. В скважину было закачено 1,08 м<sup>3</sup> гравия. Качество сооружения фильтра проверили. Для чего из скважины поднимали фильтровую колонну со специальными контрольными устройствами, установленными у нижних, верхних отверстий фильтра-каркаса и в середине каркаса фильтра. Остатки гравийной обсыпки удалили промывкой. Анализ проб показал постепенное уменьшение размера частиц гравия в фильтре от каркаса фильтра в направлении стенок скважины. Данные анализа приведены ниже.

Интервал кольцевого пространства, м.....	0,168–0,220	0,220–0,290	0,290–0,350
Размер гравия в пробе (в мм):			
у нижних отверстий каркаса фильтра...	2,1	1,5	0,9
в середине каркаса фильтра.....	2,1	1,5	0,95
у верхних отверстий фильтра.....	2,1	1,4	1,0

#### 8.4.2. ТЕХНОЛОГИЯ НАМЫВА ГРАВИЙНОГО ФИЛЬТРА ПРИ УРАВНОВЕШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

При сооружении гравийного фильтра необходимо поддерживать репрессию на пласт, при которой обеспечивается устойчивость стенок скважины и исключается поступление в обсыпку инородных примесей. С другой стороны, при намыве гравия в жидкостях-носителях, представленных вязкими водогипановыми, полимерными и другими растворами, целесообразно поддерживать такую репрессию на пласт, при которой минимизируется поглощение. В случае отличия химического состава жидкости-носителя от пластовой воды, что характерно при использовании компонентов, повышающих вязкость и несущую способность раствора, при поглощении происходит кольматация прискважинной зоны водоносного пласта, резко снижающая эффективность строительства и эксплуатации скважины.

Рационально в процессе намыва гравия в интервал формирования обсыпки обеспечивать такую репрессию на пласт, при которой с одной стороны сохраняется устойчивость стенок скважины, с другой — минимизируется поглощение жидкости-носителя. Сооружение гравийного фильтра при таких режимах получило название технологии намыва при уравновешенном давлении.

Под уравновешенным давлением понимают такую репрессию на водоносный пласт, при которой обеспечивается устойчивость стенок скважины и минимизируется поглощение. Как правило, величина репрессии соответствует пластовому давлению. Рекомендуемая величина репрессии для водоносных пластов разных типов изменяется от 0,03 до 1,5 МПа. Обычно для каждой конкретной скважины необходимая репрессия может быть определена в процессе вскрытия водоносного пласта, расширения скважины в интервале формирования обсыпки или при промывке перед закачкой гравия.

При нисходящей фильтрации жидкости-носителя через намытый слой гравия в фильтре по мере увеличения его высоты растут фильтрационные сопротивления, потери напора при циркуляции, и соответственно — репрессия на водоносный пласт. Поэтому основная сложность осуществления технологии намыва гравийного фильтра при уравновешенном давлении заключается в поддержании постоянной репрессии на пласт.

Для различных компоновок поверхностного оборудования автором разработаны три принципиальные схемы поддержания постоянной репрессии на пласт в процессе сооружения гравийного фильтра в скважине.

Согласно первой схеме, при закачке гравийной смеси в скважину насосами рекомендуется по мере увеличения высоты гравийного фильтра уменьшать расход смеси, снижая тем самым потери напора при циркуляции на величину, компенсирующую увеличение потерь напора в гравийном фильтре (рис. 8.46).

Регулировка расхода в нагнетательной 22 магистрали осуществляется изменением подачи насосов блока 26, а также трехходового 24 крана, от которого часть жидкости через сброс 25 поступает в блок 35 отстойников. Давление в нагнетательной магистрали, равное потерям напора при циркуляции, контролируется манометром 20

$$p_n = \left( \sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B \right) Q_n^2, \quad (8.136)$$

где  $Q_n$  — подача жидкости-носителя при промывке;  $A$  — коэффициент линейных сопротивлений;  $B$  — коэффициент местных сопротивлений;  $n$  — число линейных участков циркуляционной системы поверхностная обвязка — скважина;  $m$  — число местных сопротивлений циркуляционной системы поверхностная обвязка — скважина.

После установления расчетной репрессии на пласт давление в нагнетательной магистрали  $p_n$  регистрируют манометром 20, а расход  $Q_n$  — расходомером 21 и начинают закачку гравия 28. Из бункера 27 с помощью транспортера 29 гравий 28 поступает в смеситель 30. Приготовленная в смесителе гравийная смесь расчетной концентрации блоком 26 насосов закачивается в интервал 23 формирования фильтра 11 через вспомогательную 2 колонну, распределительный узел 16 и выпускные отверстия 7 к фильтровой 8 колонне. Гравий осаждается на забое, жидкость-носитель фильтруется через слой гравийного фильтра 11, уплотняет его и через контрольный 12 фильтр, водоподъемную 10 колонну, распределительный узел 16, кольцевое пространство и сливную 23 магистраль поступает в блок 35 отстойников.

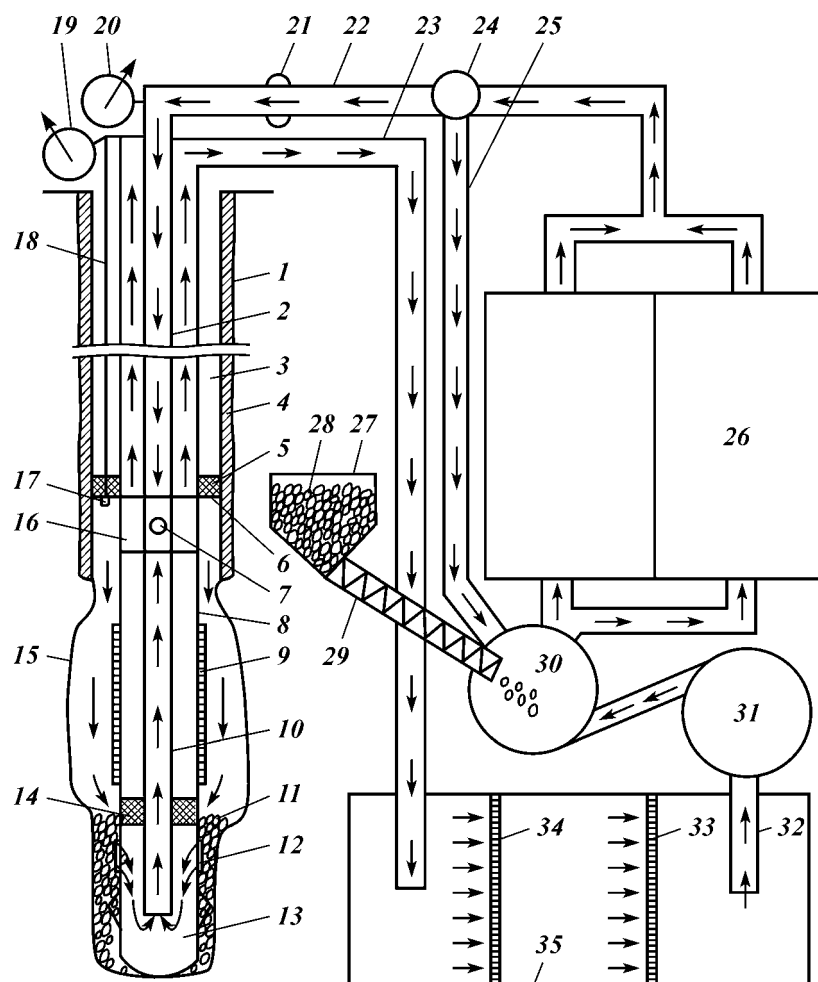
В процессе намыва гравийного фильтра 11 увеличиваются сопротивление циркуляционному потоку, потери напора и репрессия на пласт

$$p_n = \left( \sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B + \frac{k_{\tau} h_i}{w_{\text{кп}}^2} \right) Q_i^2; \quad (8.137)$$

$$p_n = \left( \sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B + \frac{k_{\tau} h_{i+1}}{w_{\text{кп}}^2} \right) Q_{i+1}^2, \quad (8.138)$$

где  $k_{\tau}$  — коэффициент турбулентной фильтрации;  $h_i$ ;  $h_{i+1}$  — вы-





**Рис. 8.46. Схема поддержания постоянной репрессии на пласт при закачке гравийной смеси насосами:**

1 — скважина; 2 — вспомогательная колонна; 3 — кольцевое пространство скважины; 4 — обсадная колонна; 5 — герметизирующий элемент; 6 — нижний торец герметизирующего элемента; 7 — выпускные отверстия; 8 — фильтровая колонна; 9 — каркас-фильтра; 10 — водоподъемная колонна; 11 — гравийный фильтр; 12 — контрольный фильтр; 13 — отстойник; 14 — сваб; 15 — каверна; 16 — распределительный узел; 17 — датчик давления; 18 — канал связи; 19, 20 — манометры; 21 — расходомер; 22 — нагнетательная магистраль; 23 — сливная магистраль; 24 — трехходовый кран; 25 — сброс; 26 — блок насосов; 27 — бункер; 28 — гравий; 29 — транспортер; 30 — смеситель; 31 — центробежный насос; 32 — всасывающий шланг; 33, 34 — фильтры; 35 — блок отстойников

сота гравийного фильтра соответственно в  $i$ -ый и  $i+1$ -ый моменты времени;  $w_{\text{кп}}$  — площадь поперечного сечения гравийного фильтра;  $Q_i$ ,  $Q_{i+1}$  — подача гравийной смеси соответственно в  $i$ -ый и  $i+1$ -ый моменты времени.

Для поддержания постоянной репрессии на пласт с увеличением высоты гравийного уменьшают расход гравийной смеси, обеспечивающий снижение потерь напора на величину дополнительных потерь напора в гравийном фильтре 11. Изменение расхода смеси, обеспечивающего постоянное давление в нагнетательной 22 магистрали,

$$\frac{Q_i}{Q_{i+1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B + \frac{k_{\tau} h_{i+1}}{w_{\text{кп}}^2}}{\sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B + \frac{k_{\tau} h_i}{w_{\text{кп}}^2}}}. \quad (8.139)$$

Сумма коэффициентов линейных и местных сопротивлений в циркуляционной системе  $\sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B$  может быть выражена согласно формуле (8.136) через расход смеси в процессе промывки  $Q_{\text{п}}$  и давления в нагнетательной 22 магистрали  $p_{\text{н}}$

$$\sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B = \frac{p_{\text{н}}}{Q_{\text{п}}^2}. \quad (8.140)$$

Высота гравийного фильтра, намываемого за время  $t$  между  $i+1$  и  $i$ -ым интервалом, может быть выражена через объем закачанного в скважину гравия в единицу времени между интервалами  $i$  и  $i+1$

$$h = \frac{w}{w_{\text{кп}}}, \quad (8.141)$$

где  $w$  — объем закачанного гравия с момента  $i$  по момент  $i+1$ .

Учитывая равенства (8.139) и (8.140) и (8.141), получаем выражение для определения величины абсолютного изменения расхода смеси в единицу времени с  $i$  по  $i+1$

$$Q_{i+1} = \sqrt{Q_i^2 - p_{\text{н}} Q_{\text{п}} w_{\text{кп}}^2 \left( \frac{1}{p_{\text{н}} w_{\text{кп}}^2 + k_{\tau} h_i Q_{\text{п}}} - \frac{1}{p_{\text{н}} w_{\text{кп}}^2 + k_{\tau} h_{i+1} Q_{\text{п}}} \right)}. \quad (8.142)$$

Уравнение (8.142) устанавливает связь между величиной расхода смеси в процессе сооружения фильтра и объемом закачанного в скважину гравия. В этом случае высота гравийного фильтра в формуле (8.142) выражается через объем закачанного

гравия  $w$  и площадь поперечного сечения гравийного фильтра  $w_{\text{кп}}$ .

Об окончании гравийной засыпки свидетельствует резкое повышение давления в нагнетательной магистрали, вызванное перекрытием выпускных отверстий фильтровой колонны гравием. За время закачки расход смеси уменьшается по сравнению с начальным согласно выражению

$$Q_k = \frac{Q_n}{\sqrt{1 + \frac{k_T h Q_n^2}{p_n w_{\text{кп}}^2}}}, \quad (8.143)$$

где  $Q_k$  — подача в момент окончания закачки;  $Q_n$  — подача при промывке;  $k_T$  — средний коэффициент турбулентной фильтрации обсыпки;  $h$  — высота гравийного фильтра.

При малых глубинах скважин и давлениях нагнетания менее 0,7 МПа; с целью устранения непосредственного контакта абразивных частиц с гидравлической частью насоса в нагнетательной магистрали в процессе закачки гравия может быть установлен эжекторный смеситель. При установке в нагнетательной магистрали между насосом и скважиной эжекторного смесителя методика поддержания постоянной репрессии на пласт несколько отличается от методики, предложенной для схемы закачки смеси насосами при уравновешенном давлении. Отличие заключается в том, что давление нагнетания в случае установки эжекторного смесителя после сопла определяется квадратом скорости истечения струи. Давление в нагнетательной магистрали уменьшается по мере сооружения фильтра путем уменьшения расхода жидкости-носителя, проходящего через сопло эжекторного смесителя в поверхностной обвязке (рис. 8.47).

В процессе сооружения гравийного 10 фильтра увеличивается сопротивление циркуляционному потоку в скважине, приводящее к увеличению потерь напора и соответственно к увеличению репрессии.

Для поддержания требуемой репрессии на пласт в процессе закачки в единицу времени уменьшают расход жидкости-носителя, проходящей через сопло 21 эжекторного смесителя 20 на величину

$$Q_{i+1} = \frac{Q_i}{\sqrt{1 + \frac{k_T h}{\frac{\rho}{2w_c^2} + \sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B}}}, \quad (8.144)$$

где  $Q_{i+1}$ ,  $Q_i$  — расход жидкости-носителя через эжекторный сме-

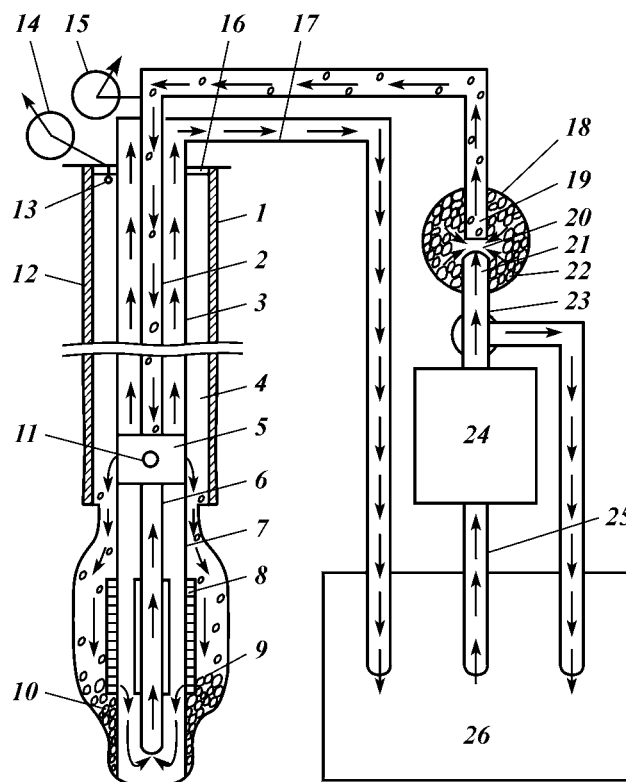


Рис. 8.47. Схема поддержания постоянной репрессии на пласт при закачке гравийной смеси через эжекторный смеситель:

1 — скважина; 2 — вспомогательная колонна; 3 — эксплуатационная колонна; 4 — кольцевое пространство скважины; 5 — распределительный узел; 6 — водо-подъемная колонна; 7 — фильтровая колонна; 8 — каркас фильтра; 9 — уровень намываемого фильтра; 10 — гравийный фильтр; 11 — закачные отверстия; 12 — кондуктор; 13 — датчик давления; 14 — манометр; 15 — регистратор давления; 16 — герметизирующий элемент; 17 — сливная магистраль; 18 — бункер; 19 — диффузор; 20 — эжекторный смеситель; 21 — сопло; 22 — гравий; 23 — нагнетательная магистраль; 24 — буровой насос; 25 — всасывающий патрубок насоса; 26 — отстойник

ситель соответственно в  $i+1$  и  $i$  моменты времени;  $\bar{k}_r$  — коэффициент турбулентной фильтрации гравия;  $h$  — высота гравийного фильтра, намываемого в единицу времени между  $i$  и  $i+1$  моментами.

По мере увеличения высоты гравийного фильтра расход жидкости-носителя постепенно уменьшают до величины

$$Q_k = \frac{Q_n}{\sqrt{1 + \frac{\bar{k}_r h_p}{\frac{\rho}{2w}^2 + \sum_{i=1}^{i=n} A + \sum_{i=1}^{i=m} B}}}, \quad (8.145)$$

где  $h_p$  — расчетная высота гравийного фильтра, через который фильтруется нисходящий поток жидкости-носителя.

При больших объемах работ снижение подачи гравийной смеси не может быть рекомендовано вследствие повышенных затрат времени на сооружение гравийного фильтра в скважине. В этом случае целесообразно использовать третью схему намыва фильтра при уравновешенном давлении, согласно которой в нагнетательной магистрали на поверхности между насосом, которым закачивается смесь, и скважиной устанавливают блок сопротивления (рис. 8.48).

Как правило, для поддержания устойчивости стенок скважины достаточна репрессия на пласт 0,03–0,05 МПа. В процессе промывки перепад давления на блоке 23 сопротивления устанавливается таким образом, чтобы величина репрессии на пласт, регистрируемая манометром 20, составила 0,03–0,05 МПа. Величина репрессии на пласт равна разнице показаний манометра 20 до промывки и в текущий момент времени.

Увеличение сопротивления в поверхностной обвязке и соответственно потерь напора на блоке 23 сопротивления приводит к увеличению давления в нагнетательной магистрали и репрессии на пласт. Уменьшение сопротивления в поверхностной обвязке и потерь напора на блоке 23 приводит к уменьшению давления в нагнетательной магистрали и соответственно репрессии на пласт. С ростом расхода промывки величина репрессии на пласт увеличивается, а с уменьшением расхода — снижается. Изменение сопротивления и потерь напора в поверхностной обвязке может обеспечиваться с помощью блока сопротивления, представленного, например, последовательно соединенными вентилями 22.

После установки репрессии на пласт 0,03–0,05 МПа, которая фиксируется показаниями манометра 20, измеряющего избыточное по отношению к давлению до промывки давление на пласт, начинают закачку гравия. Гравиепитатель 26 подает гравий в смеситель, где приготавливается гравийная смесь заданной концентрации. Блоком 25 насосов гравийная смесь из смесителя через блок 23 сопротивления подается во вспомогательную колонну и распределительный узел, из которого поступает в интервал формирования фильтра 11, где гравий откладывается, а жидкость-носитель фильтруется через слой уже отложившегося гравия и контрольный фильтр и по водоподъемной колонне через

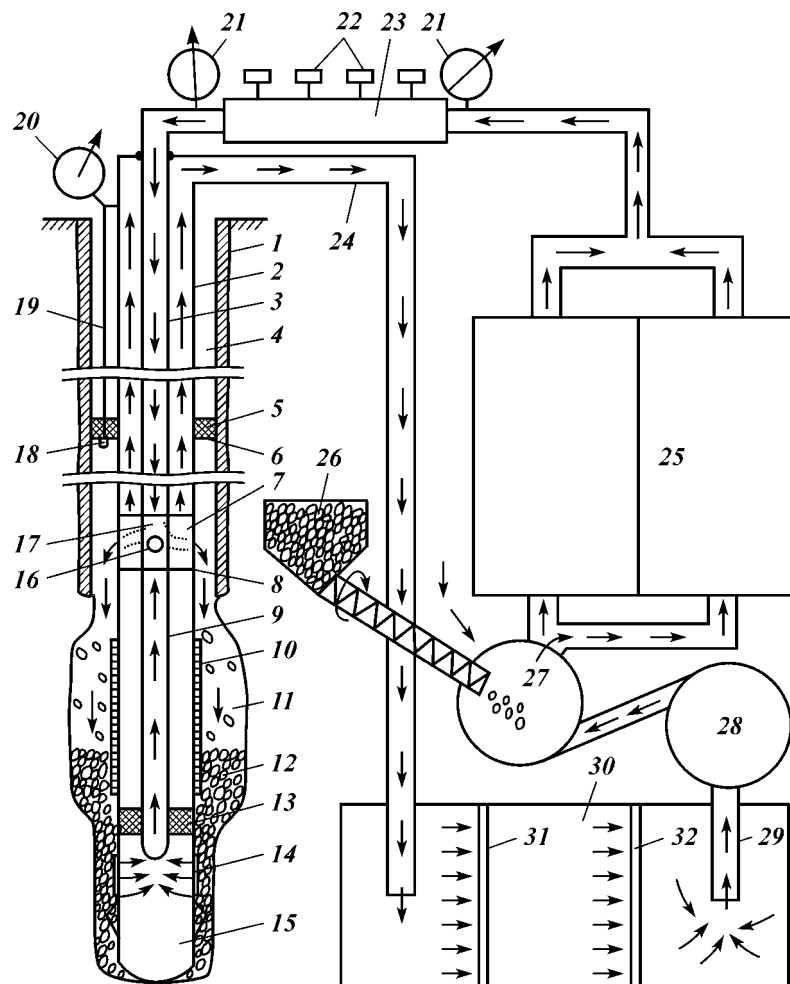


Рис. 8.48. Схема поддержания постоянной репрессии на пласт при закачке гравийной смеси через блок сопротивления:

1 — скважина; 2 — эксплуатационная колонна; 3 — вспомогательная колонна; 4 — кольцевое пространство скважины; 5 — герметизирующий элемент; 6 — нижний торец герметизирующего элемента; 7 — распределительный узел; 8 — фильтровая колонна; 9 — водоподъемная колонна; 10 — каркас фильтра; 11 — интервал формирования гравийного фильтра; 12 — гравийный фильтр; 13 — сваб; 14 — контрольный фильтр; 15 — отстойник; 16 — выпускные отверстия; 17 — выпускные каналы распределительного узла; 18 — датчик давления; 19 — канал связи; 20, 21 — манометры; 22 — клапан; 23 — блок сопротивления; 24 — сливная магистраль; 25 — блок насосов; 26 — гравиепитатель; 27 — смеситель; 28 — центробежный насос; 29 — всасывающая магистраль; 30 — блок отстойников; 31, 32 — фильтры

распределительный узел 7 и кольцевое пространство скважины между вспомогательной 3 и эксплуатационной 2 колоннами поднимается на поверхность, откуда через сливную 24 магистраль поступает в блок 30 отстойников.

В процессе закачки высота гравийного фильтра 12 увеличивается, возрастают сопротивления фильтрации жидкости через слой уже отложившегося гравия, потери напора при циркуляции и величина репрессии на пласт. При достижении репрессии на пласт верхнего допустимого предела 0,05 МПа уменьшают потери напора при циркуляции за счет уменьшения сопротивления потоку в блоке 23 сопротивления при постепенном открытии вентилей 22. Уменьшение перепада давления на блоке 23 сопротивления осуществляют до тех пор, пока величина репрессии на пласт не достигнет нижнего допустимого предела 0,03 МПа, фиксируемого манометром 20.

В процессе закачки за счет увеличения высоты гравийного фильтра 12 увеличиваются потери напора в нем и соответственно репрессия на пласт. Для стабилизации перепада давления на пласт уменьшают перепад давления на блоке 25 сопротивления до нижнего допустимого предела и т.д. Таким образом, увеличение потерь напора при циркуляции за счет образования гравийного фильтра 12 в процессе закачки компенсируется уменьшением потерь напора в поверхностной обвязке на блоке 23 сопротивления, а величина репрессии на пласт поддерживается постоянной в допустимом интервале 0,03–0,05 МПа.

#### **8.4.3. ТЕХНОЛОГИЯ НАМЫВА ГРАВИЙНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ЖИДКОСТИ-НОСИТЕЛЯ**

В процессе сооружения гравийного фильтра может наблюдаться частичное или полное поглощение жидкости-носителя пластом. В отечественной практике утвердилось мнение, что поглощение при намыве гравия – явление негативное, приводящее к кольматации пласта и как следствие — к резкому снижению эффективности эксплуатации скважины. Некоторыми ведущими зарубежными фирмами, специализирующимися на технологии заканчивания скважин, рекомендуется намывать гравийный фильтр при частичном или полном поглощении жидкости-носителя, причем с каждым годом объем этих работ увеличивается.

Намыв гравийного фильтра при сбалансированном давлении во многих случаях, особенно при значительной толщине гравийного слоя, высоких расходах смеси и кавернозности ствола скважины, не обеспечивает равномерной по плотности укладки час-

тиц в обсыпке. Дело в том, что жидкость-носитель фильтруется преимущественно вблизи каркаса фильтра, в связи с чем там образуется наиболее компактный и качественный слой гравия. В периферийной области фильтра, которая непосредственно контактирует с песком пласта, возможна разуплотненная укладка частиц, а иногда и образование пустот. При оборудовании нефтяных и газовых скважин в интервале продуктивного пласта перфорированной колонной считается, что технологии намыва гравия в перфорационные каналы при полном поглощении жидкости-носителя — единственно приемлемая.

В практике сооружения гидрогеологических скважин конструкции, предусматривающие спуск в интервал водоносного пласта обсадной колонны, ее цементацию и последующую перфорацию, не используются. Однако при расширении скважин на воду механическими эксцентриковыми, а особенно гидромониторными расширителями, диаметр ствола в интервале формирования фильтра может быть крайне неравномерным и возможно образование каналов, по форме напоминающих перфорационные. Качественное, компактное заполнение таких интервалов гравием при использовании традиционных методов намыва фильтра не обеспечивается. Интервалы увеличения диаметра скважины либо частично, либо совсем не заполняются гравием. Учитывая, что обычно эти интервалы наиболее проницаемые и обильные, невозможность их заполнения гравием, несмотря на предупреждение пескования, приводит к обрушению кровли канала, снижению удельных дебитов и долговечности эксплуатации.

Технология намыва гравия в скважину при поглощении жидкости-носителя отработывалась преимущественно в двух направлениях:

- улучшение качества периферийной части гравийного фильтра, непосредственно контактирующей с песком водоносного пласта;
- увеличение проницаемости прифильтровой зоны скважины в процессе закачки.

При поглощении жидкости-носителя водоносным пластом гравийные частицы откладываются не только на забое скважины, но и на ее стенках. Частицы увлекаются фильтрационным потоком и прижимаются сначала к стенкам скважины, а затем уже к намытому гравийному слою. Таким образом, в процессе поглощения жидкости-носителя обеспечивается экранирование гравием песка водоносного пласта по всей поверхности скважины в интервале формирования фильтра независимо от ее формы. Под влиянием давления фильтрационного потока частицы укладываются компактно и пустот не образуется.

Применение технологии намыва гравийного фильтра при по-



поглощении жидкости-носителя позволяет задержать песок водоносного пласта по внешнему контуру гравийной обсыпки, так как пористость фильтра на границе с песком соответствует расчетным значениям. Исключение проникновения песка в гравийный фильтр в начальный момент эксплуатации позволяет обеспечить более высокую проницаемость гравийного слоя, а следовательно, и более высокий дебит скважины и достоверное определение параметров пласта. Достоинство технологии — формирование наиболее качественного фильтра напротив самых обильных интервалов пласта. Как правило, в таких интервалах диаметр скважины вследствие естественного кавернообразования и слабых связей частиц песка между собой увеличивается, что осложняет его качественное заполнение по традиционной технологии. В случае поглощения, фильтрационный поток через наиболее обильные интервалы преобладает, что обуславливает более высокое фильтрационное давление на намываемый слой гравия, а следовательно, и более компактную и качественную укладку частиц.

Необходимым условием применения технологии намыва гравийного фильтра при поглощении жидкости-носителя считается использование при оборудовании скважин на воду в качестве жидкости-носителя воды химического состава, соответствующего составу подземных вод. При нарушении этого условия может возникать необратимая коагуляция водоносного пласта.

Улучшение фильтрационных характеристик околоскважинной зоны водоносного пласта может быть достигнуто в процессе намыва фильтра при поглощении жидкости-носителя за счет удаления на периферийные участки наиболее мелких частиц и формирования естественного фильтра. Фильтрационный поток может увлекать частицы гидравлической крупности меньшей скорости фильтрации на данном участке. Итак, наиболее крупные частицы песка пласта остаются, а более мелкие уносятся от скважины и откладываются на удалении, где скорость фильтрации уменьшается до значений гидравлической крупности мигрирующей частицы. Наиболее эффективно формирование естественного фильтра в самых обильных интервалах пласта, где наблюдаются высокие скорости фильтрации. При выносе мелких частиц песка из околоскважинной зоны пористость пласта увеличивается, так как более мелкие частицы замещаются более крупными и песок становится более однородным, что также способствует повышению коэффициента фильтрации.

В процессе формирования естественного фильтра необходимо предотвратить поступление мелких частиц, унесенных из околоскважинной зоны в процессе намыва фильтра, обратно в про-

цессе откачки. Для этого рекомендуется осуществлять закачку смеси с расходом поглощения большим, чем проектный дебит скважины. В случае сложности обеспечения высоких расходов поглощения при ограниченной мощности насосного оборудования рекомендуется эксплуатировать скважину при ограниченном понижении.

Особенность данного способа оборудования скважины — резкое снижение дебитов скважины при эксплуатации на начальном этапе с расходом близким или большим расхода поглощения при закачке гравийной смеси. В этом случае мелкие фракции опять возвращаются в прифильтровую зону, увеличивается сопротивление фильтрационному потоку и дальнейшая эксплуатация становится менее выгодной.

Наиболее эффективно идет процесс формирования зоны повышенной проницаемости вблизи скважины при наличии разгрузки. Обычно в гидрогеологических исследованиях функцию разгрузки при оборудовании откачной скважины гравийным фильтром могут выполнять близлежащие наблюдательные скважины (рис. 8.49).

Водоносный пласт. Откачные скважины бурили до кровли водоносного пласта, который залегал на 170–180 м, и закрепляли

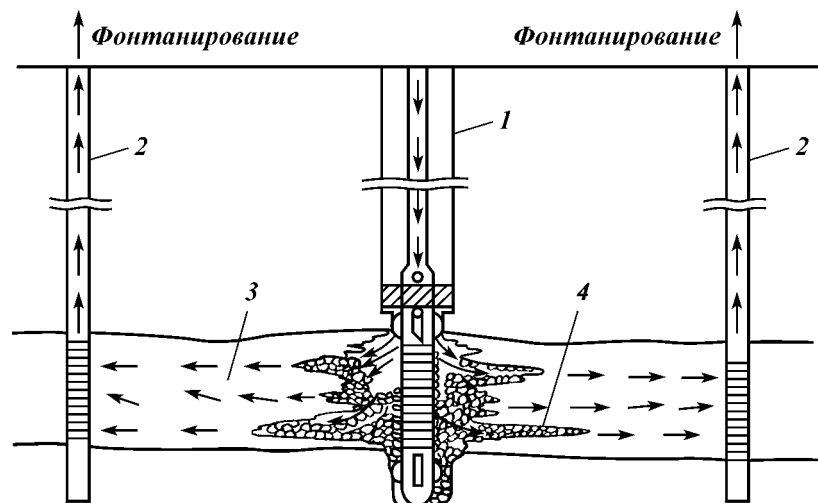


Рис. 8.49. Принципиальная схема намыва гравийного фильтра при поглощении жидкости-носителя и наличии разгрузки:

1 — нагнетательная скважина; 2 — разгрузочная скважина; 3 — пласт; 4 — трещины разрыва

интервал до устья обсадной колонной диаметром от 168 до 273 мм. Водоносный пласт вскрывали с промывкой чистой водой. После проведения геофизических исследований установленный интервал установки фильтра увеличивали расширителями комбинированного действия гидромониторной струи и эксцентричной породоразрушающей лопасти. Необходимость применения расширителей такого типа была обусловлена ярко выраженной неоднородностью водоносного пласта по фильтрационным свойствам. В водообильных интервалах пласта, где связи между частицами песка наименее прочные, диаметр скважины после расширения резко увеличивается по отношению к менее водообильным интервалам. Таким образом, в процессе расширения создается равновесная гидродинамическая и суффозионная обстановка по поверхности скважины в интервале водоносного пласта.

В скважину устанавливают фильтр впотай с устройством для намыва гравия УГФ-П с предварительно загерметизированными выпускными отверстиями. Кольцевое пространство между фильтровой и обсадной колонной герметизируется пакером. После установки фильтра и приведения пакера в рабочее состояние в скважину закачивают гравийную смесь. Для закачки гравийной смеси при больших давлениях рекомендуется использовать цементируемые агрегаты. Гравий компактно укладывался в фильтре, а жидкость-носитель поглощалась водоносным пластом. Разгрузка потока осуществлялась через наблюдательные скважины, расположенные в 10–15 м от откачной. Наблюдательные скважины при первоначальном статическом уровне 100 м в процессе закачки гравийной смеси в откачную скважину фонтанировали.

Из прифильтровой зоны водоносного пласта откачной скважины мелкие фракции мигрировали к периферии, т.е. к области разгрузки, образуя высокопроницаемые фильтрационные каналы, которые вблизи скважины заполнялись гравием. Итак, при закачке смеси при больших давлениях нагнетания и полном поглощении жидкости-носителя получили эффект, аналогичный гидравлическому разрыву пласта. Однако учитывая, что в песках гидравлический разрыв не наблюдается, этот эффект по своему смыслу следует называть фильтрационным размывом пласта.

После заполнения гравием расчетной полости инструмент в откачной скважине приподняли на 5–10 м. В дальнейшем его использовали для подачи воздуха от компрессора в скважину и производства лифтной откачки. После оборудования скважины гравийным фильтром при полном поглощении жидкости-носителя малая доля инородных примесей все же поступает в водо-

носный пласт за счет обогащения смеси в процессе транспортировки в циркуляционной системе или вследствие низкого качества очистки жидкости-носителя. С целью снижения негативного явления, связанного с осаждением инородных, преимущественно глинистых примесей в порах водоносного пласта, целесообразно после окончания работ по намыву гравийного фильтра сразу провести откачку.

Использование специально разработанного инструмента для намыва гравия позволяет исключить дополнительные затраты времени на подъем инструмента и монтаж эрлифта и провести откачку сразу после завершения сооружения фильтра. Последняя модификация инструмента для намыва гравия предусматривает его использование при подъеме в качестве водоструйного насоса. В этом случае исключается необходимость использования компрессора при проведении откачки, которая осуществляется при поверхностной обвязке, используемой для намыва гравия.

Оборудование гравийных фильтров по предложенной технологии намыва при полном поглощении жидкости-носителя и наличии разгрузки фильтрационного потока позволило предотвратить пескование в скважинах, оборудование которых традиционными методами не позволило достичь желаемого результата. Дебиты скважин соответствовали дебитам бесфильтровых скважин, которые непрерывно песковали.

#### **8.4.4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СООРУЖАЕМОГО ГРАВИЙНОГО ФИЛЬТРА В СКВАЖИНЕ**

Качество гравийного фильтра может определяться следующими методами:

- непосредственным расчетом путем сопоставления объема закачанного в скважину гравия и объема полости, подлежащей заполнению;

- гидродинамическим методом, основанным на определении фильтрационных характеристик намываемого слоя гравийного фильтра;

- определением сопротивления обсыпки в процессе откачки на основе определения скин-эффекта;

- геофизическими.

Под качественным гравийным фильтром следует понимать фильтр заданной толщины с равномерной и компактной укладкой частиц вокруг каркаса и сопротивлением, характерным для используемого гранулометрического состава гравия в лабораторных условиях. В процессе транспортировки гравия в интервал формирования фильтра его качество, как правило, ухудшается

вследствие попадания в обсыпку инородных примесей, образования в ней открытых каналов и пустот, неравномерной укладки гравия вокруг каркаса, расслоения и других осложнений. Следовательно, качество сооружаемого в скважине фильтра обычно ниже оптимальных значений.

Наиболее простой и наименее точный метод контроля качества гравийного фильтра в скважине — метод непосредственного расчета, основанный на сопоставлении объема полости, подлежащей заполнению гравием, и объема засыпанного в скважину гравия. Объем полости определяется по данным кавернометрии. Требуемый объем гравийного фильтра определяют вычитанием из общего объема ствола объема скважины фильтровой колонны от забоя до верхнего интервала формирования обсыпки. Если в скважину закачан расчетный объем гравия или больший, то качество гравийного фильтра считается удовлетворительным. Если в скважину засыпан объем на 10—15 % меньше расчетных значений, то качество гравийного фильтра обычно считают неудовлетворительным из-за пробкообразования, рыхлого сложения частиц в фильтре, наличия пустот и открытых каналов. При этом рекомендуется либо уплотнить гравийную обсыпку принудительно (например вибрационным воздействием и досыпать недостающий объем гравия), либо вымыть из скважины намытый фильтр и провести операции по его сооружению повторно.

Метод непосредственного расчета объемов — очень приближенный и не может в достаточной для практики степени характеризовать пригодность фильтра к эксплуатации, эффективность его работы. Приближенность оценки связана прежде всего с тем, что трудно точно определить объем ствола скважины, особенно при его диаметре более 0,5 м. Это характерно для слабосцементированных водоносных песков. Возможен вариант получения ложной информации, свидетельствующей о засыпке достаточного объема гравия при обрушении стенок скважины в период работы. В этой связи метод непосредственного расчета объемов скважины и засыпанного гравия следует применять только для ориентировочной оценки как дублирующий.

Наиболее полную оценку пригодности фильтра и эксплуатации можно получить гидродинамическим методом, который основан на определении фильтрационных характеристик намываемого в скважине слоя гравийного фильтра. Метод основан на анализе характера увеличения давления в нагнетательной магистрали в процессе закачки гравия. При намыве гравийного фильтра методом комбинированной или обратной циркуляции жидкость-носитель фильтруется через намываемый фильтр. С увеличением вы-

соты фильтра растет гидравлическое сопротивление циркуляции, а следовательно, и давление нагнетания.

По характеру увеличения давления определяют фильтрационные свойства намываемого слоя гравийного фильтра. Путем сопоставления полученных в процессе закачки фильтрационных свойств фильтра и расчетных, оптимальных значений на основании их сходимости определяют качество выполненных работ и фильтра в целом. В оптимальном случае, когда в скважине намывается гравийный фильтр высокого качества с фильтрационными свойствами, соответствующими расчетным значениям, давление нагнетания на насосе должно увеличиваться прямо пропорционально его высоте, а в случае калиброванного ствола скважины — объему закачанного гравия.

Типовые графики увеличения давления нагнетания в процессе намыва фильтра и расчетная прямая представлены на рис. 8.50. С увеличением угла наклона прямой ( $\alpha_1$ ) к оси абсцисс увеличиваются потери напора в намываемом слое гравийного фильтра. И наоборот, меньший угол  $\alpha_3$  характеризует меньшие потери напора в намываемом слое гравийного фильтра, меньшее фильтрационное сопротивление циркуляции, а следовательно, более проницаемую среду. Необходимо отметить, что как увеличение, так и уменьшение сопротивления гравийного фильтра по сравнению с расчетными значениями негативно отражается на качестве работ. Увеличение сопротивления гравийного фильтра обусловлено обогащением гравия инородными примесями в процессе транспортировки, а также при обрушении стенок скважины в процессе работ, вывалах породы.

Завышенное сопротивление гравийного фильтра приводит к снижению удельных дебитов скважины, достоверности определяемых параметров пласта, интенсификации кольматационных

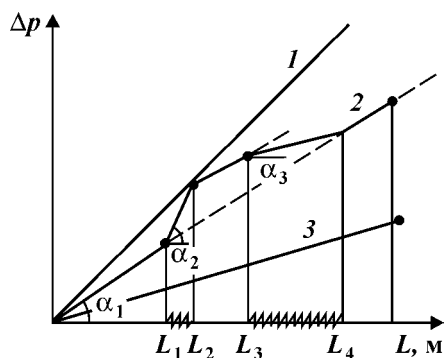


Рис. 8.50. Зависимость давления нагнетания в процессе намыва фильтра от его высоты  $L$

процессов, повышению неравномерности притока воды в фильтр. Уменьшение сопротивления намываемого слоя гравия по сравнению с расчетными значениями обусловлено, как правило, рыхлым сложением частиц в фильтре, образованием открытых каналов и пустот, которые свидетельствуют о неудовлетворительном качестве работ из-за невозможности предотвращения пескования скважины таким фильтром.

В процессе намыва гравия возможно либо полное, либо частичное отклонение фильтрационных характеристик по высоте фильтра от расчетных значений. График 1 свидетельствует о намыве переуплотненного по всей высоте гравийного фильтра, а график 3 — о рыхлом сложении частиц по всей высоте фильтра, относительно равномерным распределением пустот. Чаще в практике формируются фильтры с переуплотненными и рыхлыми прослойками. На графике 2 переуплотненный участок сформировался в интервале глубин  $L_1 - L_2$  при  $\alpha_2$ , а рыхлый — в интервале  $L_3 - L_4$  при  $\alpha_3$ .

При оценке качества сооружаемого в скважине гравийного фильтра один из наиболее важных этапов работ — достоверное определение фильтрационных параметров гравия, используемого для обсыпки. Сложность определения заключается в том, что сопротивление гравийного слоя, его фильтрационные характеристики являются функцией режимов фильтрации. Коэффициент фильтрации гравия данного гранулометрического состава, определенного при ламинарном режиме фильтрации, неприемлем для оценки качества гравийного фильтра, через который жидкость-носитель движется в нисходящем турбулентном потоке, и наоборот. В связи с этим целесообразно определять коэффициент фильтрации или сопротивление гравия при режимах, которые рекомендуется поддерживать на практике.

Определить достоверные фильтрационные параметры гравия, рекомендованного к засыпке, можно в следующем порядке. К отрезку обсадной трубы с площадью поперечного сечения, соответствующего площади поперечного сечения гравийного фильтра, приваривают два кольца. В отверстие одного из колец монтируют входной патрубок, снабженный манометром, который соединяют с насосом, используемым для закачки гравийной смеси в скважину. В отверстие кольца противоположного торца трубы устанавливают задвижку из нескольких слоев сетки квадратного или галунного плетения. Между трубой и задвижкой с сеткой устанавливают второй манометр. Через открытую задвижку в трубу засыпают гравий, который периодически уплотняют ударным или вибрационным воздействием, передаваемым на корпус

трубы. В трубу засыпают максимальный объем гравия, после чего задвижку сеткой закрывают.

При включении насоса жидкость-носитель фильтруется через гравий в трубе. Потери напора в слое гравия высотой, соответствующей длине трубы, фиксируются по разнице показаний манометра на входном и выходном патрубках. В процессе эксперимента скорость фильтрации в гравии должна соответствовать реальным скоростям фильтрации через намываемый фильтр в скважине. Для этого подачу насоса устанавливают соответственно рекомендуемой подаче смеси при закачке.

После фиксации перепада давления на трубе задвижку с сеткой открывают и гравий вымывают. Минимальные значения перепада давления на трубе после вымыва гравия также фиксируются. Вычитая из максимального значения перепада давления на трубе, полностью заполненной гравием, значение минимального перепада давления на пустой трубе, получают реальные потери напора в гравийном слое высотой, соответствующей длине трубы при оптимальной укладке частиц гравия без инородных примесей и пустот. Расчетный тангенс угла наклона равен отношению потерь напора в гравии к высоте гравийного слоя при заданной скорости фильтрации.

Расчетный коэффициент фильтрации намываемого гравийного слоя при ламинарном режиме равен отношению скорости потока к удельным потерям напора в трубе в расчете на 1 м ее длины

$$k = v_{\phi} / \Delta p, \quad (8.146)$$

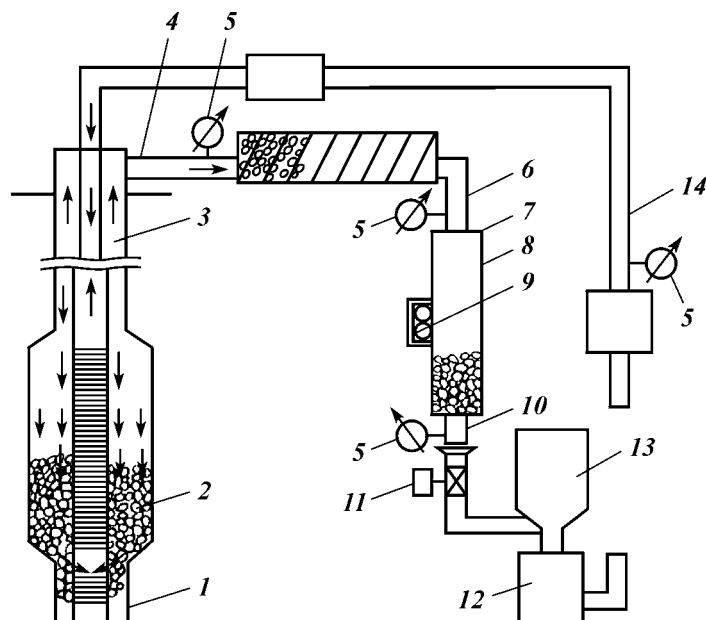
где  $v_{\phi}$  — скорость фильтрации;  $\Delta p$  — удельные потери напора в гравийном фильтре единичной длины.

С учетом необходимости поддержания для предупреждения пробкообразования турбулентного режима движения смеси на всех участках транспортировки целесообразно определять расчетные значения турбулентной фильтрации гравия используемого фракционного состава

$$k_{\tau} = v_{\phi} / \sqrt{\Delta p}. \quad (8.147)$$

Автором и сотрудниками Русбурмаш для различных условий проведения работ разработана технология контроля качества гравийного фильтра, базирующаяся на трех принципиально различных схемах. Наиболее простую схему с герметичным контейнером с гравием, установленным в сливную магистраль циркуляционной системы скважины (рис. 8.51), рекомендуется приме-





**Рис. 8.51. Обвязка с герметичным бункером в сливной магистрали:**  
 1 — контрольный фильтр; 2 — гравийный фильтр; 3 — скважина; 4 — сливная магистраль; 5 — манометры; 6 — входной патрубок герметичного бункера; 7 — загрузочный люк; 8 — герметичный бункер; 9 — вибратор; 10 — выходной патрубок герметичного бункера; 11 — задвижка; 12 — насос; 13 — емкость; 14 — нагнетательная магистраль

нять при отсутствии или незначительном поглощении жидкости-носителя в процессе закачки водоносным пластом.

Насосом 12 гравийная смесь забирается из емкости 13, где она готовится при непрерывной замкнутой циркуляции и через нагнетательную 14 магистраль закачивается в скважину 3. В интервале формирования гравийного 2 фильтра смесь движется в нисходящем токе. Гравийные частицы откладываются на верхней поверхности фильтра, образуя новый фильтрационный слой, а освобожденная жидкость-носитель фильтруется через уже намывтый гравий и контрольный 1 фильтр, после прохождения которого она поднимается в восходящем потоке к устью скважины.

На устье жидкость-носитель попадает в сливную 4 магистраль, в которой установлен герметичный бункер 8 с засыпанным в него гравием. На входном 6 и выходном патрубках герметичного бункера установлены манометры 5, которые фиксируют перепад давления на бункере 8. Перед началом закачки в герметич-

ный бункер 8 с поперечным сечением, соответствующим поперечному сечению намываемого в скважине 3 фильтра 2, засыпают гравий рекомендованного гранулометрического состава. В процессе заполнения бункера 8 через загрузочный люк 7 гравий уплотняют путем вибрационного воздействия, передаваемого от вибратора 9, установленного на корпусе бункера 8. Итак, в бункере 8 создается оптимальная укладка гравийных частиц с фильтрационными параметрами, соответствующими расчетным значениям.

Жидкость-носитель фильтруется через гравий в бункере 8, вымывает часть частиц, которые потоком выносятся и поступают в емкость 13 для приготовления гравийной смеси. Объем вымываемого из бункера 8 гравия регулируется задвижкой 11.

При формировании в скважине 3 высококачественного гравийного 2 фильтра давление в нагнетательной 14 магистрали, фиксируемое манометром 5, остается постоянным. Это обусловлено тем, что увеличение сопротивления циркуляции в скважине 3 за счет увеличения высоты гравийного 2 фильтра компенсируется уменьшением сопротивления в герметичном бункере 8. Компенсация увеличения потерь напора в скважине 3 уменьшением потерь напора в поверхностной обвязке возможна только в том случае, если в скважине 5 формируется фильтр 2 с оптимальным сложением частиц, т.е. с фильтрационными параметрами, аналогичными фильтрационным параметрам гравийного слоя в бункере 8.

Изменение давления нагнетания свидетельствует о формировании в скважине гравийного фильтра неудовлетворительного качества. При увеличении давления нагнетания в скважине образуется переуплотненный фильтр с повышенным сопротивлением. Формирование фильтра повышенного сопротивления — следствие недостаточной устойчивости стенок скважины в процессе закачки, их обрушения и перемешивания частиц гравия с песком водоносного пласта.

Необходимо отметить, что при смещении гравия с песком формируется среда с проницаемостью, меньшей исходной проницаемости песка водоносного пласта. В этом случае одно из основных преимуществ гравийного фильтра — снижение сопротивления водоприемной части скважины за счет замены малопроницаемого песка водоносного пласта на более проницаемый гравий не просто сводится на нет, но и приводит к отрицательным последствиям. Для устранения обрушения стенок скважины рекомендуется увеличить репрессию на пласт в процессе закачки, что достигается увеличением расхода смеси.

Уменьшение давления нагнетания свидетельствует о рыхлом

сложении частиц в фильтре, образовании открытых каналов и пустот. При рыхлом сложении частиц гравия пористость и проницаемость гравийного фильтра увеличивается. Эксплуатация такого фильтра недопустима вследствие повышенной вероятности пескования скважины через интервалы рыхлого сложения частиц. Пескование такого характера не всегда удастся остановить. В случае намыва более проницаемого слоя гравийного фильтра перед эксплуатацией его следует уплотнить принудительным воздействием.

В процессе формирования гравийного фильтра не только оценивается качество гравийного фильтра, но и появляется возможность оперативного принятия мер по предотвращению и устранению осложнений, повышению эффективности работ в целом. Разработанная схема характеризуется следующими преимуществами:

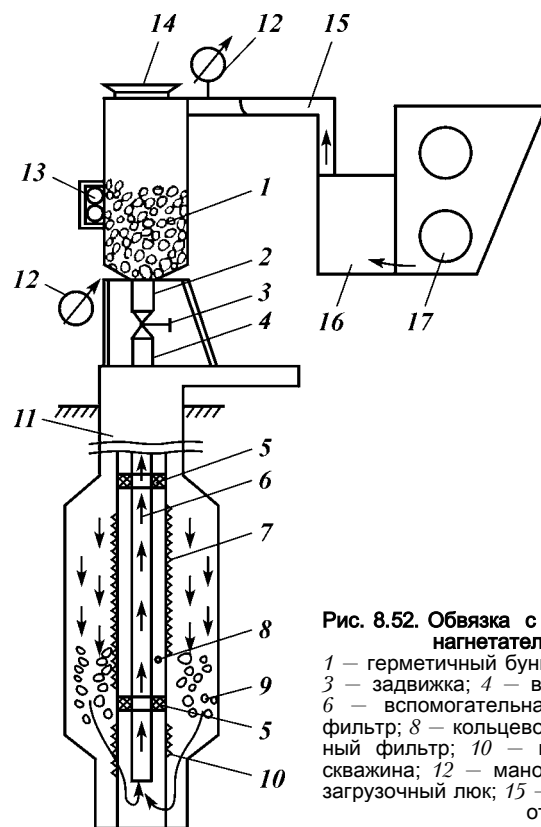
- простота и надежность технологического процесса;
- возможность оперативного контроля качества намываемого гравийного фильтра, прогноза осложнений и выработки действенных мер по их устранению и предупреждению в дальнейшем;
- механизация процесса подачи гравия в смесительную емкость и возможность исключения вспомогательного насоса, используемого обычно для приготовления гравийной смеси;
- независимая от скорости фильтрации и режима движения смеси оценка качества сооружаемого фильтра, т.е. возможность проведения работ при любых режимах транспортировки смеси;
- малые давления в герметичном бункере, обусловленные его установкой в сливной магистрали, а следовательно, и простота его конструкции и эксплуатации.

Применение технологической схемы оценки качества процесса намыва гравия и сооружаемого фильтра с герметичным бункером в сливной магистрали дает существенную погрешность при поглощении жидкости-носителя. Дело в том, что при поглощении скорость фильтрации в герметичном бункере и в сливной магистрали меньше, чем в нагнетательной магистрали и гравийном фильтре. В случае, когда в процессе намыва гравия величина поглощения постоянна, угол наклона графиков увеличения давления с увеличением высоты намываемого гравийного слоя меньше расчетных значений.

При правильном технологическом процессе и высоком качестве фильтра угол наклона прямой давления к оси абсцисс постоянен. Однако с увеличением высоты гравийного фильтра возрастает репрессия на водоносный пласт и поглощение интенсифицируется. Интенсификация поглощения в процессе намыва гравия приводит к выполаживанию графиков к оси абсцисс.

Оценка качества работ и намываемого фильтра в этом случае возможна только приблизительная. Ориентировочно качество фильтра считается удовлетворительным в случае плавной кривой давления, а при наличии прерывистой кривой с пиками давления — неудовлетворительным.

Устранить влияние поглощения жидкости-носителя водоносным пластом на достоверность оценки качества сооружаемого фильтра позволяют частично вторая и полностью третья схемы технологического оборудования. Вторая схема технологического оборудования для оценки качества процесса намыва гравия и самого фильтра предполагает установку герметичного бункера с площадью поперечного сечения, соответствующей площади поперечного сечения фильтра в скважине в нагнетательной магистрали (рис. 8.52).



**Рис. 8.52. Обвязка с герметичным бункером в нагнетательной магистрали:**

1 — герметичный бункер; 2 — выходной патрубок; 3 — задвижка; 4 — входной патрубок; 5 — сваб; 6 — вспомогательная колонна; 7 — основной фильтр; 8 — кольцевое пространство; 9 — гравийный фильтр; 10 — контрольный фильтр; 11 — скважина; 12 — манометр; 13 — вибратор; 14 — загрузочный люк; 15 — шланг; 16 — насос; 17 — отстойник

Постоянное давление нагнетания будет поддерживаться только в том случае, когда в скважине формируется гравийный фильтр высокого качества, аналогичный по фильтрационным свойствам гравийному слою в герметичном бункере, т.е. оптимальной укладке частиц. Плавное увеличение давления нагнетания по мере закачки гравия в скважину свидетельствует о постоянном обогащении смеси инородными примесями. Для снижения объема примесей, поступающих в фильтр, может быть рекомендовано снижение подачи смеси. Прерывистое увеличение давления нагнетания в процессе закачки объясняется, как правило, недостаточной устойчивостью стенок скважины, обрушением, вывалами породы. С целью повышения устойчивости стенок скважины целесообразно увеличить репрессию на пласт за счет увеличения расхода смеси.

Плавное и скачкообразное уменьшение давления нагнетания свидетельствует о формировании в скважине разуплотненного, разрыхленного фильтра с большим количеством пустот и открытых каналов. Эксплуатировать такой фильтр без предварительного уплотнения не рекомендуется.

Значительные погрешности при оценке качества намываемого фильтра по схеме с герметичным бункером в нагнетательной магистрали могут возникать в неравномерных по фильтрационным свойствам водоносных пластах. При поглощении жидкости-носителя пластом преимущественно в верхних интервалах фильтра применение схемы не рекомендуется. Кроме того, использование герметичного бункера в нагнетательной магистрали усложняет его конструкцию и эксплуатацию при больших давлениях нагнетания. С увеличением потерь напора в циркуляционной системе рекомендуется уменьшать высоту бункера, а загрузку гравием осуществлять периодически.

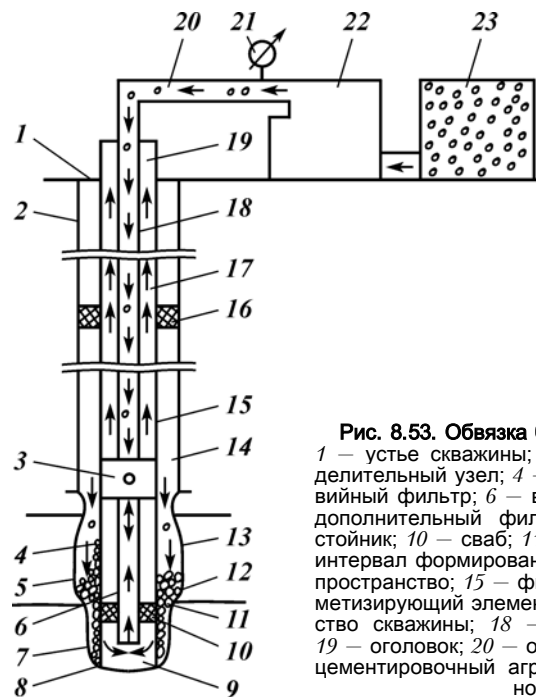
Первые две схемы сооружения гравийного фильтра не обеспечивают достоверного определения фильтрационных свойств намываемого слоя при неравномерной по толщине гравийной обсыпке. Как правило, при расширении скважины в интервале формирования гравийного фильтра гидромониторными и эксцентриковыми расширителями не получается калиброванного ствола скважины с постоянным диаметром. Осложняется получение равномерного ствола скважины также при использовании механических и гидравлических расширителей с жестким выходом породоразрушающих органов при оборудовании скважин в породах, склонных к кавернообразованию. В первую очередь к таким породам следует отнести водоносные пески различного фракционного состава.

При неравномерной толщине гравийного фильтра нисходящие

скорости фильтрации в скважине изменяются, что приводит к несоответствию скоростей потока в бункере и в намываемом слое гравия. Следовательно, уменьшение потерь напора в бункере на поверхности не компенсируется увеличением потерь напора в намытом гравийном фильтре в скважине. Следовательно, при неравномерной толщине фильтра давление нагнетания при нормальном технологическом процессе будет переменным. С увеличением толщины гравийного фильтра давление нагнетания уменьшается, а с уменьшением — наоборот увеличивается.

Наиболее широкую область применения в практике контроля качества намываемого фильтра имеет третья схема, из которой исключен герметичный бункер (рис. 8.53).

В скважину 2 устанавливают фильтровую 15 колонну с основным 4 и дополнительным 7 фильтрами, отстойником 9. Кольцевое пространство 14 скважины 2 герметизируют элементы 1. Внутри фильтровой колонны на вспомогательной 18 колонне спускают распределительный узел 3 и водоподъемную 6 колонну, причем распределительный узел 3 фиксируется на расчетной высоте от верхних отверстий основного 4 фильтра. Определяют



**Рис. 8.53. Обвязка без герметичного бункера:**

1 — устье скважины; 2 — скважина; 3 — распределительный узел; 4 — основной фильтр; 5 — гравийный фильтр; 6 — водоподъемная колонна; 7 — дополнительный фильтр; 8 — забой; 9 — отстойник; 10 — сваб; 11 — гравий; 12 — пласт; 13 — интервал формирования обсыпки; 14 — кольцевое пространство; 15 — фильтровая колонна; 16 — герметизирующий элемент; 17 — кольцевое пространство скважины; 18 — вспомогательная колонна; 19 — оголовок; 20 — обвязка; 21 — манометр; 22 — цементировочный агрегат; 23 — емкость с гравийной смесью

коэффициент турбулентной фильтрации гравия, выбранного гранулометрического состава экспериментальным или расчетным путем. Жидкость-носитель должна обеспечивать минимальную кольматацию пласта, обсыпки, иметь высокую несущую способность. При оборудовании гравийных фильтров свойства жидкости-носителя должны быть аналогичны свойствам пластовой жидкости.

Скважину промывают при комбинированной циркуляции до осветления выходящей на устье жидкости. После промывки закачивают гравий. В процессе закачки измеряют расход смеси и объем засыпаемого гравия. По величинам увеличения давления в нагнетательной магистрали за единицу времени, объему закачанного гравия и расходу смеси определяют текущие значения коэффициента турбулентной фильтрации гравия в намываемом за единицу времени слое фильтра по формуле

$$k_t = \frac{wQ^2}{\Delta p w_{\text{кп}}^2}, \quad (8.148)$$

где  $w$  — объем гравия, закачанного в скважину в единицу времени;  $Q$  — расход смеси;  $\Delta p$  — увеличение давления в нагнетательной магистрали за единицу времени или потери напора в намываемом за единицу времени слое гравия;  $w_{\text{кп}}$  — площадь поперечного сечения гравийного фильтра.

Значения  $k_t$  сопоставляют с расчетными значениями коэффициента турбулентной фильтрации, полученными предварительно перед закачкой гравия. В конце закачки оценивают сопротивление гравийного фильтра

$$\zeta_{2\phi} = \frac{S}{q^2} = \frac{1}{\bar{k}_t (2\pi H)^2} \left( \frac{1}{r_\phi} - \frac{1}{r_0} \right), \quad (8.149)$$

где  $S$  — понижение при откачке или эксплуатации скважины;  $q$  — дебит;  $\bar{k}_t$  — средние значения текущего коэффициента турбулентной фильтрации гравийного фильтра;  $H$  — высота гравийного фильтра;  $r_\phi$  — радиус фильтровой колонны;  $r_0$  — радиус скважины.

По полученным значениям  $\zeta_{2\phi}$  оценивают несовершенство скважины по характеру вскрытия, эксплуатационные характеристики скважины и погрешность при определении параметров пласта.

При сооружении гравийных фильтров в скважине наиболее часто встречаются осложнения, связанные, с одной стороны, с обрушением стенок скважины в процессе закачки, перемешива-

нием гравия с песком продуктивного пласта, резким снижением проницаемости гравийного фильтра и ухудшением эксплуатационных характеристик скважины, а с другой стороны — с рыхлым сложением частиц гравия в фильтре, образованием открытых каналов и пустот, длительным пескованием скважины при откачке и снижением проницаемости гравийного фильтра.

Исследованиями автора доказано, что при устойчивом стволе скважины в процессе закачки методом комбинированной циркуляции при предварительной промывке скважины и инструмента, очистке жидкости-носителя на поверхности в гравийный фильтр может попадать до 2 % инородных примесей, преимущественно песка продуктивного пласта за счет эффекта шелушения стенок скважины, что приводит к снижению коэффициента турбулентной фильтрации гравия в фильтре до 5 % по отношению к расчетному коэффициенту турбулентной фильтрации гравия, используемого для закачки. При обрушении стенок скважины, связанном с недостаточной репрессией на пласт в процессе закачки, в гравийный фильтр попадает большое количество инородных примесей, что приводит к резкому снижению коэффициента турбулентной фильтрации намываемого слоя гравия.

При рыхлом сложении частиц гравия в фильтре жидкость-носитель фильтруется только по нескольким каналам и пустотам, т.е. в областях, где сопротивление фильтрационному потоку минимальное. Установлено, что при фильтрации жидкости-носителя по всей площади поперечного сечения фильтра, связанной с неравномерным по плотности формированием фильтра, коэффициент турбулентной фильтрации увеличивается и ухудшается качество фильтра. Равномерное по плотности сложение частиц в фильтре обеспечивает равномерный нисходящий фильтрационный поток по всей площади поперечного сечения фильтра и поддержание текущих значений коэффициента турбулентной фильтрации намываемого гравия, соответствующих расчетным значениям.

Увеличение текущих значений коэффициента турбулентной фильтрации гравия в намываемом фильтре за счет несоосной установки фильтровой колонны в скважине по отношению к расчетным значениям при компактной укладке гравия может достигать 5 %. Учитывая, что погрешность при определении параметров в процессе закачки составляет не более 5 %, очевидно, что нормальный процесс сооружения гравийного фильтра в скважине обеспечивается при поддержании текущих значений коэффициента турбулентной фильтрации гравия намываемого фильтра в пределах 0,9—1,1 от расчетных значений.

Уменьшение коэффициента турбулентной фильтрации до зна-



чений, меньших 0,9 расчетных значений, связано с обрушением стенок скважины при недостаточной репрессии на пласт. Для стабилизации процесса сооружения фильтра необходимо увеличить репрессию на пласт. С увеличением репрессии на пласт повышается устойчивость стенок скважины, уменьшается, а затем исключается возможность попадания в фильтр инородных примесей.

Текущие значения коэффициента турбулентной фильтрации намываемого слоя гравийной обсыпки увеличиваются до расчетных значений. При увеличении коэффициента турбулентной фильтрации намываемого слоя гравия более чем в 1,1 расчетных значений уплотняют гравийную обсыпку гидравлическим или механическим импульсным воздействием на гравий, а текущие значения коэффициента турбулентной фильтрации намываемого слоя гравия по мере уплотнения уменьшаются до расчетных значений. В этой связи в процессе сооружения фильтра обеспечивается возможность оперативного контроля за осложнениями и выработка мероприятий по их устранению.

Для прогноза проектной производительности скважины, а также оценки величины погрешности при определении параметров пласта важно знать сопротивление фильтра. Обычно сопротивление фильтра определяют в процессе откачки при изучении характера потерь напора в поперечном сечении гравийного фильтра с помощью пьезометров. Однако такой метод оценки сопротивления фильтра сложен и требует дополнительных затрат времени и средств. При сооружении гравийного фильтра по предлагаемой схеме контролируется коэффициент турбулентной фильтрации гравия в намываемом слое обсыпки и появляется возможность определения сопротивления фильтра непосредственно в процессе закачки.

Традиционно сопротивление водоприемной части скважины определяют в процессе откачки. Величина сопротивления, полученная таким образом, — обобщенная, из которой выделить собственно потери напора в гравийном фильтре, каркасе фильтра и в околоскважинной зоне сложно. Трудность заключается в необходимости установки на незначительном расстоянии от скважины нескольких пьезометров или датчиков давления, что приводит к удорожанию работ. В этой связи на практике о качестве оборудования скважины судят по характеру депрессионной воронки в интервале между скважиной и ближайшими наблюдательными скважинами.

В случае плавной депрессионной воронки без существенного скачка потерь напора в околоскважинной зоне полагают, что качество фильтра, в том числе и гравийного, удовлетворительное.

При значительном увеличении напора в околоскважинной зоне в сравнении с расчетными значениями скважина оборудована неудовлетворительно.

Оценка качества намыва гравийного фильтра по данным от- качки ориентировочна, а часто ошибочна. Дело в том, что при неудовлетворительной технологии вскрытия пласта, кольматация с последующим намывом качественного гравийного фильтра, и наоборот, сопротивление околоскважинной зоны может превышать расчетные значения.

При контроле качества гравийного фильтра в газовых сква- жинах используют гамма-гамма-каротаж в комплекте с зондом «Кура-2». Гамма-гамма-каротаж позволяет определить характер изменения пористости фильтра по его высоте, а следовательно, и качество самого фильтра. Увеличение пористости свидетельст- вует о наличии в фильтре пустот, рыхлом сложении частиц и повышенной опасности пескования. Уменьшение пористости обусловлено обычно попаданием в данный интервал фильтра инородных примесей, преимущественно песка продуктивного пласта. Недостаток метода контроля качества гравийного фильт- ра по данным гамма-гамма каротажа — низкая разрешающая спо- собность с удалением от оси скважины. В этой связи оценка ка- чества гравийных фильтров с толщиной слоя более 50 мм таким методом существенно осложняется.