

Глава 3



СНИЖЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД В ОКОЛОСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ

В околоскважинной зоне при вскрытии пласта и оборудовании ствола по технологическим причинам происходит существенное снижение фильтрационных свойств пород. Потерю напора, обусловленную технологическими причинами, обычно включают в понятие скин-эффекта. Как показывает практика, величина скин-эффекта соизмерима, а иногда и существенно превышает общие потери напора в пласте. Например, на Ялуторовском водозаборе Тюменской области расчетные потери напора в системе скважина – пласт или понижение при заданных режимах эксплуатации должны были составлять 5–6 м, а на самом деле составили 24–26 м. На долю скин-эффекта пришлось 18–21 м общего понижения или 360–420 % от расчетных значений.

Аналогичные результаты получены на многих производственных объектах, что подтверждает превалирующее влияние технологических процессов по сооружению скважины на результирующую производительность. Используя прогрессивные технологические процессы, скин-эффект можно минимизировать, а при некоторых условиях и исключить. На сопротивление приемной части скважины влияют конструкция забоя, способ вскрытия пласта и тип используемой промывочной жидкости, характер декольматации. В указанных технологических приемах заложен максимальный потенциал снижения гидравлического сопротивления и повышения дебита.

3.1. КОНСТРУКЦИЯ ЗАБОЯ

Конструкция скважины (в интервале продуктивного пласта) или забоя определяет характер движения потока в околоскважинной зоне, сопротивление и гидродинамическое несовершенство

ство приемной части. Конструкция забоя выбирается исходя из свойств пород продуктивного пласта, вышезалегающих пород кровли, неоднородности разреза, способа вскрытия пласта, назначения скважины и планируемых режимов эксплуатации.

Каждая конструкция должна выбираться исходя из максимального гидродинамического совершенства скважины при заданных условиях расположения в пласте и эксплуатации.

Наиболее просты в исполнении бесфильтровые конструкции забоев (рис. 3.1, *а, б, в, г*). Если суффозии сложно избежать за счет бесфильтровой конструкции, то целесообразно оборудовать скважину фильтрами (рис. 3.1, *д, е*) или фильтрами в сочетании с гравийной обсыпкой и различной формой приемной каверны (рис. 3.1, *ж, з, и, к*). В некоторых случаях рекомендуется закреплять породы продуктивного пласта или гравийной засыпки различными типами накопителей (рис. 3.1, *л, м*).

Бесфильтровые скважины сооружаются в устойчивых породах и слабосцементированных песках. В слабосцементированных породах бесфильтровые скважины сооружаются при наличии устойчивой кровли (см. рис. 3.1, *а*). Скважину бурят и закрепляют обсадной колонной до кровли продуктивного пласта. После ОЗЦ вскрывают пласт на несколько метров, приподнимают бурильную колонну до достижения долотом уровня башмака обсадной колонны и продолжают промывку без вращения инструмента. Монтируют эрлифт и начинают строительную откачку, при которой песок из продуктивного пласта выносится и под кровлей формируется конусообразная воронка. При строительной откачке из пласта вместе с песком выносится кольматант, поступивший туда при вскрытии и промывке. Встречаются случаи, когда при формировании воронки на поверхность выносится, до 200 м³ песка. Очевидно, что в таких случаях практически весь кольматант удаляется из скважины и конструкцию забоя можно считать совершенной по характеру вскрытия и параметр ζ_2 в формуле (1.32) можно считать равным нулю.

С увеличением размеров воронки дебит скважины растет. Поэтому целесообразно создать в пласте воронку размеров, максимально возможных из условия устойчивости к обрушению кровли. Производительность скважины определяется совокупностью геологических, гидрогеологических, технических и технологических факторов.

К геологическим факторам, влияющим на возможную результирующую производительность, относятся прежде всего свойства пород (крепость, мощность и трещиноватость пород кровли, величины горного и гидростатического давления на кровлю), определяющих устойчивость кровли при эксплуатации с заданным

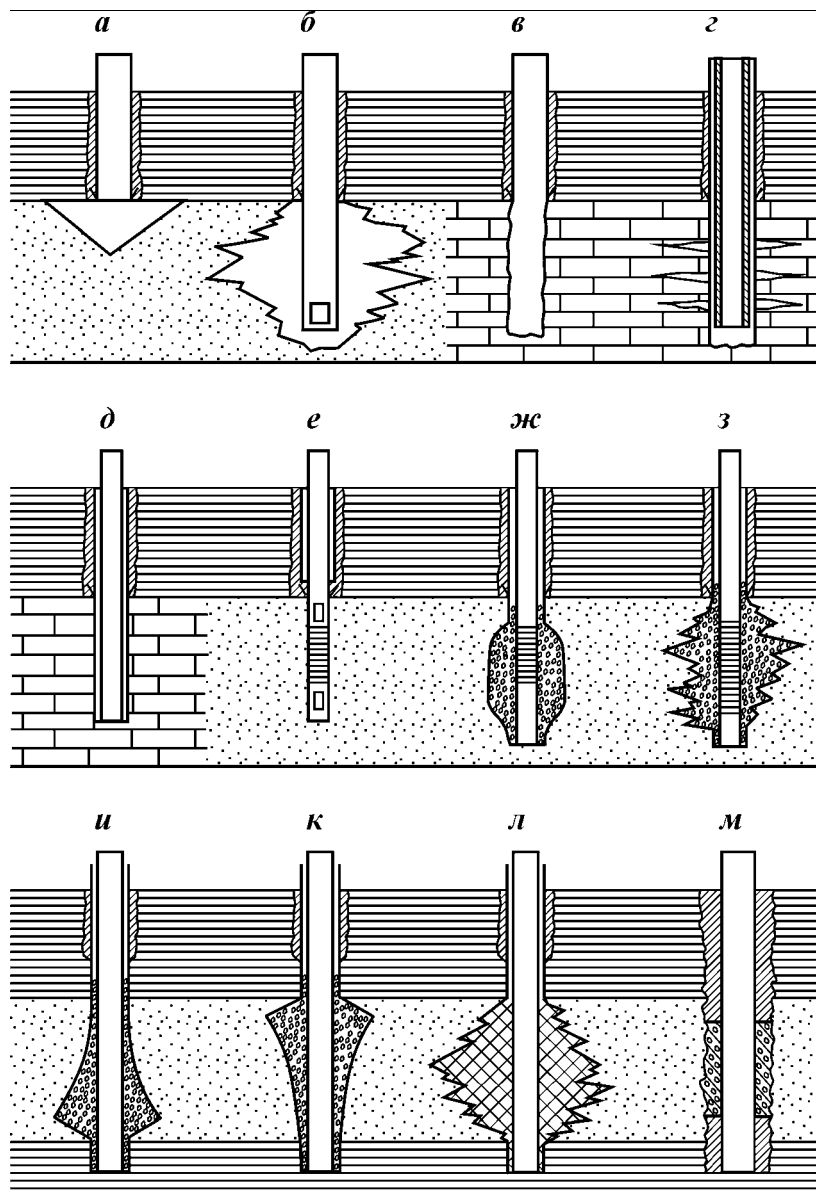


Рис. 3.1. Конструкция забоя:
а, б, в, г – бесфильтровая; *д, е* – фильтровая; *ж, з, и, к* – с гравийной обсыпкой

понижением. С ростом крепости, мощности пород кровли и гидростатического давления на нее появляется возможность увеличения размеров воронки, а значит и дебита. Степень трещиноватости и горное давление на кровлю ограничивают возможность создания воронки повышенных размеров.

К гидрогеологическим факторам, определяющим производительность бесфильтровой скважины, относят тип песков продуктивного пласта, их фильтрационные и пьезопроводные свойства, пластовое давление. Улучшение фильтрационных свойств пласта, наблюдающееся с ростом фракционного состава пород, и повышение пластового давления благоприятно сказываются на результирующей производительности откачки.

Технические факторы, ограничивающие производительность бесфильтровой скважины, – это тип и рабочие характеристики насосно-компрессорного оборудования, используемого для строительной откачки. Обычно для формирования воронки бесфильтровой скважины рекомендуют использовать высокопроизводительное компрессорное оборудование. Для промывки скважины целесообразно применять насосы типа НБ-125. Обычно на практике геологоразведочные и строительные организации таким оборудованием не комплектуются, поэтому необходимо учитывать технические возможности откачного оборудования при формировании приемной воронки. Применение для строительной откачки оборудования недостаточной мощности приводит к необходимости расчета дебита не исходя из потенциала пласта в совокупности степенью устойчивости кровли, а с учетом технических возможностей оборудования.

К технологическим факторам, влияющим на производительность бесфильтровой скважины, относят способ и режимы вскрытия продуктивного пласта, время контакта породы с промывочной жидкостью и цементным раствором, несовершенство скважины по характеру и степени вскрытия и рабочее понижение. В процессе формирования воронки закольматированная порода выносится из скважины и естественная проницаемость пласта восстанавливается в околоскважинной зоне при длительном контакте глинистых и других промывочных жидкостей с породой, однако значительных репрессий (даже при попадании в пласт цементного раствора) полного восстановления проницаемости не происходит. Особенно это характерно для методов искусственного крепления кровли цементным раствором.

В случае соблюдения технологического процесса при креплении скважины и вскрытии пласта раскольматацию можно считать полной и несовершенством скважины по характеру вскры-

тия можно пренебречь. В общем случае дебит бесфильтровой скважины

$$Q = \frac{\pi k m J \operatorname{tg} \alpha}{\mu \left(\ln \frac{R}{r} + \zeta_1 \right)} = \frac{\pi k h J}{\mu \left(\ln \frac{R}{r} + \zeta_1 \right)}, \quad (3.1)$$

где α – угол естественного откоса песков под водой, находящийся в пределах 20–30°; R – радиус влияния скважины; r – радиус воронки; h – глубина воронки.

При выводе формулы (3.1) предполагалось, что в пласте наблюдается плоскорадиальная фильтрация и только в околоскважинной зоне происходит искривление линий тока к воронке. Дополнительное сопротивление, обусловленное искривлением линий тока вблизи воронки, учитывается коэффициентом несовершенства скважины по степени вскрытия. За счет высокого несовершенства по степени вскрытия, наблюдающегося особенно в мощных пропластках, производительность скважины может существенно снижаться. По данным В.С. Алексеева, бесфильтровые скважины не могут считаться идеальным водоприемником из-за высокого несовершенства по степени вскрытия несмотря на гораздо большую фильтрующую поверхность.

Зависимость (3.1) предполагает почти линейную связь между дебитом и радиусом воронки. Под знаком логарифма влияние радиуса на дебит, с одной стороны, весьма незначительное, а с другой стороны, дебит скважины можно выразить через скорость фильтрации и площадь сечения воронки.

Рассмотрим процесс формирования воронки. При вскрытии пласта и пуске строительной откачки размер водоприемной воронки минимален, скорости фильтрации высоки и из скважины выносятся песок любой фракции. При разработке каверны скорости фильтрации уменьшаются и интенсивность выноса песка снижается. Песчаные частицы выносятся из скважины в том случае, когда скорость фильтрации на поверхности воронки превышает критические. Каждый пласт сложен частицами определенного гранулометрического состава или характерного диаметра, которому соответствует своя критическая скорость фильтрации, приводящая к выносу частиц со свободной поверхности откоса. В процессе откачки на поверхности каверны наблюдаются постоянные (для любого интервала) скорости фильтрации из пласта, соответствующие гидравлической крупности частиц песка на откосе.

В этом случае дебит бесфильтровой скважины при строительной откачке

$$Q = \frac{v_{кр} \pi r^2}{\cos \alpha}, \quad (3.2)$$

где $v_{кр}$ – критические скорости фильтрации из пласта.

Зависимость (3.2), полученная логическим путем, предполагает квадратичную связь между дебитом и радиусом воронки или линейную связь между дебитом и площадью фильтрации. При выводе формулы (3.2) допускалось, что воронка бесфильтровой скважины имеет конусообразную форму. Однако в верхней и данной части воронки наблюдается несущественное выполаживание склонов. Многочисленными экспериментами установлено, что для практических расчетов отклонением формы воронки от конусообразной можно пренебречь.

Если в формуле (3.2) учитывать критическую скорость фильтрации с откосов $v_{кр}$, то получим предельно возможный дебит без пескования с заданным понижением. На практике рекомендуют осуществлять строительную откачку с дебитом, на 25–30 % превышающим проектный. Для проектного дебита в качестве расчетной формулы следует использовать выражение

$$Q = \frac{0,7 \pi v_{кр} r^2}{\cos \alpha}. \quad (3.3)$$

В формулах (3.2) и (3.3) присутствует радиус воронки r , который в процессе строительной откачки определяется из объема вынесенного песка, обязательно контролируемый. Радиус сформировавшейся при откачке бесфильтровой воронки через объем вынесенного песка W выражается следующим образом

$$r = \sqrt[3]{\frac{3W}{\pi \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (3.4)$$

Значения критических скоростей фильтрации, при которых начинается суффозия, и углы естественного откоса для типовых песков продуктивных пластов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Типовые углы естественного откоса и критические скорости выноса частиц со склонов бесфильтровой воронки для различных фракционных составов пород

Тип песка	Средний диаметр фракции, мм	Критические скорости выноса частиц $v_{кр}$, м/с	Угол естественного откоса, градус
Пылеватый (глинистый)	0,01–0,05	0,004–0,006	30
Тонкозернистый	0,05–0,1	0,012–0,018	18
Мелкозернистый	0,1–0,25	0,036–0,042	20
Среднезернистый	0,25–0,5	0,84–0,096	25
Крупнозернистый	0,5–1,0	0,138–0,150	27
Грубозернистый	1,0–2,0	0,36–0,420	30

Полученные выражения для определения дебита бесфильтровой скважины справедливы только для установившегося режима эксплуатации, т.е. при обеспеченности месторождения ресурсами. Поэтому использовать в расчетах можно только дебиты строительной откачки и размеры воронок, полученные в установившемся режиме.

В некоторых случаях приходится не дожидаться установившегося режима при строительной откачке, так как это может занять много времени, а воронка требуемых размеров уже сформировалась. В таких условиях целесообразно связать возможную производительность скважины с фильтрационными параметрами пласта. Уравнение (3.1), учитывающее связь дебита и коэффициента фильтрации пласта, характеризуется неопределенностью, которая выражена в параметре несовершенства по степени вскрытия ζ_1 . Кроме того, выражение (3.1) не имеет строгого физического смысла, так как дебит явно не зависит от площади фильтрационной поверхности каверны. Отмеченная неопределенность объясняется неправильно выбранными предпосылками о наличии в пласте при эксплуатации бесфильтровой скважины плоскорадиальной фильтрации. По-видимому, при водоприемной поверхности в виде воронки градиент фильтрации в любой точке пласта будет направлен к воронке, а точнее к ее верхней части, близлежащей к основанию. Поэтому поток будет иметь радиально-сферичное направление, а не плоскорадиальное. Это положение подтверждается формой воронки, поверхность которой совпадает с изогипсой постоянного давления в пласте при откачке, которая перпендикулярна направлению фильтрации.

Решая уравнение для радиально-сферического притока и бесфильтровой скважины, получаем следующее выражение для установившегося режима фильтрации:

$$Q = \frac{2\pi k m J}{\mu R \left(\frac{R}{r_{np}} - \frac{1}{R} \right)}, \quad (3.5)$$

где m – мощность пласта; r_{np} – приведенный радиус воронки.

Выражение (3.5) не включает параметр несовершенства скважины по степени вскрытия, так как при радиально-сферичном направлении потока он теряет свой смысл. В выражение (3.5) входит приведенный радиус воронки, который не соответствует ее истинному радиусу. Замена истинного радиуса на приведенный вызвана удобствами интегрирования при такой замене. Приведенный радиус воронки рекомендуется выражать через истинный радиус по формуле

$$r_{\text{тр}} = \frac{0,71h}{\sqrt{\text{tg } \alpha \sin \alpha}} = \frac{0,71r \text{tg } \alpha}{\sqrt{\text{tg } \alpha \sin \alpha}}. \quad (3.6)$$

Для нестационарного режима фильтрации величина радиуса влияния скважины считается величиной переменной и зависит от времени с начала откачки. Радиус влияния определяется с точностью до 8–10 % по формуле

$$R = 1,5\sqrt{at}, \quad (3.7)$$

где a – коэффициент пьезопроводности, t – время с начала откачки.

Подставляя равенства (3.6) и (3.7) в уравнение (3.5), получаем выражение для определения дебита бесфильтровой скважины в процессе строительной откачки при нестационарном режиме фильтрации

$$Q = \frac{2\pi kmJ}{\left(\frac{1,5\mu\sqrt{at \text{tg } \alpha \sin \alpha}}{0,71r \text{tg } \alpha} - 1 \right)}. \quad (3.8)$$

При формировании воронки в нестационарном режиме следует учитывать, что для поддержания постоянного дебита следует постоянно увеличивать понижение. Поэтому получив в процессе строительной откачки относительно высокий дебит при нестационарном режиме, нельзя по нему рассчитывать проектный дебит. Уменьшив дебит строительной откачки на 25–30 %, как это делается обычно при проектировании дебита скважин без фильтров, при увеличении радиуса влияния скважины и переходе к стационарному режиму будет наблюдаться снижение производительности скважин. При выборе проектного дебита бесфильтровой скважины и разработке воронки определенных размеров следует обязательно предусматривать снижения дебита при переходе к стационарному режиму эксплуатации до стабилизации радиуса влияния.

Один из основных технологических параметров формирования бесфильтровой скважины – время с начала откачки при определенном дебите и понижении. Рациональное время строительной откачки может быть определено по формуле, полученной из выражения (3.8),

$$t = \frac{0,224 r^2}{a\mu^2 \cos \alpha} \left(1 + \frac{2\pi kmJ}{Q} \right)^2. \quad (3.9)$$

В выражении (3.9) дебит скважины определяется из формулы (3.3), а радиус сформировавшейся воронки – по объему выне-

сенного песка из уравнения (3.4). Решая равенство (3.8) относительно радиуса сформировавшейся воронки, обеспечивающей заданный дебит, имеем

$$r = \sqrt{\frac{a\mu^2 \cos \alpha t}{0,224 \left(1 + \frac{2\pi kmJ}{Q}\right)^2}}. \quad (3.10)$$

Сопоставляя выражения (3.10) и (3.4), определяем заданный объем песка, который следует извлечь из скважины при строительной откачке для получения дебита Q , т.е.

$$W = \frac{\pi \operatorname{tg} \alpha}{3} \left(\frac{a\mu^2 \cos \alpha t}{0,224 \left(1 + \frac{2\pi kmJ}{Q}\right)^2} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.8) позволяет рассчитывать дебит бесфильтровой скважины, исходя из гидрогеологических условий месторождения, а выражения (3.9), (3.10) и (3.11) – правильно выбрать технологический процесс откачки.

В процессе строительной откачки, когда величина радиуса влияния не стабилизировалась на проектной величине, важно обеспечить дебит, превышающий проектный. Это обусловлено тем, что со временем и распространением воронки депрессии в пространстве дебит, согласно уравнению Тейса, снижается. Для обеспечения проектного дебита $Q_{\text{пр}}$ в процессе строительной откачки, начатой t время назад, нужно получить дебит не ниже

$$Q = Q_{\text{пр}} \frac{R - r_{\text{пр}}}{\sqrt{1,5at} - r_{\text{пр}}}. \quad (3.12)$$

Дебит строительной откачки определяется через форму воронки и критическую скорость потока (3.3), поэтому можно определить проектный дебит, который будет получен, если завершить строительную откачку через время t и дебитом Q ,

$$Q_{\text{пр}} = \frac{\pi v_{\text{пр}} r^2}{\cos \alpha} \frac{\sqrt{1,5at} - r_{\text{пр}}}{R - r_{\text{пр}}}. \quad (3.13)$$

Возможный дебит бесфильтровой скважины ограничивается не только гидрогеологическими особенностями месторождения, техническим оснащением откачки, но и необходимостью обеспечения стабильной устойчивой работы воронки в процессе экс-

плутации. При откачке высока вероятность обрушения вышележающих пород кровли, что приводит к перекрытию продуктивного интервала слабопроницаемыми породами, резкому снижению дебита, пескованию и выходу из строя водоподъемного оборудования. Обрушение кровли – наиболее опасный вид осложнений в процессе сооружения и эксплуатации бесфильтровых скважин. Обрушение может происходить и после строительной откачки из-за смены режимов эксплуатации, незначительной суффозии и продолжающегося процесса формирования воронки. Поэтому необходимое условие сооружения бесфильтровых скважин – наличие кровли, сложенной плотными породами, которые устойчивы к обрушению.

Полость будет устойчива, если ее радиус не превышает критических размеров. Критический радиус воронки бесфильтровой скважины определяется из условия

$$r_{\max} \leq \frac{(H - J)f}{\gamma}, \quad (3.14)$$

где H – естественный напор продуктивного пласта, J – понижение, f , γ – соответственно коэффициент крепости и объемный вес пород кровли.

Коэффициент крепости f для относительно слабых горных пород вычисляют по формуле Л.И. Барона

$$f = \frac{\tau_{\text{сж}}}{300} + \sqrt{\frac{\tau_{\text{сж}}}{300}}, \quad (3.15)$$

где $\tau_{\text{сж}}$ – предел прочности пород на одноосное сжатие.

Радиус сформированной воронки контролируется на поверхности по объему вынесенного на поверхность песка в соответствии с выражением (3.4).

Исходя из условия обеспечения устойчивости кровли, определяем критическую величину объема вынесенного на поверхность песка, после достижения которого следует прекратить откачку

$$W \leq \frac{\pi \operatorname{tg} \alpha (H - S)^3 f^3}{3\gamma^3}. \quad (3.16)$$

Согласно теории М.Н. Протодяконова, при формировании воронки в пласте в кровле развивается параболический свод обрушения, что тоже должно учитываться при анализе бесфильтровой скважины на устойчивость. Рекомендуется для определения минимально допустимой мощности пород кровли m_k использовать условие

$$m_k = 1,43 \frac{r}{f}. \quad (3.17)$$

Бесфильтровые скважины успешно сооружаются в некоторых регионах страны. Производительность скважин с данной конструкцией забоя существенно выше, чем любых других в аналогичных условиях. Эксплуатация бесфильтровых скважин отличается стабильностью дебита в течение длительного срока.

По технологии В.М. Белякова впервые были сооружены бесфильтровые забои в глубоких скважинах. Получены повышенные эксплуатационные параметры скважин.

Несмотря на явные преимущества бесфильтровых конструкций забоев, обеспечивающих высокие эксплуатационные параметры при минимальных затратах и простоте выполнения технологических операций, они не получили широкого распространения на практике. Это объясняется тем, что для успешного сооружения бесфильтровых скважин необходимо наличие устойчивой кровли, которая предохраняет воронку от обрушения. К сожалению, такими условиями характеризуются ограниченные месторождения, распространять технологию сооружения бесфильтровых забоев следует после проведения опытно-методических работ. В некоторых случаях там, где нет гарантии устойчивой кровли, рекомендуется обеспечить ее искусственное поддержание. Искусственно поддержать кровлю можно путем создания под ней специальных экранов либо заполнения полости наполнителем.

Создание экранов для искусственного поддержания кровли сводится после формирования воронки промежуточного объема к закачке в нее цементных или других растворов, которые со временем приобретают необходимую прочность. После крепления скважины вскрывают пласт и начинают строительную откачку, формируют каверну расчетного объема. В воронку закачивают цементный раствор. После ОЗЦ строительную откачку продолжают и формируют воронку уже под сформировавшимся цементным конусом.

При закачке раствора в полость цементный раствор принимает форму воронки, т.е. имеет угол наклона к кровле, соответствующий углу естественного откоса песка. При откачке и дальнейшей разработке воронки она формируется также под естественным углом откоса и распространяется в глубь пласта от скважины.

На отдаленных участках цементная подушка отсутствует и поддержки кровли не обеспечивается. Поэтому при создании экранов для поддержки кровли существенного увеличения ее ус-

тойчивости достичь не удастся. Кроме этого, долговечность работы экранов со временем снижается, что может привести к обрушению воронки. Следовательно, применение специальных экранов может быть эффективно лишь для укрепления устойчивой кровли с целью повышения надежности и стабильности эксплуатации.

Иногда рекомендуется после формирования воронки заполнить ее наполнителем (гравий или щебень). Наполнитель подают в скважину в процессе строительной откачки. Мелкие частицы пластового песка выносятся из скважины, а крупные оседают и заполняют воронку. Заполнение воронки наполнителем происходит под углом его естественного откоса.

При этом отдаленные участки каверны (наиболее продуктивные) оказываются незаполненными наполнителем. Поэтому поддержания кровли на отдаленных участках каверны при традиционной схеме заполнения воронки происходить не будет и скважина будет работать не как бесфильтровая, а как бы с донным гравийным фильтром.

Русбурмаш рекомендует технологию заполнения периферийных и наиболее продуктивных интервалов каверны наполнителем. Суть ее заключается в продавливании порций наполнителя буферной жидкостью в пласт при полном поглощении фильтрата. Гидродинамическое давление потока при поглощении буферной жидкости способствует транспортировке частиц накопителя к стенкам каверны и заполнению отдаленных полостей. Для обеспечения нагнетания наполнителя после его подачи на забой устье скважины герметизируют специальным переходником, соединяющимся с насосом или цементировочным агрегатом. В скважину после продавливания наполнителя в пласт рекомендуется досыпать наиболее крупные фракции и возобновить откачку. Откачку следует проводить незамедлительно из-за повышенной вероятности колюматации пласта при нагнетании буферной жидкости.

Методы закрепления каверны искусственным поддержанием кровли обеспечивают положительный результат только в том случае, когда первоначально кровля уже была относительно устойчива и дополнительное крепление необходимо для незначительного увеличения дебита, надежности и стабильности эксплуатации.

Надежность и стабильность эксплуатации бесфильтровых скважин понятие относительное и на практике часты случаи, когда ранее считавшиеся устойчивыми породы обсыпались, что приводило к выходу скважин из строя. Поэтому большинство производственных организаций (за исключением ограниченных

регионов) предпочитают даже в перспективных условиях заменять бесфильтровые конструкции забоев на фильтры в сочетании с гравийной обсыпкой, чтобы обезопасить скважину от непредвиденного выхода из строя.

Бесфильтровые конструкции скважин характеризуются наилучшими эксплуатационными характеристиками, а их сооружение просто и доступно специалистам. Рекомендовать бесфильтровые конструкции забоев в рыхлых породах при наличии устойчивой кровли можно только в тщательно проверенных условиях после проведения разведочных и опытно-методических работ по оценке устойчивости кровли при различных режимах эксплуатации, размерах полости и т. д.

Высокие эксплуатационные параметры скважин без фильтров и простота технологических приемов по их сооружению стимулировали поиск возможных путей сооружения скважин без фильтров в слабосцементированных песках без устойчивой кровли. Впервые на гидродинамической модели С.В. Комиссаровым было установлено, что при откачке в песках вокруг дырчатых водоприемников определенной конфигурации формируются устойчивые полости. Фильтрационный лоток заполняли песком, а фильтр имитировали дырчатым патрубком с различной комбинацией отверстий. После откачки и выноса определенного объема песка фильтр и зафильтрованное пространство заполнялось парафином. Полученные слепки свидетельствовали о том, что в песках могут формировать полости, по своей форме напоминающие гриб. Некоторые полости имели направленные под углом $35-70^\circ$ к оси скважины фильтрационные каналы, имеющие существенную протяженность.

Ю.В. Архидьяконским проведено около тысячи опытов по формированию устойчивых полостей в песках без фильтров и устойчивой кровли. В процессе экспериментов установлено, что развитие фильтрационных каналов по направлению совпадает с поверхностью наибольших напряжений вокруг скважины от горного давления. Поэтому при откачке поверхность фильтрационного канала считается опасным сечением, в котором происходит разрушение связей между частицами, а движущийся лоток выносит их на поверхность.

При формировании грибообразных полостей было замечено, что слепки имеют ярко выраженную форму тел вращения. На основании этого был сделан вывод, что необходимое условие формирования бесфильтровых полостей в песках без устойчивой кровли – специальная конструкция водозахватного устройства, обеспечивающего движения потока в затрубном пространстве от кровли к подошве пласта. При таком направлении движения по-

тока (по аналогии со стоком в обычной ванне) происходит закручивание потока и в песке формируется грибообразная воронка.

Полученные на моделях и экспериментальных скважинах бесфильтровые полости свидетельствуют о возможности сооружения таких типов забоев. Однако дебиты полученных полостей соизмеримы с дебитами скважин с фильтрами, а чаще уступают им. В процессе проведения опытов наблюдались неоднократные обрушения полостей, предсказать которые заранее не удавалось. Это все свидетельствует о том, что, прежде чем рекомендовать данную конструкцию забоя к внедрению в практику, следует четко отработать технологию их сооружения с целью выяснения условий сооружения и эксплуатации каверны, при которых гарантирована устойчивость конструкции от обрушения.

Для обеспечения захвата воды снизу вверх Ю.В. Архидьяконским разработаны несколько типов водозахватных устройств. Наиболее простое заключается в спуске до интервала на 0,5–1 м выше подошвы продуктивного пласта обсадной колонны с открытым нижним торцом. В процессе работы такого устройства поток будет стремиться из любой точки пласта к подошве под заборным отверстием. Вблизи скважины поток стремится двигаться сверху вниз и по законам гидравлики будет закручиваться. В процессе формирования полости на начальном этапе из скважины будет выноситься песок. Далее, при наборе закручивающимся потоком определенной угловой скорости, выносящиеся из радиальных каналов частицы под действием центробежных сил будут смещаться и откладываться на откосах. По мере развития радиальных каналов объем вынесенных из них частиц увеличивается. Вынесенные из радиальных каналов частицы откладываются на боковой поверхности вращения полости и со временем происходит ее сужение.

Сужение поперечного сечения полости приводит к интенсификации закручивания потока, возрастанию центробежных сил и прекращению пескования скважины. Развитие радиальных каналов возможно только до тех пор, пока вынесенные частицы имеют возможность откладываться на склонах воронки. Если площадь поперечного сечения воронки уменьшается, т.е. откладывание частиц затрудняется, то в каналах образуются пробки, при которых резко снижается расход, возрастает гидравлическое сопротивление и в системе скважина – пласт возникает гидравлический удар, приводящий к обрушению развившейся полости.

В процессе развития воронки важно вовремя предотвратить вынос песка из радиальных каналов, сформированных в верхней

части полости. Гидродинамическими методами (снижение дебита скважины в сравнении с дебитом строительной откачки) предотвратить вынос песка из неравномерных по форме и водообильности каналов сложно, а тем более предохранить их от обрушения, в реальных условиях это невозможно. Поэтому автором предлагается технология заполнения сформированных радиальных каналов гравием (рис. 3.2).

Заполнить каналы гравием можно только при нагнетании гравийной смеси в скважину и полном поглощении фильтрата пластом. Сформировавшиеся радиальные каналы и наиболее водообильные участки каверны выполняют функцию своеобразных пластовых дрен. При нагнетании смеси в скважину радиальные каналы характеризуются максимальной приемистостью и поглощение фильтрата в них особенно интенсивно. Фильтрационный поток по радиальным каналам в глубь пласта приводит к компактному заполнению их пространства гравием. После этого каналы сохраняют высокую проницаемость, а также предохранены от обрушения при любых режимах эксплуатации.

Для нагнетания гравийной смеси в пласт рекомендуется использовать специальное смесительное и насосное оборудование. Рациональные концентрации смесей (в зависимости от типа жидкости носителя) изменяются от 10 до 35 %.

Для обеспечения захвата потока снизу вверх можно использовать не только донные водоприемники, но и трубы с боковыми отверстиями. Очень важно, чтобы эти отверстия располагались в близлежащих к подошве интервалах пласта.

В устойчивых породах проблема выноса песка как типовая не стоит и конструкция забоя должна обеспечить получение про-

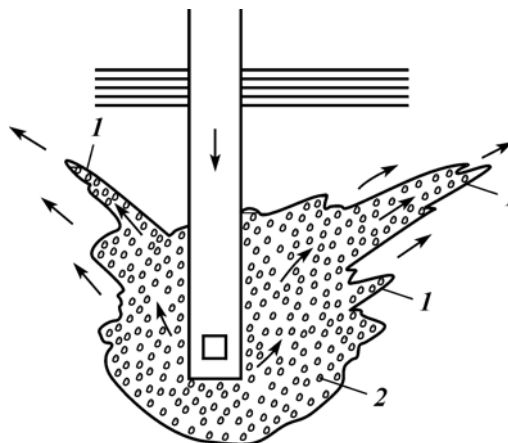


Рис. 3.2. Схема заполнения каналов (1) бесфильтровой скважины гравием (2)

ектного дебита. На рис. 3.1, в показана конструкция открытого забоя, рекомендуемая для устойчивых продуктивных пластов трещинного типа.

Вышезалегающие породы кровли закрепляются обсадной колонной. Пласт вскрывают долотом расчетного диаметра, обеспечивающего проектный дебит Q . Диаметр скважины в зоне продуктивного пласта

$$D = \alpha Q / m, \quad (3.18)$$

где α – коэффициент, характеризующий свойства пласта; m – мощность вскрытой части пласта.

Значения коэффициента α для различной степени трещиноватости пород приведены ниже.

Степень трещиноватости пород.....	Сильнотрещиноватые	Трещиноватые	Слаботрещиноватые
α	30–50	50–70	70–90

С целью улучшения проницаемости околоскважинной зоны могут быть применены разные виды кислотных, реагентных и других обработок. Положительные результаты обычно дает гидроразрыв.

При повышении давления на пласт (при гидроразрыве) естественные трещины расширяются и повышается приемистость пласта. Раскрывшиеся трещины заполняют песком или гравием во избежание их закрытия при снятии нагрузки на пласт. Применение гидроразрыва позволяет увеличить коэффициент α до 50–90.

Формула (3.18) получена эмпирическим путем на базе анализа многочисленных практических данных. Характерно, что дебит в ней прямо пропорционален диаметру скважины – это противоречит теоретическим формулам. Более существенная связь дебита от диаметра, чем это предполагается теоретически, показывает реальную возможность повышения эксплуатационных характеристик скважины. С целью снижения металлоемкости конструкции может быть рекомендовано расширение пилот-ствола в интервале продуктивного пласта из-под башмака обсадной колонны меньшего диаметра.

При бурении скважин на нефть и газ распространена конструкция забоя, предусматривающая крепление скважины в интервале продуктивного пласта обсадной колонной с последующей ее перфорацией (см. рис. 3.1, г). Указанная конструкция чаще используется в устойчивых трещиноватых породах, когда пескопроявлений можно избежать без применения специальных

фильтров. Конструкция характеризуется простотой исполнения и повышенным гидродинамическим несовершенством из-за малой скважности и глубины вскрытия пласта перфорацией. Известны методы промывки заколонного пространства с целью гидравлической сбойки отдельных перфорационных каналов, разработки каверны.

При повышенной трещиноватости рекомендуется провести гидроразрыв для предотвращения выноса твердой фазы из скважины в процессе эксплуатации. При пониженной трещиноватости пород гидроразрыв обеспечивает раскрытие естественных трещин и повышение фильтрационных свойств околоскважинной зоны.

В сильно трещиноватых и обломочных породах при относительной устойчивости ствола возможно поступление в скважину незначительного объема породы при эксплуатации. В целях предотвращения заполнения ствола скважины породой в нее устанавливают перфорированный каркас (см. рис. 3.1, *д*). Часто перфорированные каркасы используют и в устойчивых породах (см. рис. 3.1, *з*). С одной стороны, ствол с повышенной надежностью предохраняется от заполнения породой, а с другой стороны, упрощаются работы по проведению расходомерии, свабированию и других методов исследования и обработки скважины.

В неустойчивых породах, песках, гравийных отложениях для предотвращения суффозии в интервале продуктивного пласта устанавливают фильтры. Скважину обычно закрепляют до кровли продуктивного пласта обсадной колонной. Вскрывают пласт, после чего в заданный интервал устанавливают фильтровую колонну, состоящую из башмака, фильтра и надфильтровой трубы. Последняя может быть выведена на поверхность и выполнять одновременно функцию эксплуатационной колонны, а может заканчиваться пакером или сальником, раскрепленным в обсадной колонне. В последнем случае установка фильтра называется впотай и функцию эксплуатационной колонны выполняют обсадные трубы. Конструкция забоя, предусматривающая установку фильтра в интервале продуктивного пласта, показано на рис. 3.1, *е*. Диаметр фильтра определяется по формуле (3.18), а диаметр бурения принимается на 30–50 мм больше. Коэффициент α для тонкозернистых песков принимается 70÷90, для мелко- и среднезернистых $\alpha = 50÷70$, а для крупнозернистых песков и гравия $\alpha = 30÷50$.

Если продуктивный пласт сложен глинистыми, пылеватыми, тонко- и мелкозернистыми песками, то обычный фильтр не обеспечивает предупреждения выноса песка из скважины (особенно при высоких скоростях притока). В таких случаях целесообразно

между фильтром и стенками скважины формировать гравийную обсыпку. При гравийной засыпке тонкие фракции песка экранируются от фильтра гравием, не контактируют непосредственно с поверхностью отверстий и забой более устойчив к пескованию.

Помимо повышенной суффозионной устойчивости конструкция забоя с гравийной засыпкой способствует снижению гидравлического сопротивления околоскважинной зоны за счет замены низкопроницаемого пластового песка, закольматированного иногда на высокопроницаемый гравий. Традиционно для оборудования забоя с гравийным фильтром диаметр вскрытия пласта на 100–300 мм превышает диаметр для конструкции забоя без ссылки. Скважину бурят и закрепляют обсадными трубами повышенного диаметра, что усложняет процесс сооружения.

Наиболее прогрессивной считается конструкция забоя, когда диаметр скважины увеличивают специальными расширителями только в продуктивном интервале. Это исключает необходимость сооружения скважины большого диаметра с поверхности и дополнительных затрат. Конструкции забоев с гравийными фильтрами различаются по форме и размерам создаваемой каверны. Размер каверны должен определяться исходя из необходимости получения оптимальных режимов эксплуатации с учетом фильтрационных характеристик пласта, околоскважинной зоны и проектного дебита.

Ранее было установлено, что диаметр скважины существенно влияет на дебит только в зоне, где наблюдается турбулизация потока. В интервале ламинарной фильтрации дебит скважины практически не зависит от диаметра. Поэтому целесообразно разрабатывать каверну под гравийную обсыпку размера, соответствующего диаметру зоны турбулизации потока. Автором предложено техническое решение, согласно которому конструкция забоя должна предусматривать ламинарный режим фильтрации на всех элементах системы скважина – пласт, а также и в околоскважинной зоне.

Для выбора обоснованного размера каверны необходимо установить диаметр зоны турбулизации потока, который при известной производительности откачки может быть определен теоретически и экспериментально. Теоретическим путем диаметр зоны турбулизации потока определяется на базе методики изучения верхней границы применимости закона Дарси. Исследователи, несмотря на многочисленные эксперименты, так и не пришли к однозначным выводам по определению условий, которые определяют нарушение ламинарного режима фильтрации. По-видимому, это объясняется многообразием структур и свойств горных пород, их фракционного состава, используемого для опытов.

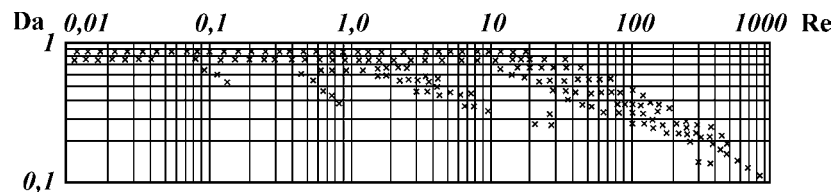


Рис. 3.3. Зависимость параметра Дарси от числа Рейнольдса (точками обозначены экспериментальные данные)

Для систематизации данных по изучению турбулизации потока в пласте В.Н. Щелкачевым был предложен безразмерный параметр Дарси, равный отношению сил вязкого трения к силе перепада давления

$$Da = \frac{V_{\mu}/k}{J/m} = \frac{V_{\mu}m}{kJ}. \quad (3.19)$$

Если справедлив закон Дарси, то при горизонтальном расположении пласта $Da = 1$. Если турбулизация потока наступила на интервале фильтрации m , то $Da < 1$. Графическая зависимость числа Рейнольдса от параметра Дарси представлена на рис. 3.3.

При построении графика (см. рис. 3.3) использовались данные опытов А.И. Абдулвагабова, которые пока считаются наиболее полными. При отклонении графиков от оси абсцисс наблюдается турбулизация потока. Существенное отклонение начинается при числах Рейнольдса больше 0,1. При $Re > 10$ почти всегда наблюдается турбулентный режим фильтрации.

В табл. 3.2 проставлены формулы по определению числа Рейнольдса при движении потока в породах пласта, критические значения числа Рейнольдса, предложенные различными исследователями, а также диаметры зон турбулизации потока при эксплуатации скважин.

Анализируя данные табл. 3.2, можно заметить, что число Рейнольдса и диаметр зоны турбулизации потока пропорциональны либо эффективному размеру частиц породы, либо корню квадратному из коэффициента проницаемости. Приведенные формулы не учитывают возможной кольматации пород в околоскважинной зоне. Проникновение инородных примесей в пласт при вскрытии снижает активную пористость пород, действительные скорости фильтрации возрастают и наступает ранняя турбулизация потока. За счет кольматации существенные отклонения от закона Дарси могут наблюдаться и в породах, в которых при обычных условиях турбулизация обычно не наблюдается.

Таблица 3.2

Параметр	Формула		
	Н.Н. Павловского	Фэнгер-Льюнс-Бернса	В.Н. Щелкачева
Re	$\frac{v d_{\text{эф}}}{(0,7a + 0,23)v}$	$\frac{v d_{\text{эф}}}{v}$	$\frac{10v\sqrt{k}}{a^{2,3}v}$
Re _{кр}	7,5–9,0	1–4	0,032–14
D _{кр}	$\frac{Q d_{\text{эф}}}{\pi m \text{Re}_{\text{кр}} (0,7a + 0,23)v}$	$\frac{Q d_{\text{эф}}}{\pi m \text{Re}_{\text{кр}} v}$	$\frac{10 Q \sqrt{k}}{\pi m \text{Re}_{\text{кр}} a^{2,3}v}$

Продолжение табл. 3.2

Параметр	Формула		
	М.Д. Миллионщикова	Ф.И. Котяхова, Г.Ф. Требина	А.И. Абдулвагабова
Re	$\frac{v\sqrt{k}}{a^{1,5}v}$	$\frac{5,76v\sqrt{k}}{a^{1,5}v}$	$\frac{12(1-a)v\sqrt{k}}{a^2v}$
Re _{кр}	0,0015–0,60	0,0035–3,4	0,019–8,1
D _{кр}	$\frac{Q_{\text{пр}}\sqrt{k}}{\pi m \text{Re}_{\text{кр}} a^{1,5}v}$	$\frac{5,7Q\sqrt{k}}{\pi m \text{Re}_{\text{кр}} a^{1,5}v}$	$\frac{12Q(1-a)\sqrt{k}}{\pi m \text{Re}_{\text{кр}} a^2v}$

Примечание. $d_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр, равный характерному диаметру частиц по Ч. Слихтеру; v – кинематический коэффициент вязкости; a – пористость пласта.

Рассмотрим пример расчета конструкции забоя с гравийной обсыпкой, воспользовавшись для этого формулами М.Д. Миллионщикова. Необходимо оборудовать водозаборную скважину в водоносном пласте с коэффициентом проницаемости $k = 1,2 \times 10^{-8} \text{ см}^2$ и активной пористостью пласта равной 0,2, которая эксплуатировалась бы со стабильным дебитом $2,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ в течение максимально возможного срока. Мощность водоносного пласта при этом 10 м.

По формуле М.Д. Миллионщикова критическая скорость фильтрации $v_{\text{кр}}$, при которой обеспечивается турбулизация потока в прифильтровой зоне в ее естественном состоянии

$$v_{\text{кр}} = \frac{va^{1,5}}{5,65\sqrt{k}} \text{Re}_{\text{кр}}, \quad (3.20)$$

где v – кинематическая вязкость жидкости, Ст; a – активная пористость, доли единиц; k – коэффициент проницаемости, см^2 , $\text{Re}_{\text{кр}}$ – критическое число Рейнольдса, определенное экспериментально. Для данных условий $\text{Re} = 0,29$,

$$v_{кр} = \frac{0,01 \cdot 0,2^{1,5} \cdot 0,29}{5,65 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8}} = 0,42 \text{ см/с.}$$

Оценим диаметр прифилтровой зоны скважины, в которой будет наблюдаться турбулизация потока,

$$D = \frac{Q}{\pi v_{пр} m a}, \quad (3.21)$$

где Q – производительность скважины, m – длина фильтра;

$$D = \frac{2,08 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10} = 0,78 \text{ м.}$$

Обычно диаметр зоны кольматации соответствует диаметру зоны турбулизации потока или немного меньше него. Поэтому при расчетах диаметра каверны по приведенным формулам кольматационные процессы можно не учитывать, так как при разработке каверн закольматированная порода полностью удаляется из скважины.

При разработке в пласте каверны расчетного диаметра и замене низкопроницаемых пластовых пород на гравий будет наблюдаться снижение гидравлического сопротивления породы за счет сведения к нулю слагаемого, пропорционального квадрату скорости фильтрации или дебита.

Размер зоны турбулизации может быть так же определен и экспериментальным путем. И.М. Гершанович разработал во ВСЕГИНГЕО метод определения диаметра зоны турбулизации потока по данным расходомерии, который позволяет избежать неточностей, наблюдающихся при теоретической оценке критического числа Рейнольдса, это обусловлено многообразием горных пород, слагающих продуктивные пласты, различием интенсивности кольматации и др.

Каверны, образующиеся в продуктивном интервале, в зависимости от условий, в которых оборудуется забой, должны иметь разную форму профиля. Наиболее проста форма каверны с равномерным диаметром ствола по длине всего продуктивного интервала (см. рис. 3.1, *ж*). Такая форма забоя может быть рекомендована при оборудовании скважины в продуктивных пластах, сложенных однородными по мощности в отношении суффозионных и фильтрационных свойств породами. Создание забоя с постоянным диаметром каверны оправдано только в тех случаях, когда наблюдается равномерный приток по мощности пласта, что наблюдается при его ограниченной мощности.

Если продуктивный интервал сложен неоднородными по фильтрационным и суффозионным свойствам породами, то создавать каверну с постоянным диаметром расширения нет смысла. В наиболее проницаемых участках интенсивность притока выше, чем в соседних, и турбулизация возникает на больших расстояниях от скважины. Кроме этого, колюматизирующий материал в наиболее проницаемых интервалах проникает на большую глубину, чем способствует возникновению в них зон турбулизации повышенных размеров.

В наименее проницаемых интервалах силы сцепления между частицами выше и поэтому опасность суффозии в них минимальна. В проницаемых участках сцепление между частицами минимально и опасность возникновения суффозии на контакте слоев пластового песка и гравия высокая. Поэтому при сооружении забоя с постоянным диаметром ствола каверны в неоднородных породах отдельные интервалы по-разному подвержены суффозии. При такой конструкции забоя велика вероятность возникновения в наиболее проницаемых и слабосцементированных интервалах пескопроявлений.

В неоднородных продуктивных интервалах оправдана конструкция забоя с гравийным фильтром с изменяющимся диаметром по мощности пласта (см. рис. 3.1, з). В более проницаемых участках с меньшими силами сцепления между частицами пластовых пород диаметр каверны увеличивается, а в менее проницаемых и более сцементированных снижается. Такая конструкция забоя создает равновесную суффозионную обстановку на стенках каверны по ее длине и снижает гидравлические потери напора из-за исключения турбулизации потока в околоскважинной зоне.

Если мощность продуктивного интервала такова, что обеспечить относительно равномерный приток по длине фильтра невозможно, то использование конструкций, изображенных на рис. 3.1, ж, з, приведет к дополнительным гидравлическим сопротивлениям и снижению дебита из-за неравномерности скоростей притока в скважину. Для снижения гидравлического сопротивления притоку выравниванием входных скоростей следует использовать конструкцию забоя, показанную на рис. 3.1, и.

Диаметр каверны увеличивается от верхней и нижней границ продуктивного интервала. Замена низкопроницаемых пород пласта на высокопроницаемый гравий сопротивление нижней части забоя снижает в сравнении с верхней и поток перераспределяется из верхних в нижние интервалы околоскважинной зоны. Традиционная эпюра входных скоростей потока в скважину, описываемая законами гиперболических синусов или тангенсов

при определенных параметрах каверны, преобразуется в линейную зависимость при постоянной скорости притока по длине всего продуктивного интервала.

Автором предложено техническое решение по созданию каверны, форма которой обеспечивает постоянные входные скорости по мощности продуктивного интервала (см. рис. 3.1, *и*). Пласт вскрывают долотом диаметра, обеспечивающего требуемую толщину обсыпки с учетом предотвращения пескования. Расширителем специальной конструкции обеспечивают создание каверны с увеличивающимся диаметром от верхней к нижней границе продуктивного интервала.

Заданный профиль каверны определяют следующим образом. Исходя из уравнения движения жидкости в фильтровой части скважины, имеем

$$dy(z) = \frac{1}{g} dv^2(z) + \frac{\lambda v^2(z)}{4gr_c} dz, \quad (3.22)$$

где $dy(z)$ – потери напора в фильтровой части скважины на участке длиной dz ; $v(z)$ – скорость потока в фильтровой части скважины в точке с координатой z ; λ – коэффициент трения; r_c – радиус скважины; g – ускорение свободного падения; z – вертикальная координата.

Интегрируя уравнение (3.22) по z при предположении линейности эпюры скоростей в фильтре, получаем понижение напора между точками с координатами z и m

$$\Delta J(z) = \int_z^m df(z) = \frac{1}{g} v(m) \left(1 - \frac{z^2}{m^2} \right) + \frac{\lambda v(m)}{12gr_cm^2} (m^3 - z^3), \quad 0 \leq z \leq m. \quad (3.23)$$

Для выполнения условия линейности эпюры скоростей в фильтре необходимо, чтобы это понижение было скомпенсировано при движении жидкости в околоскважинной зоне

$$\Delta J(z) = \frac{v(m)r_c^2}{2m} \left(\frac{1}{k_4} - \frac{1}{k_1} \right) \ln \frac{R(z)}{R_1}, \quad (3.24)$$

где k_4 – коэффициент фильтрации гравийной обсыпки; k_1 – коэффициент фильтрации пласта; $R(z)$, $R(m)$ – радиус гравийного фильтра в точке с координатами соответственно z и m .

Из выражений (3.23) и (3.24) при $v(m) = Q/\pi r_c^2$ получим $R(z) = R_0 e^0$

$$\theta = \frac{\frac{Q}{\pi r_c^2 g} \left[1 - \frac{z^2}{m^2} + \frac{\lambda}{12 r_c m^2} (m^3 - z^3) \right]}{\frac{r_c^2}{2m} \left(\frac{1}{k_4} - \frac{1}{k_1} \right)}. \quad (3.25)$$

Для примера рассмотрим параметры забоя, который необходимо создать в скважине, вскрывшей водоносный пласт и сложенный песками с коэффициентом фильтрации $k_1 = 20$ м/сут. Фильтр скважины имеет проволочную конструкцию на каркасе 89-мм труб. При заданном дебите $Q = 10$ л/с расчетная толщина обсыпки, исходя из диаметра зоны турбулизации и предупреждения пескования, составила 50 мм. Интервал установки фильтра определен в пределах 55–70 м. Для засыпки использовали гравий с коэффициентом фильтрации $k_4 = 100$ м/сут. Итак, расчетные значения параметров следующие:

$$\begin{aligned} k_1 &= 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}; \quad k_4 = 11,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}; \\ R_0 &= 0,096 \text{ м}; \quad r_c = 0,0415 \text{ м}, \quad Q = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}; \\ m &= 15 \text{ м}, \quad \lambda = 0,03, \quad g = 9,8 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

Искомый профиль каверны определили по формуле (3.25), где при заданных параметрах

$$\theta = -2,5 \cdot 10^{-4} z^3 - 4,2 \cdot 10^{-4} z^2 + 1,8.$$

В результате расчетов получены характерные значения, приведенные ниже.

$z, \text{ м} \dots\dots\dots$	0	2	5	10	
$R(z), \text{ м} \dots\dots\dots$	0,58	0,57	0,5	0,3	
$z, \text{ м} \dots\dots\dots$	11	12	13	14	15
$R(z), \text{ м} \dots\dots\dots$	0,25	0,2	0,16	0,12	0,096

Итак, с целью обеспечения постоянных скоростей притока в скважину на контакте с гравийной обсыпкой диаметр каверны следует увеличить с 0,096 до 0,58 м соответственно у верхней и нижней границы продуктивного интервала. Внедрение новых конструкций забоев (см. рис. 3.1), позволило увеличить производительности скважин в среднем на 46–85 % за счет снижения гидравлического сопротивления при выравнивании скоростей притока.

Если производительность скважины обеспечена и основная проблема – предотвращение выноса песка, то целесообразно применять конструкцию, показанную на рис. 3.1, к. Неравномерность скоростей притока в скважину при такой конструкции воз-

растает и увеличиваются общие гидравлические сопротивления, однако на контакте пластового песка с гравием создается постоянный перепад давления по мощности продуктивного интервала. На песчаную частицу, находящуюся на стенках каверны независимо от ее положения, действует постоянная сила гидродинамического давления. Конструкция забоя с уменьшающимся диаметром (от верхней к нижней границе продуктивного интервала) создает постоянную суффозионную устойчивость забоя по длине фильтра.

Для обеспечения равномерно устойчивого забоя к пескопроявлениям профиль каверны должен совпадать с поверхностью постоянного давления в околоскважинной зоне. Расположение поверхности постоянного давления и профиля каверны можно определить теоретически и экспериментальными исследованиями.

На основе данных расходограммы можно определить поверхность постоянного давления. Перепад давления на фильтре можно найти из известной формулы истечения жидкости из затопленного отверстия

$$v = \mu n \sqrt{2gJ}, \quad (3.26)$$

где μn – гидравлический параметр; μ – коэффициент расхода, n – скважность.

Закон распределения скоростей притока подчиняется закону гиперболических косинусов

$$v = v_0 \operatorname{ch} \frac{566\mu n l}{D}, \quad (3.27)$$

где v – скорость фильтрации на высоте l от нижнего продуктивного интервала; v_0 – скорость фильтрации в нижнем сечении продуктивного интервала; D – диаметр каверны.

Приравнивая правые части уравнений (3.26) и (3.27), получаем закон распределения перепада давления по мощности продуктивного интервала

$$J(z) = \frac{1}{2g} \left(\frac{v_0}{\mu n} \right)^2 \operatorname{ch}^2 \frac{566\mu n l}{D}. \quad (3.28)$$

Для распределения скоростей по длине продуктивного интервала, подчиняющегося закону гиперболических синусов, уравнение распределения давления принимает следующий вид:

$$J(z) = \frac{1}{2g} \left(\frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\mu n \operatorname{sh} \gamma} \right)^2. \quad (3.29)$$

Равенства (3.28) и (3.29) дают хорошую сходимость в реальных условиях.

Характер изменения давления с расстоянием от скважины определяется уравнением (1.25). При ламинарном режиме фильтрации флюида, который необходимо обеспечить в прифилтровой зоне, давление в пласте по мере удаления от скважины определяется только линейным первым членом выражения (1.25). Решая совместно равенства (3.28) и (1.25), получаем формулу кривой постоянного давления, которая будет соответствовать рекомендуемому профилю каверны

$$r = r_0 e^{-\left(\frac{\pi k m v_0^2}{g(\mu n)^2 \nu \rho Q} \operatorname{ch}^2 \frac{283 \mu n l}{r_0} \right)}. \quad (3.30)$$

Для гиперкосинусоидального распределения скоростей потока

$$r = r_0 e^{\frac{\pi k m}{\nu \rho g Q} \left(\frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\mu n \operatorname{sh} \gamma} \right)}. \quad (3.31)$$

Рассмотрим пример оборудования скважины забоем, диаметр которого увеличивается от нижней и верхней границе продуктивного интервала. Данные опытов показали гиперкосинусоидальный закон распределения скоростей по длине фильтра с параметром $\gamma = 1$.

Для проведения расчетов в размерностях Q [л/с], l [м], k [м/сут], ΔJ [м], m [м] рекомендуется использовать в равенстве (1.25) переводной коэффициент 2,73. Первый член уравнения (1.25) принимает вид

$$Q = 2,73 k l \Delta J \left(\lg \frac{r}{r_0} \right)^{-1};$$

$$\frac{r}{r_0} = 10^{\frac{2,73 k l \Delta J}{Q}}; \quad r = r_0 \cdot 10^{\frac{2,73 k l \Delta J}{Q}},$$

где r_0 – радиус каверны у нижней границы продуктивного интервала, r – радиус прифилтровой зоны, на котором наблюдается такое же давление на высоте l , как и у нижней границы.

Для начальных условий при мощности пласта $m = 5$ м, коэффициенте фильтрации пород $k = 1$ м/сут и дебите воды $Q = 0,8$ л/с получим выражение для определения профиля воронки.

Результаты расчетов по формуле приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

l , мм	v , см/с	J , м	ΔJ , м	r , м	Δr , м
0,85	0,26	0,0017	0,001	0,089	0,0035
0,95	0,30	0,0039	0,0012	0,097	0,0045
1,05	0,347	0,0039	0,0017	0,097	0,007
1,15	0,405	0,0056	0,0023	0,104	0,01
1,25	0,475	0,0074	0,0026	0,114	0,012
1,35	0,57	0,0105	0,0027	0,14	0,014
1,45	0,375	0,1132			

Примечание. ΔJ , Δr – приращение соответственно длины каверны, перепада напора на стенках и радиуса поверхности постоянного давления (радиуса каверны от нижней границы продуктивного интервала); $\Delta l = 0,1$.

Для обеспечения постоянного перепада давления на частицах песка, на стенках каверны, контактирующих со слоем гравия и постоянной суффозионной устойчивости забоя по длине продуктивного интервала в рассмотренном примере на участке установки фильтра 0,85–1,45 м следует увеличить диаметр каверны с 89 до 140 мм. Создание заданного профиля каверны обеспечивается специальным инструментом при расчетных режимах обработки.

Известны конструкции забоев, которые предусматривают при опасности возникновения суффозии крепление пород в около-скважинной зоне специальными материалами (рис. 3.1, л). В продуктивный интервал закачивают специальные растворы, которые скрепляют пластовые частицы между собой, снижая вероятность их миграции в скважину при эксплуатации. Если пластовый песок не крепят при сооружении забоя данного типа, то проницаемость околоскважинной зоны резко снижается. В порах песка накапливается скрепляющий материал, снижается эффективная пористость, формируются тупиковые зоны, резко возрастают действительные скорости движения потока и гидравлические потери напора. Предложенная конструкция забоя хотя и позволяет предотвратить пескование, но требует неоправданно существенного снижения дебита. Поэтому данную конструкцию забоя рекомендуется применять в исключительных случаях, когда другие конструкции технически не осуществимы.

Более прогрессивна конструкция забоя, предусматривающая создание в неустойчивых породах специального тампонажного камня, который в продуктивных интервалах имеет пористую проницаемую структуру. Технология крепления скважин и параметры тампонажных растворов предложены М.У. Шаусмановым. Известны и другие специальные проницаемые материалы. Созданный пористый камень экранирует песок продуктивного пласта от фильтра, чем предотвращает суффозию. Материал имеет

необходимую прочность, хотя проницаемость его пока низкая, что не позволяет получить высокие дебиты.

Представленные конструкции забоев описаны применительно к типовым условиям сооружения скважин. Возможны комбинации разных типов забоев. Например, для неоднородных в фильтрационном и суффозионном отношении песков значительной мощности при высокой вероятности снижения дебита из-за неравномерности притока целесообразна комбинация конструкций забоев, показанных на рис. 3.1, *з, и*. В этом случае расширяющийся к низу забой будет иметь неравномерную форму. При разделении продуктивных интервалов слабопроницаемыми породами значительной мощности целесообразно применение многосекционных конструкций в различном сочетании забоев (см. рис. 3.1). Возможен переход во время эксплуатации с одной конструкции забоя на другую. Часто вокруг фильтра под устойчивой кровлей формируется полая воронка, аналогичная бесфильтровой конструкции.

3.2. ВСКРЫТИЕ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

При вскрытии продуктивного пласта следует минимизировать проникновение в околоскважинную зону инородных примесей, фильтрата раствора и вероятность образования на стенках скважины слабопроницаемой корки. На интенсивность кольматации влияют тип промывочной жидкости и перепад давления на пласт.

Минимальное изменение фильтрационных характеристик пласта в околоскважинной зоне наблюдается при использовании в качестве промывочной жидкости жидкость, аналогичную по свойствам пластовой, и уменьшении репрессии на пласт, а следовательно и глубины проникновения шлама и раствора.

3.2.1. ВСКРЫТИЕ ПЛАСТОВ С НОРМАЛЬНЫМ ПЛАСТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ. ВСКРЫТИЕ С ПРОМЫВКОЙ ВОДОЙ

При вскрытии водоносного пласта фильтрационные параметры пласта в околоскважинной зоне лучше всего сохраняются при использовании в качестве промывочной жидкости чистой воды.

Технология вскрытия водоносного пласта с промывкой водой внедряется ВСЕГИНГЕО начиная с 50-х гг., однако пока объемы применения этой технологии незначительны. Стремление использовать вместо воды глинистые или другие вязкие промывоч-

ные жидкости производственными организациями объясняется опасностью обрушения стенок скважины, прихватом инструмента и сложностью посадки фильтра в заданный интервал. В реальных условиях при правильно выбранной технологии в случае промывки скважины водой устойчивость стенок можно гарантировать.

Многочисленными исследованиями установлено, что устойчивость стенок скважины сохраняется, если в процессе всего цикла работ при вскрытии пласта и оборудовании скважины поддерживается репрессия на пласт не ниже 0,03–0,05 МПа. Из этого условия вытекает основное ограничение применения технологии вскрытия пластов с промывкой чистой водой – невозможность оборудования скважин при высоких пластовых давлениях, особенно при самоизливе.

В процессе промывки на пласт действуют статическая и гидродинамическая составляющие репрессии. Статическая составляющая равна произведению превышения уровня циркулирующего потока над статическим уровнем на плотность воды и ускорение свободного падения, а гидродинамическая составляющая – сумме потерь напора при движении восходящего потока в кольцевом пространстве скважины над вскрываемым интервалом и в сливной магистрали оголовка на устье. Поэтому в процессе бурения устойчивость стенки обеспечивается за счет повышенной репрессии на пласт.

Наибольшая опасность обрушения стенок при вскрытии пласта наблюдается при перерывах циркуляции, а особенно – в случае подъема или расхаживания инструмента, калибровки ствола. С целью сохранения устойчивости стенок необходимо обеспечивать превышение уровня над статическим не ниже 3–5 м вод. столба. Превышение уровня при перерывах циркуляции поддерживается доливом воды в устья в кольцевое пространство. Воду можно доливать от бурового насоса переключением трехходового крана и перепуска воды через специальный шланг к устью скважины, либо от специальной емкости самотеком. При глубоких статических уровнях возникает сложность контроля за сохранением заданного превышения уровня. В этих случаях обычно осуществляют долив воды до устья.

Перед вскрытием пласта и разбуриванием цементной пробки наработанный раствор удаляют из отстойников, которые заполняют водой. Полностью удалить глинистые и другие фракции из отстойника не удастся, поэтому образуется малоглинистый раствор с низкими структурными свойствами. Способность проникать в пласт у такого раствора примерно такая же, как у чистой воды, а содержания различных примесей достаточно для

существенной кольматации околоскважинной зоны. Исследованиями Русбурмаш установлено, что, кольматация малоглинистыми растворами – наиболее опасный вид засорения пласта, при котором интенсивность снижения фильтрационных характеристик в околоскважинной зоне выше, чем у глинистых и других вязких растворов (их параметры контролируют на поверхности).

Предпочтительнее использовать схему вскрытия пласта с отбором воды буровым насосом из специальной емкости. В этом случае исключается попадание в воду кольматантов. Для промывки удобно использовать цементируочный агрегат с двумя емкостями по 3 м³. При вскрытии на буровой необходимо обеспечить требуемый запас воды с учетом планируемого поглощения. Интенсивность поглощения определяется по приемистости скважины при репрессии на пласт 0,03–0,05 МПа, которая рассчитывается по известным формулам. Долив воды в кольцевое пространство скважины при прекращении подъема должен соответствовать расчетным значениям приемистости скважины.

Последовательность технологических операций по вскрытию пласта с промывкой водой следующая. После крепления скважины и ОЗЦ спускают инструмент и разбуривают цементную пробку и промывают чистой водой. За время разбуривания цемента естественный раствор, находящийся в инструменте, замещается на чистую воду и при вскрытии со стенками скважины в интервале водоносного пласта контактирует только вода и шлам. Перед вскрытием следует убедиться в создании достаточного запаса воды на буровой.

Циркуляционную систему для промывки монтируют в следующем порядке. При использовании для вскрытия пласта цементируочного агрегата нагнетательная магистраль насоса 9 т соединяется с вертлюгом. Вода из емкостей насосом цементируочного агрегата нагнетается через вертлюг в колонну труб и оттуда поступает на забой. Емкости агрегата пополняются по мере опорожнения из водовозок или промежуточной емкости с помощью центробежного насоса, цементируочного агрегата или бурового насоса. При перерывах циркуляции долив осуществляют в кольцевое пространство скважины из емкостей цементируочного агрегата или водовозки через сливную магистраль самотеком. Расход долива регулируют вентилем.

При наращивании инструмента и любой другой технологической операции, требующей подъема снаряда, интенсивность долива увеличивается на объем поднимаемых в единицу времени труб. При отсутствии цементируочного агрегата промывку скважины осуществляют буровым насосом, забирающим воду из водовозки, через промежуточную емкость. Жидкость доливают в

кольцевое пространство через сливную магистраль водовозки или промежуточной емкости самотеком и регулируют вентилями.

После вскрытия продуктивного интервала бурят скважину под отстойник на 3–5 м ниже нижней границы установки фильтра. После сооружения скважины до расчетной отметки инструмент извлекают. Подъем сопровождается обязательным доливом воды в кольцевое пространство.

Если интервал залегания продуктивного пласта неизвестен, то сначала бурят пилот-ствол меньшего диаметра, в котором проводят геофизические исследования. По данным опробования определяют интервал установки фильтра, после чего вскрывают пласт в последовательности, описанной выше. Далее скважину оборудуют выбранным типом забоя, устанавливают фильтр и начинают освоение. Все технологические операции, предшествующие освоению, обязательно сопровождаются доливом воды в кольцевое пространство, через устье, за исключением предусматривающих циркуляцию в скважине.

Процесс вскрытия пластов с промывкой чистой водой осложняется при наличии в разрезе глинистых пород, которые необходимо разбуривать. Обычно в кровле и подошве водоносного пласта, сложенного песками различных фракций, залегают глинистые породы, при бурении которых нарабатывается естественный раствор. Фильтрат раствора совместно с глинистым шламом проникает в околоскважинную зону пласта, снижая его проницаемость. Кольматация естественным наработанным раствором может привести к катастрофическому засорению пласта и снижению, а иногда и полному прекращению дебита. Вследствие низких структурных свойств раствора фильтрат и шлам проникает в пласт на большую глубину. Частицы глинистого шлама имеют первоначально заниженный размер по причине малого времени контакта с водой с момента разбуривания до попадания в поры пласта. С течением времени попавшие в поры пласта глинистые частицы набухают и экранируют скважину от водоносного пласта, иногда полностью.

Кольматации пласта безглинистыми частицами практически всегда можно избежать. В процессе бурения песков частицы не разрушаются, а нарушаются только связи между ними. Поэтому размер шлама обычно соответствует гранулометрическому составу разбуриваемого пласта. Исключение составляют неоднородные пески, когда в подошве продуктивного интервала залегают фракции песка, размер которых в 6 раз меньше средних фракций песков в интервале установки фильтра. В этом случае проникновения шлама избежать нельзя. Аналогичный эффект

наблюдается при нескольких продуктивных интервалах, размежеванных пропластками из тонких и пылеватых фракций.

На основании вышеизложенного можно определить радиональную область применения технологии вскрытия пластов с промывкой чистой водой.

Это разрезы, в которых исключается необходимость разбуривания глинистых пород и вероятность образования естественного раствора, а также отсутствуют пропластки, сложенные частицами размера в 6 раз меньше среднего размера частиц продуктивного интервала.

Если избежать разбуривания глинистых пород нельзя, то проникновение естественного раствора в пласт следует ограничить. Это можно сделать созданием на стенках скважины слабопроницаемой корки. В этом случае можно рекомендовать для вскрытия пласта глинистый раствор нормальных параметров. При вскрытии на стенках скважины формируется глинистая корка, предохраняющая пласт от глубокого проникновения кольматанта. Скважину бурят до расчетной глубины, после чего специальными расширителями пилот-ствол в интервале установки фильтра рекомендуется расширять, удалив при этом закольматированную зону. При расширении нет необходимости разбуривания глинистых пород, а следовательно исключается возможность наработки естественного раствора и кольматации.

Вскрытие с промывкой полимерными растворами. Большее распространение в практике находят полимерные самораспадающиеся растворы. Их суть в том, что при вскрытии пласта в начальный момент на стенках скважины формируется слабопроницаемая пленка, которая со временем или при добавлении специального реагента разрушается и удаляется из скважины при откачке.

В.М. Беляков рекомендует использовать в качестве полимерной добавки 4–5 % модифицированного крахмала, т.е. 40–50 г сухого порошка на 1 м³ воды. Для экономии реагента в нескольких случаях допускается использование 3 % водного раствора крахмала и 3 % раствора хины. Раствор имеет плотность 1000–1020 кг/м³, вязкость 20 с, водоотдачу 12 см³ за 30 мин. Если необходимо увеличить плотность раствора, то его подсаживают.

Распад структуры раствора наступает в течение 3–4 сут. Для ускорения процесса распада в раствор добавляют амилосубтилин. При добавке амилосубтилина распад структуры происходит в течение 6 ч. С целью минимизации кольматации раствор недифицированного крахмала обрабатывают каустической содой. Раствор рекомендуется готовить гидросмесителями электронного типа.

А.М. Коломеец рекомендует использовать для вскрытия водоносных пластов водогипановые растворы. Водогипановый раствор представляет собой раствор гипана-1 или гипана-0,7 в технической воде. Обычно гипан поставляется в виде 10–15 % водного раствора в бочках или цистернах.

Гипан добавляется в воду в объеме 1–5 %. При температуре +10 °С вязкость раствора изменяется от 16 до 30 с, с увеличением вязкости снижается водоотдача раствора. Ниже приведены данные относительно снижения водоотдачи водогипановых растворов в сравнении с водой [14, 22].

Условная вязкость, с.....	17	20	23	26	30
Снижение фильтрационного расхода водогипанового раствора в сравнении с водой, раз.....	2	5	7,5	10	14

Температура замерзания водогипанового раствора равна 4,5 °С. При добавке в раствор 1–5 % соли температура замерзания снижается до –7 – –9 °С. При этом вязкость раствора снижается с 28–30 до 17–21 с.

В целях исключения коагуляции водогипановые растворы нельзя обогащать глиной. В этой связи осложняется использование водогипановых растворов в разрезах, содержащих глинистые породы.

Для удаления полимерной пленки, образованной на стенках скважины при промывке водогипановых растворов, скважину следует промыть при высоких скоростях движения восходящего потока или освоить другим способом. Со временем полимерная пленка преобразуется в низкопроницаемый гель-камень, разрушить который сложно. Дебит скважины в этом случае может существенно снижаться. Отмеченная особенность водогипановых растворов преобразования полимерной пленки в непроницаемую плотную структуру используется в нефтяной и газовой промышленности для борьбы с водопритоками в процессе бурения, изоляции водоносных пластов. В этой связи использовать водогипановые растворы можно лишь в случае, если гарантируется эффективное освоение и разрушение пленки.

Имеется опыт применения для вскрытия пластов полимерных растворов на основе КМЦ. Состав раствора на 1 м³ следующий: 7–10 кг КМЦ, 80–100 кг (с добавкой мела) УЩР. Кроме этого, в качестве основных реагентов полимерных растворов используют картофельную мезгу, метас, сапропель, ломакриламид и др. Вследствие повышенных структурных свойств полимерные растворы характеризуются высокой выносной способностью и позволяют очистить ствол скважины от шлама даже при больших диаметрах ствола.

3.2.2. ВСКРЫТИЕ НИЗКОНАПОРНЫХ ПЛАСТОВ

Вскрытие пласта с низкими давлениями (даже при использовании прогрессивных промывочных жидкостей) существенно осложняется. При циркуляции возникают большие перепады давления на пласт, что вызывает нарушение его естественной структуры, полное поглощение промывочной жидкости. При катастрофическом поглощении промывочной жидкости фильтрат со шламом и другими примесями проникает на такую глубину, откуда извлечь его при освоении невозможно.

Для вскрытия низконапорных пластов рекомендуется использовать технологию бурения при сбалансированном давлении с газожидкостными смесями. Технология бурения при этом помимо повышенного качества вскрытия пласта (за счет сбалансированного давления в стволе скважины и пласте) позволяет увеличить скорость бурения за счет интенсификации очистки забоя. При малых скоростях потока, низкой выносной способности очистных агентов, значительный объем шлама не выносится на поверхность, а многократно перемалывается и переизмельчается на забое. Поэтому большая часть энергии используется не на разрушение забоя, а на перемалывание и измельчение шлама.

Рост скорости потока, выносящего шлам, позволяет увеличить механическую скорость бурения при обратной промывке в 2–4 раза, а при гидротранспорте керна – на порядок. Применение способов, обеспечивающих высокие скорости восходящего потока, не всегда возможно, например при глубинах скважины более 200 м, отсутствии специального инструмента и т.д. Увеличить механическую скорость бурения можно не только за счет повышения скорости восходящего потока, но и увеличением несущей способности очистного агента. Обычно увеличить несущую способность очистного агента стремятся за счет повышения вязкости, удельного веса и укрепления структурных свойств раствора. Такой путь повышения несущей способности очистного агента не нашел широкого применения по двум причинам.

Первая причина заключается в увеличении дифференциального давления на забой и на разрушаемую породу при использовании утяжеленных растворов с выраженными структурными свойствами, и как следствие – в снижении интенсивности разрушения породы и механической скорости бурения. Обычно применение утяжеленных растворов, имеющих повышенную выносную способность, приводит к снижению механической скорости в сравнении с бурением с промывкой водой или более легкими растворами. Вторая причина – необратимая коагуляция

водоносного пласта, снижение проницаемости прифилътовой зоны и эксплуатационных характеристик скважин. Кроме того, использование утяжеленных растворов приводит к образованию эластичной пленки на стенках скважины, наличие которой способствует снижению качества цементирования обсадных колонн, возникновению межпластовых перетоков и угрозы окружающей среде.

Наиболее прогрессивное направление в области совершенствования промывки скважины – разработка рецептур газожидкостных смесей и технологии их приготовления. Газожидкостные смеси, с одной стороны, имеют высокую несущую способность, обычно в 8–9 раз превышающую выносную способность аналогичного объема воды, а с другой стороны, не создают избыточное дифференциальное давление на забой, что обуславливает ускоренное разрушение породы и своевременное удаление ее из скважины.

При эксплуатации месторождения подземных вод происходит сработка уровней и все большее число скважин вскрывают низконапорные пласты. Проходка скважин в таких условиях может быть эффективна только при обеспечении баланса давления в системе скважина – пласт, т.е. сбалансированном, уравновешенном давлении. Создание сбалансированного давления в системе скважина – пласт при бурении неартезианских скважин (несамоизливающихся) возможно при использовании облегченных газожидкостных очистных агентов. Баланс давления на стенках скважины позволяет поддерживать их в устойчивом состоянии и предотвратить поглощения фильтрата раствора.

Предупреждение поглощения фильтрата раствора при применении газожидкостных очистных агентов позволяет достичь следующих преимуществ при бурении:

- обеспечение возможности применения вращательного способа бурения с промывкой в поглощающих разрезах;

- своевременный вынос выбуренной породы по всему стволу скважины, увеличение скорости бурения;

- минимизация набухания глинистых пород при проникновении фильтрата, предупреждение затяжек инструмента, исключение необходимости калибровки ствола скважины;

- минимизация кольматации водоносного пласта, улучшение фильтрационных свойств околоскважинной зоны, повышение эксплуатационных характеристик скважин;

- упрощение конструкции скважин частичным исключением промежуточных колонн для перекрытия поглощающих интервалов;

- экономия воды, реагентов и энергии;

уменьшение загрязнения разреза при бурении, предупредительные мероприятия по охране окружающей среды.

При уравновешенном давлении стенки скважины поддерживаются в устойчивом положении, что обуславливает преимущества применения газожидкостных очистных агентов при бурении;

предупреждение сальникообразования, прихватов инструмента обрывов труб и других видов аварий;

предотвращение повышения давления в нагнетательной магистрали, прессования насоса, интенсификации поглощения и потери циркуляции;

повышение скорости бурения исключением повторного измельчения обрушенных пород;

упрощение конструкции скважины частичным исключением промежуточных обсадных колонн, используемых для перекрытия интервалов обвалообразования;

минимизация межпластовых перетоков, возникающих при некачественном цементировании, которое вызвано обрушением стенок скважины эксцентричным характером установки обсадных колонн.

Анализ перечисленных преимуществ позволяет сделать вывод о том, что при бурении скважин с промывкой газожидкостными смесями может быть повышена механическая скорость бурения, снижена стоимость скважины, повышается качество строительства, удовлетворяются требования к охране окружающей среды, экономятся материалы и реагенты.

Рациональная область применения технологии определяется условиями, в которых преимущества газожидкостных очистных агентов проявляются наиболее полно. Технологию очистки скважины газожидкостными смесями рекомендуется использовать в следующих случаях.

Бурение в породах, склонных к поглощению фильтрата очистного агента.

Неудовлетворительная скорость бурения скважины.

Бурение скважин большого диаметра.

Бурение в породах, склонных к набуханию и обрушению при проникновении фильтрата.

Повышенные требования к охране окружающей среды, качеству цементирования.

Необходимость упрощения конструкции скважины, уменьшения числа промежуточных колонн.

Проведение работ в условиях отсутствия стабильного снабжения водой и реагентами.

Основные параметры газожидкостных смесей. Параметры аэрированных жидкостей выбирают для следующих условий:

бурения скважины при сбалансированном давлении;
 обеспечение требуемой несущей способности раствора при заданной производительности насосного оборудования, скорости бурения и конструкции скважины;
 экономное использование реагентов.

Основной параметр газожидкостной смеси – объемное отношение жидкой и газовой фаз. Определим это соотношение. Сбалансированное давление в процессе бурения наблюдается в случае равенства гидростатического давления столба аэрированной жидкости высотой до устья пластовому давлению. Для обеспечения стабильной устойчивости стенок скважины обычно рекомендуется проходить скважину при репрессии на пласт в пределах 0,03–0,05 МПа.

В процессе циркуляции величина требуемой репрессии на пласт обеспечивается за счет потерь напора в кольцевом пространстве скважины в интервале от забоя до устья

$$p_{\text{пл}} + \Delta p = \rho_c gH, \quad (3.32)$$

где $p_{\text{пл}}$ – пластовое давление; Δp – требуемая репрессия на пласт; ρ_c – плотность очистного агента; H – глубина скважины.

Из выражения (3.32) необходимая плотность очистного агента

$$\rho_c = \frac{p_{\text{пл}} + \Delta p}{gH}. \quad (3.33)$$

В случае вскрытия водоносных пород пластовое давление может быть выражено через глубину статического уровня. Тогда требуемая плотность очистного агента может быть определена по формуле

$$\rho_c = \frac{\rho g H_{\text{ст}} + \Delta p}{gH} = \rho \frac{H_{\text{ст}}}{H} + \frac{\Delta p}{gH}, \quad (3.34)$$

где ρ – плотность пластовой жидкости; $H_{\text{ст}}$ – высота от кровли пласта до уровня установления жидкости в скважине в статическом режиме.

Упростим выражение (3.34), приняв под необходимой репрессией величину превышения уровня в скважине ΔH

$$\rho_c = \rho \frac{H_{\text{ст}}}{H} + \rho \frac{\Delta H}{H} = \rho \frac{H_{\text{ст}} + \Delta H}{H}. \quad (3.35)$$

По выражению (3.35) определяют необходимый объем воздуха в единице объема жидкости. В случае использования аэрированной воды без утяжеляющих добавок объем воздуха в долях единицы в единичном объеме воды

$$W_{\text{в}} = 1 - \frac{H_{\text{ст}} + \Delta H}{H}. \quad (3.36)$$

По формуле (3.36) определяется необходимый объем воздуха в единице объема жидкости на поверхности, т.е. при атмосферном давлении. В скважине давление превышает атмосферное, поэтому с удалением от поверхности воздух будет сжиматься и его объем будет уменьшаться. Принимая, что объем воздуха уменьшается прямо пропорционально увеличению давления, рациональный коэффициент эжекции на поверхности можно выразить через среднее давление в стволе скважины при условии постоянства температуры жидкости в циркуляционной системе.

$$\bar{W}_{\text{в}} = W_{\text{в}} \frac{\bar{p}_{\text{скв}}}{p_{\text{ат}}}, \quad (3.37)$$

где $W_{\text{в}}$ – объем воздуха, необходимый для эжекции в жидкость на поверхности в нагнетательной магистрали; $\bar{p}_{\text{скв}}$ – среднее давление в стволе скважины; $p_{\text{ат}}$ – атмосферное давление.

Подставляя в уравнение (3.37) величину среднего давления в стволе скважины, получаем

$$\bar{W}_{\text{в}} = W_{\text{в}} \frac{\rho_{\text{с}} g H}{10 \rho g} = 0,1 W_{\text{в}} H \frac{\rho_{\text{с}}}{\rho}. \quad (3.38)$$

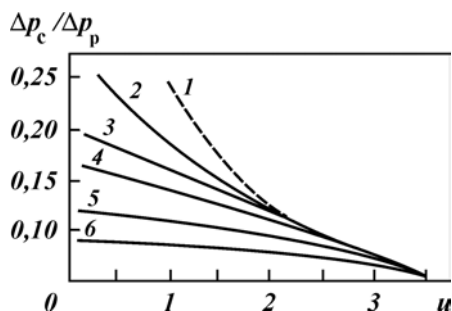
Преобразуя равенство (3.38) с учетом выражения (3.36), получаем уравнение для определения необходимой эжекции потока на поверхности

$$\bar{W}_{\text{в}} = 0,1 \left(1 - \frac{H_{\text{ст}} + \Delta H}{H} \right) H. \quad (3.39)$$

Коэффициент эжекции можно определить через параметры струйного аппарата и режимы закачки. На рис. 3.4 представлены типовые графики зависимости коэффициента эжекции от отношения перепадов давления между рабочей магистралью и камерой эжекции $\Delta p_{\text{с}}$ и между нагнетательной магистралью перед соплом и камерой эжекции $\Delta p_{\text{р}}$ для различных отношений площадей камеры смещения и сопла Δf . Чем больше отношение площадей камеры смещения и сопла, тем выше степень сжатия струи и больше коэффициент эжекции. Регулировать объем воздуха, подсасываемого в струйный аппарат, можно в пределах от 0 до 3,5 объемного расхода рабочей жидкости (см. рис. 3.4).

Если необходимо приготовить смесь с газожидкостным отношением больше чем 3,5, то в качестве рабочей жидкости в

Рис. 3.4. Зависимость соотношения перепадов давления между рабочей магистралью и камерой эжекции Δp_c и между нагнетательной магистралью перед соплом и камерой эжекции Δp_p от коэффициента эжекции и для различных отношений площадей камеры смешения и сопла Δf :
 1 – расчетная кривая; 2 – 6,5;
 3 – 8,5; 4 – 9,8; 5 – 3,8; 6 – 18,8



струйном аппарате используют воздух, а в качестве эжектируемой среды – воду и реагенты.

Следующим важным параметром газожидкостной смеси считается ее несущая способность. Несущая способность смеси обусловлена ее статическим и динамическим сопротивлением сдвигу, которые определяются на стандартных ротационных вискозиметрах. Необходимое значение сопротивления сдвигу смеси находится из условия выноса частиц шлама, образующихся при разрушении забоя.

Частица будет находиться во взвешенном состоянии, если ее вес уравновешивается силами сопротивления смеси

$$G = \tau S_4, \quad (3.40)$$

где G – вес частицы, τ – касательные напряжения на поверхности частицы площадью S_4 .

При сферичной форме частицы ее вес

$$G = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_\tau - \rho), \quad (3.41)$$

где d – диаметр частицы, ρ_τ , ρ – плотность соответственно шлама и смеси.

Поверхность частицы шлама

$$S_n = \pi d^2. \quad (3.42)$$

Приравняв выражения (3.40) и (3.41) и подставив в равенства (3.41) и (3.42), получим уравнение для определения необходимых величин касательных напряжений на поверхности частицы

$$\tau = \frac{d(\rho_\tau - \rho)}{6}. \quad (3.43)$$

Установлено, что величина касательных напряжений τ находится в прямолинейной зависимости от статического напряжения сдвига θ и выражается произведением

$$\tau\theta m, \quad (3.44)$$

где m – коэффициент, зависящий от формы и размеров частицы (для шарообразных частиц $m = 1,6 \div 2,5$ при уменьшении их размеров от 40 до 2 мм).

С увеличением размера частицы коэффициент m уменьшается. При отклонении формы частицы от сферической коэффициент m также уменьшается.

Максимальный диаметр частиц, выносящихся смесью

$$d = \frac{6m\theta}{\rho_m - \rho}. \quad (3.45)$$

В практике обычно при выборе типа смеси важно определить статическое напряжение исходя из характерного размера частиц образующегося шлама d , зависящего от типа породообразующего инструмента, режимов бурения, типа пород и др.

Требуемое статическое напряжение сдвига смеси θ определяется по формуле

$$\theta = \frac{d(\rho_m - \rho)}{6m}. \quad (3.46)$$

Величина статического напряжения сдвига смеси θ регулируется введением специализированных добавок.

Важными параметрами газожидкостной смеси считаются также ее состав и типы используемых реагентов. Повышение несущей способности смеси достигается за счет укрепления структурных свойств. Наиболее интенсивно образуются структурные связи с газожидкостной смесью при добавке поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Добавки ПАВ могут повысить несущую способность смеси в 8–9 раз. Добавки ПАВ к жидкой фазе смеси составляют 0,1–2 % по объему, а в редких случаях достигают 5 % (например при вскрытии водоносного пласта). Наиболее часто в качестве ПАВ используют реагенты ОП-7, ОП-10, УФЭ и сульфанол.

Повышению несущих свойств смеси способствуют добавки полимеров в объеме 1–2 %. В качестве полимеров используют крахмал, декстрин, полиакриламид (ПАА), гидролизированный полиакриламид РС-2, гидролизированный полиакрилонитрил (гипан), реагенты К-4, К-6, К-9, метас, акриловый сополимер М-14. Образованию структурных свойств раствора способствуют добавки в

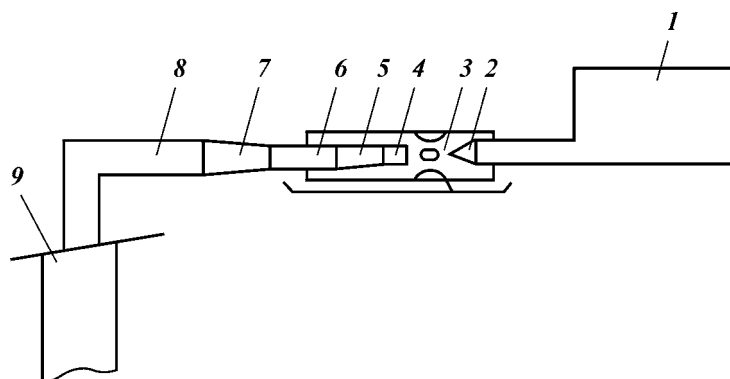


Рис. 3.5. Принципиальная схема бескомпрессорной аэрации:
 1 – насос; 2 – сопло; 3 – эжекционная камера; 4 – рабочая камера; 5 – диффузор;
 6 – камера смещения; 7 – конфузор; 8 – нагнетательная магистраль; 9 – скважина

объеме 1–3 % карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), целлюлозы, карбофена.

С целью снижения водоотдачи смеси добавляют реагенты-стабилизаторы, к которым относятся углещелочной реагент (УЩР), торфо-щелочной реагент (ТЩР), нитрогуматные реагенты (СНГР), хромогуматные реагенты, лигнин, сульфит-спиртовая барда (ССБ) и другие добавки в объеме 1–3 %.

Приготовление аэрированной промывочной жидкости. Различают бескомпрессорную (рис. 3.5) и компрессорную (рис. 3.6)

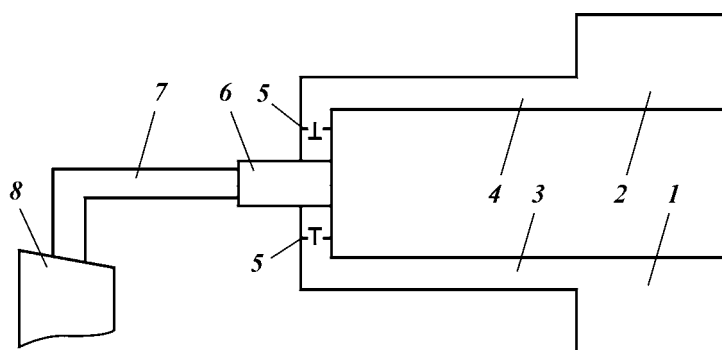


Рис. 3.6. Принципиальная схема компрессорной аэрации:
 1 – насос; 2 – компрессор; 3 – нагнетательная магистраль насоса; 4 – нагнетательная магистраль компрессора; 5 – клапан; 6 – смеситель; 7 – нагнетательная магистраль; 8 – скважина

аэрации промывочной жидкости. Обе схемы предполагают промывку скважины при малых давлениях нагнетания (0,6–0,7 МПа), что исключает возможность применения технологии промывки скважины аэрированными растворами традиционными методами с использованием стандартного оборудования при увеличении глубины скважины более 100 м и скорости восходящего потока более 0,5 м/с. Обычные схемы не обеспечивают требуемого давления и в начальный период циркуляции, когда требуется продавить значительный столб жидкости в кольцевом пространстве.

С целью обеспечения продавки жидкости в начальный момент циркуляции автором предлагается схема обвязки водоструйного насоса (струйного смесителя) с обводным каналом (рис. 3.7). В начальный момент обеспечения циркуляции жидкость подается с помощью регулировки кранов 3 по обводному каналу, минуя струйный смеситель в скважину. Аэрации в этом случае не происходит. После восстановления циркуляции переключают краны 3 и обеспечивают прохождение жидкости, минуя обводной канал через струйный смеситель. За счет высоких скоростей истечения струи из сопла смесителя создается вакуум в камере эжекции и воздух подается в нагнетательную магистраль. Объем подсасываемого воздуха регулируется за счет изменения расхода жидкости через сопло эжекторного смесителя. С ростом скорости истечения струи через насадку увеличиваются высота всасывания насоса (вакуум) и объем подсасываемого воздуха. Объем воздуха пропорционален квадрату скорости истечения струи жидкости.

Схема обвязки струйного смесителя с обводным каналом

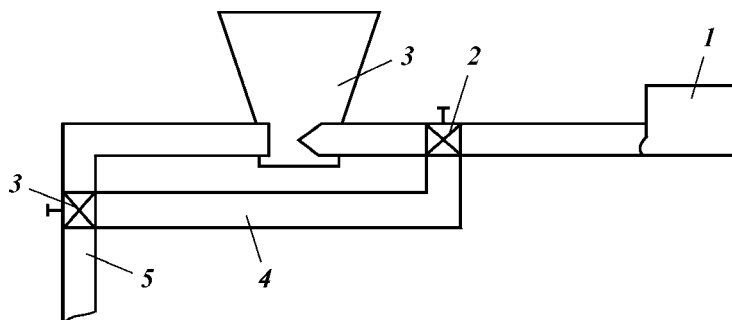


Рис. 3.7. Схема обвязки струйного смесителя с обводным каналом:
1 – насос; 2 – трехходовой кран; 3 – струйный смеситель; 4 – обводная магистраль; 5 – скважина

проста и удобна в использовании. Вместе с тем она имеет следующие существенные недостатки:

отсутствие аэрации в начальный момент продавки, что может вызвать сильные поглощения и кольматацию пласта;

прерывистая подача воздуха в нагнетательную магистраль, обусловленная изменением гидравлического сопротивления циркуляции в скважине в процессе бурения;

потеря циркуляции при обрушении стенок скважины и, как следствие, прихват инструмента и обрыв труб;

необходимость ручного регулирования кранов 3 и направления движения потока;

сложность герметизации обводного канала при использовании стандартных трехходовых кранов и рекомендуемых перепадов давления на сопле эжекторного смесителя 1–1,5 МПа.

С целью обеспечения стабильной работы струйного смесителя автором предлагается конструкция аппарата с регулируемым размером сопла, что позволяет при изменении условий промывки менять размер сопла и поддерживать тем самым заданный коэффициент эжекции (см. рис. 3.4). Эжекторный смеситель (рис. 3.8) можно устанавливать с обводненным каналом и без него. Сопло имеет форму кольцевой щели. Размер сопла, а следовательно сечение потока, скорость струи, высота всасывания насоса и коэффициент эжекции регулируется вращением эжекторного патрубка внутри сопла в резьбовом соединении.

С ростом сопротивления циркуляции (например при бурении мягких пород), увеличением концентрации шлама, обрушением стенок скважины патрубок 3 вкручивается внутрь сопла, увеличивая коэффициент эжекции. При уменьшении скорости бурения

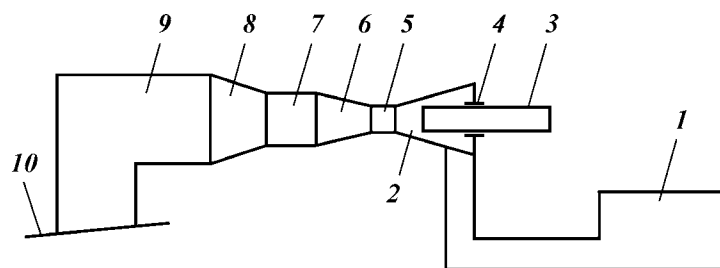


Рис. 3.8. Принципиальная схема струйного аппарата с регулируемым размером сопла:

1 – насос; 2 – сопло; 3 – всасывающий (эжекторный) патрубок; 4 – резьбовое соединение; 5 – рабочая камера; 6 – диффузор; 7 – камера смещения; 8 – конфузор; 9 – нагнетательная магистраль; 10 – скважина

патрубок 3 выкручивается из сопла и снижается объем подсосываемого воздуха. При необходимости приготовления смесей с высоким содержанием воздуха в струйном аппарате в качестве рабочего агента можно использовать воздух, а вместо эжектируемой среды – воду с добавлением реагентов. Возможность удовлетворительной работы струйного смесителя на воде и воздухе обеспечивается регулированием в широких пределах размеров сопла.

В случае установки аппарата без обводного канала с целью продавки столба жидкости в начальный момент циркуляции на торце эжекционного патрубка 3 устанавливают клапан с возможностью перекрытия всасывающего канала. Регулировка клапана в патрубке значительно проще, чем синхронная регулировка двух трехходовых кранов.

Струйный аппарат с клапанной системой. На отверстиях в эжекционной камере 1 устанавливаются патрубки, в нижней части которых выполнено посадочное конусное седло (рис. 3.9). Над седлом в патрубке имеются эжекционные отверстия, а выше отверстий – резьба. Внутри патрубков устанавливается клапан с посадочным конусом в нижней части. Клапан закрыт, если конус

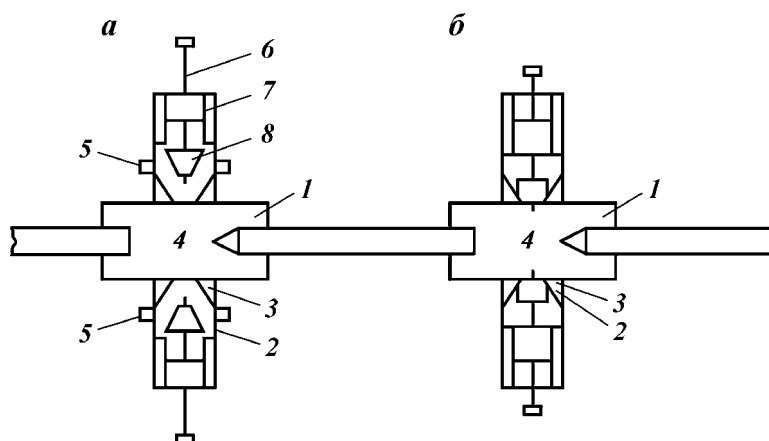


Рис. 3.9. Принципиальная схема струйного аппарата с клапанами в отверстиях и патрубках камеры смешения:

а – эжекция; *б* – прокачка порций аэрированной жидкости, обеспечение аэрации в начальный момент циркуляции: 1 – эжекционная камера; 2 – эжекционные патрубки; 3 – конусное седло эжекционного патрубка; 4 – эжекционные отверстия камеры; 5 – эжекционные отверстия патрубков; 6 – клапан; 7 – резьбовое соединение; 8 – посадочный конус клапана

клапана достигает седла патрубка. В этом случае доступ воздуха в аппарат прекращается и аэрации промывочной жидкости не происходит. При открытии клапана конус выворачивается из седла, обеспечивая доступ воздуха из эжекционных отверстий патрубка в эжекционные отверстия напора и в нагнетательную магистраль.

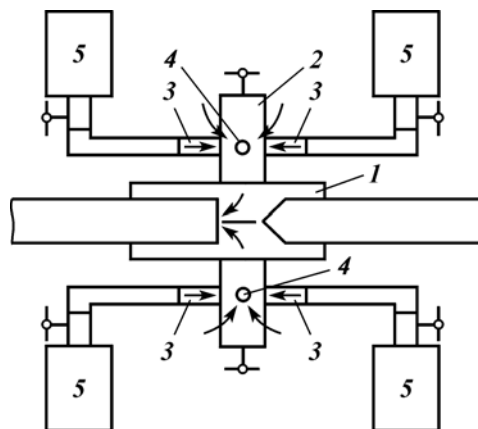
Преимуществом клапанной системы в струйном аппарате является возможность регулирования объема подсосываемого воздуха не только путем изменения расхода рабочей жидкости или воздуха, но и высотой подъема клапанов в эжекционных патрубках.

Приготовление многокомпонентной смеси. Использование клапанной системы позволяет приготавливать многокомпонентные газожидкостные смеси различной концентрации (рис. 3.10).

В эжекционные отверстия патрубков вставляются и закрепляются штуцера, которые шлангами соединяются с емкостями для реагентов, используемых для приготовления многокомпонентной смеси. Расход каждого реагента регулируется вентилем, который устанавливается на отверстия емкости для его хранения. При открытом клапане через отверстия в эжекционной камере в нагнетательную магистраль поступает вместе с воздухом требуемое количество реагента и готовится смесь с заданными параметрами. Число отверстий в эжекционных патрубках выбирается, исходя из количества реагентов и необходимого объема подсосываемого воздуха.

В начальный момент циркуляции клапаны закрыты и доступа воздуха и реагентов в поток рабочей жидкости нет. По мере восстановления циркуляции при прокачке скважины рабочей жид-

Рис. 3.10. Принципиальная схема приготовления многокомпонентной газожидкостной смеси с помощью системы клапанов в эжекционных патрубках смесителя: 1 – эжекционная камера; 2 – эжекционный патрубок; 3 – штуцер эжекционных отверстий патрубка; 4 – эжекционные отверстия патрубка для подсоса воздуха; 5 – емкости для реагентов первого, второго, третьего и четвертого типов



костью клапана открываются и начинается процесс приготовления газожидкостной смеси заданных параметров. Величина подсоса может регулироваться не только расходом рабочей жидкости и высотой подъема клапана, но и вентилем на емкостях для хранения реагента.

Наиболее существенный недостаток схемы аэрации промывочной жидкости с клапанной системой – ручная регулировка, что в некоторых случаях осложняет процесс, приводит к прерывистой циркуляции и дискретному подсосу воздуха и реагентов, удорожанию работ.

Автоматическое регулирование эжекции в струйный аппарат. Для условий, в которых происходит очень быстрое и частое изменение давления в циркуляционной системе скважины, предлагается устройство для автоматического регулирования подсоса воздуха и реагентов в рабочую жидкость с помощью распределителей. Использование последних в комбинации со стандартным струйным смесителем позволяет впервые в практике обеспечить приготовление газожидкостных смесей и их закачку в скважину при больших давлениях без применения дожимных устройств.

В зависимости от условий работы могут применяться два типа распределителей. При давлениях закачки более 0,4 МПа рекомендуется пружинный распределитель, а при давлениях менее 0,4 МПа – беспружинный.

Распределитель пружинного типа (рис. 3.11) работает в следующем порядке. При устойчивой работе струйного аппарата создается перепад давления между нагнетательной магистралью и камерой эжекции. Давление, развиваемое струйным аппаратом, т.е. давление в нагнетательной магистрали, составляет 0,3–0,7 МПа, а вакуум в камере эжекции 0,05–0,08 МПа. В этой связи перепад давления на струйном аппарате при нормальной работе составляет 0,35–0,7 МПа. Если в циркуляционной системе скважины возрастает сопротивление или на начальном этапе промывки при продавке столба в жидкости струйный аппарат не развивает требуемого давления, то давление в нагнетательной линии магистрали и камере эжекции выравнивается, стабильная работа аппарата прекращается и он «захлебывается».

Эффект возникновения перепада давления между нагнетательной линией магистрали и камерой эжекции при нормальной работе струйного аппарата и отсутствие такого перепада при дестабилизации работы используется для автоматического открытия и закрытия отверстий, подсоса и реагентов. При нормальной работе аппарата отверстия для подсоса воздуха и реагентов открываются из-за перепада давления между нагнетательной линией

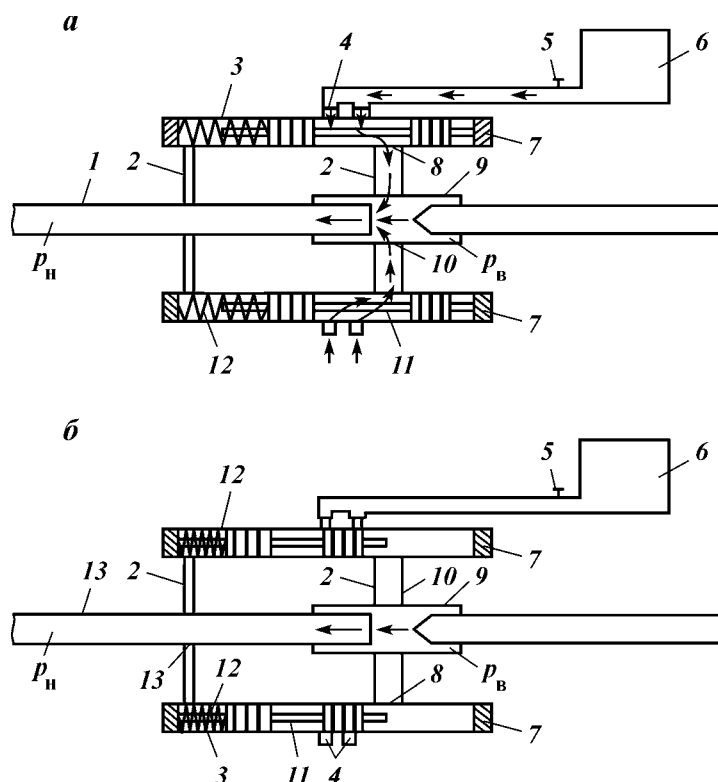


Рис. 3.11. Принципиальная схема приготовления аэрированной жидкости при помощи автоматического распределителя пружинного тела:
 а – эжекция рабочего потока ($p_n \gg p_v$); б – прокачка эжектируемой порции смеси $p_n \approx p_v$; 1 – нагнетательная магистраль; 2 – обвязка струйного аппарата и распределителя; 3 – распределитель пружинного типа; 4 – входное отверстие распределителя; 5 – вентиль; 6 – емкость для реагента; 7 – заглушки распределителя; 8 – отверстия распределителя; 9 – камера эжекции; 10 – отверстия в камере эжекции; 11 – поршень распределителя; 12 – пружина; 13 – отверстия в нагнетательной магистрали после струйного смесителя; p_n и p_v – давление соответственно в нагнетательной магистрали и камере эжекции

магистральной и камерой эжекции, а при дестабилизации – закрываются.

В нагнетательной линии магистрали после конфузора, т.е. в интервале полной стабилизации, давления выполняются отверстия 5, которые посредством шланга или трубки соединяются с отверстием в корпусе распределителя 2. Отверстия 4 в камере эжекции также соединяются с отверстием 10 распределителя

шлангом или трубкой. Распределитель снабжен входным отверстием 13, которое может соединяться с отверстием 10 и через шланг и отверстие 4 с камерой эжекции при поддержании на распределителе требуемого перепада давления, соответствующего перепаду давления между нагнетательной магистралью струйного аппарата и камерой эжекции. Внутри распределителя установлен подпружинный поршень 7, который в зависимости от величины перепада давления может перемещаться. При стабильной работе струйного аппарата пружина 9 сжимается, и отверстия 13 и 10 распределителя соединяются и осуществляется подсос в поток рабочего агента воздуха или реагентов. При дестабилизации работы аппарата, перепад давления на распределителе уменьшается, поршень под действием силы пружины перемещается, изолирует отверстия 13 и 10, предотвращает подсос воздуха и реагентов, обеспечивает прокачку порции аэрированной жидкости и быструю стабилизацию работы аппарата.

Важным моментом считается правильный подбор пружины распределителя. Сила упругости пружины находится из закона Гука

$$F_{\text{упр}} = -ky, \quad (3.47)$$

где k – коэффициент упругости пружины; y – величина сжатия пружины.

Пружина должна сжиматься и обеспечивать открытие отверстий, через которые в рабочий поток подсасываются воздух и реагенты при расчетном перепаде давления на струйном аппарате Δp . Сила перепада давления на поршень

$$F_d = 0,785 \Delta p d^2, \quad (3.48)$$

где d – диаметр поршня.

Приравнявая выражения (3.47) и (3.48), находят необходимую упругость пружины, исходя из конструктивных особенностей распределителя (d , y) и режимов приготовления (Δp)

$$k = \frac{0,785 \Delta p d^2}{x}. \quad (3.49)$$

Рекомендуемая величина перепада давления на струйном аппарате и распределителя – это $\Delta p = 0,3 \div 0,5$ МПа. Эффективность приготовления очистного агента зависит от правильного соотношения величины Δp и потерь напора в скважине при циркуляции. В оптимальном случае рациональный перепад

давления на распределителе соответствует потерям напора ΔH при циркуляции в скважине

$$\Delta p = \Delta H. \quad (3.50)$$

Потери напора в скважине изменяются по мере увеличения глубины скважины и поэтому в процессе бурения перепад давления на распределителе должен увеличиваться. Это обеспечивается поджатием пружины 9 распределителей по мере углубки при завинчивании пробок 8.

Число распределителей, устанавливаемых на струйном аппарате, зависит от числа реагентов, которые используют для приготовления очистного агента. Интенсивность поступления реагента обеспечивается регулировкой вентилей 12 на выходе из емкостей 11.

Распределитель пружинного типа рекомендуется использовать при потерях напора в циркуляционной системе скважины близких или больших максимально возможным значениям давления нагнетания струйного аппарата при устойчивой стабильной работе, т.е. при давлениях более 0,4 МПа. При меньших давлениях, т.е. при бурении неглубоких скважин или на начальном этапе проходки глубоких скважин, не происходит частого чередования стабилизированного и дестабилизированного режимов работы струйного аппарата.

В этом случае рекомендуется использовать распределитель беспружинного типа (рис. 3.12). Отверстия 8 в камере эжекции 10 и отверстия 2 в нагнетательной 1 магистрали после струйного смесителя соединяются между собой с помощью распределителя 4 и обвязки 11. Внутри корпуса распределителя 4 установлен поршень 5, который может перемещаться вдоль оси симметрии в пределах величины хода. В корпусе распределителя имеются отверстия, через которые в зависимости от положения поршня 5 эжектируемый поток может либо поступать, либо не поступать в камеру 10 эжекции и оттуда в поток рабочей жидкости.

При стабильной работе струйного аппарата (рис. 3.12, а) давление нагнетания p_4 значительно превышает давление в камере эжекции $p_в$. На поршень 5 действует сила, смещающая его в крайнее правое положение до совмещения штока с заглушкой меньшего диаметра, при котором отверстия остаются открытыми и происходит эжекция. Сила, действующая на поршень при стабильной работе, определяется из выражения

$$F_c = 0,785 p_n d_{\max}^2 + 0,785 p_в (d_{\max}^2 - d_{\min}^2), \quad (3.51)$$

где d_{\max} , d_{\min} – диаметр соответственно большого уплотнения и малого уплотнения поршня.

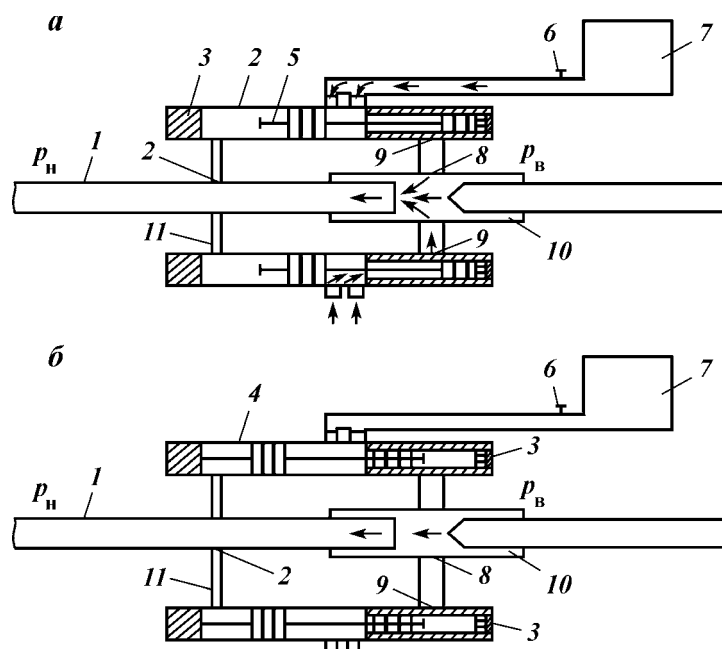


Рис. 3.12. Принципиальная схема приготовления аэрированной жидкости при помощи автоматического распределителя беспружинного типа:

a – стабильная работа, эжекция рабочего потока ($p_n \gg p_v$); *б* – дестабилизация работы, прокачка эжектируемой порции смеси ($p_n \approx p_v$); 1 – нагнетательная магистраль; 2 – отверстия в нагнетательной магистрали после струйного смесителя; 3 – заглушки распределителя; 4 – автоматический распределитель беспружинного типа; 5 – поршень распределителя; 6 – вентиль; 7 – емкость для реагента; 8 – отверстия в камере эжекции; 9 – отверстие распределителя; 10 – камера эжекции; 11 – обвязка струйного аппарата и распределителя

Знак плюс в равенстве (3.51) обусловлен отрицательным значением давления в камере эжекции при стабильной работе аппарата. Как правило, давление нагнетания струйного аппарата p_n изменяется от 0,3 до 0,7 МПа, а давление в камере эжекции p_v от –0,05 до –0,08 МПа.

В случае дестабилизации работы струйного аппарата, например при резком увеличении гидравлического сопротивления циркуляционному потоку в скважине, он «захлебывается», давление в нагнетательной магистрали p_n резко снижается, а давление в камере эжекции p_v наоборот увеличивается, причем значения p_n и p_v выравниваются (рис. 3.12, б).

На поршень действует сила, смещающая его в крайнее левое положение до контакта штока с заглушкой большего диаметра

$$F_d = 0,785 \Delta p (d_{\max}^2 - d_{\min}^2), \quad (3.52)$$

где Δp – перепад давления между нагнетательной магистралью и камерой эжекции.

Из выражения (3.52) можно определить конструктивные параметры распределителя, важнейшие из которых – больший d_{\max} и меньший d_{\min} диаметры уплотнения поршня. Важно определить перепад давления между нагнетательной магистралью и камерой эжекции, при котором стабильная работа струйного аппарата нарушается и происходит его «захлебывание». Это будет наблюдаться при увеличении давления в камере эжекции с отрицательных до положительных значений, поэтому условие дестабилизации работы струйного аппарата принимает вид

$$F_d = 0,785 (p_n + p_b) (d_{\max}^2 - d_{\min}^2). \quad (3.53)$$

Переход от отрицательных значений p_b к положительным происходит при $p_b = 0$, поэтому уравнение (3.53) можно упростить

$$F_d = 0,785 p_n (d_{\max}^2 - d_{\min}^2). \quad (3.54)$$

Поршень будет перемещаться, если сила F_d превышает силу сопротивления движения поршня F_c внутри распределителя с учетом коэффициента динамичности k_d и надежности k_n

$$F_d = F_c k_d k_n, \quad (3.55)$$

где $k_d = 4$, а $k_n = 1,5 \div 1,8$.

Из выражений (3.54) и (3.55) определяют геометрический параметр распределителя $T = 0,785 (d_{\max}^2 - d_{\min}^2)$

$$T = k_d k_n F_c / p_n. \quad (3.56)$$

Значения силы сопротивления перемещению поршня определяют экспериментально. Давление нагнетания на выходе из струйного смесителя в оптимальном случае должно соответствовать потере напора при циркуляции ΔH . Поэтому в реальных условиях величина геометрического параметра T распределителя определяется из выражения

$$T = k_d H_n F_c (\Delta H)^{-1}. \quad (3.57)$$

При дестабилизации работы струйного аппарата поршень распределителя перемещается в крайнее левое положение и отверстия изолируются, прекращается эжекция рабочей жидкости и порция аэрированной жидкости поступает в скважину. По мере прокачки давление в камере смещения уменьшается, а в нагнетательной магистрали увеличивается. Поршень вновь из крайнего левого положения перемещается в крайнее правое, отверстия со-

вмещаются и открывается доступ воздуха и реагентов в поток рабочей жидкости. При повторном «захлебывании» струйного аппарата поршень опять перемещается в крайнее левое положение, а отверстия изолируются друг от друга. И так далее работа струйного аппарата происходит в чередовании стабилизированного и дестабилизированного режимов, что позволяет использовать предлагаемую технологию при давлениях больших, чем развивает струйный аппарат. Принцип работы состоит из двух этапов (см. рис. 3.12). На первом этапе готовится порция аэрированной промывочной жидкости, а на втором – она прокачивается в скважину под давлением, развиваемым не струйным аппаратом, а буровым насосом.

3.2.3. ВСКРЫТИЕ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ПЛАСТОВ

При вскрытии напорных водоносных горизонтов возникают традиционные осложнения, связанные с поддержанием стенок скважины в устойчивом положении при подъеме инструмента и оборудовании водоприемной части фильтром. Как правило, при вскрытии напорных пластов применяют утяжеленные глинистые растворы, позволяющие предотвратить самоизлив и поддержать стенки скважины в устойчивом состоянии при оборудовании водоприемной части. Однако применение специальных растворов приводит к интенсивной кольтматации пласта, что не позволяет получить впоследствии планируемые эксплуатационные параметры, высокие дебиты скважины, удовлетворительные сроки эксплуатации и предупредить суффозию.

При оборудовании самоизливающихся скважин возникают сложности в случае, если напорный водоносный пласт сложен пылеватыми, тонко- или мелкозернистыми песками плавунного типа. Поддержать устойчивость стенок скважины в таких породах традиционными методами, т.е. при вскрытии пласта, расширении пилот-ствола в эксплуатационном интервале, спуске фильтровой колонны и намыве гравийного фильтра невозможно. В контакте с водой или утяжеленным глинистым раствором пластовый песок переходит во взвешенное состояние, стенки скважины оплывают к подошве водообильного пропластка, формируется рыхлая песчаная пробка, которая при установке фильтровой колонны контактирует непосредственно с нижними отверстиями фильтра, что исключает возможность заполнения интервала эксплуатации гравийным фильтром по всей мощности. При эксплуатации пластовый песок, контактирующий непосредственно с фильтром, проникает в скважину, формирует песчаную пробку, что приводит к интенсивному снижению дебита и выносу песка.

Напорные водоносные пласты, представленные пылеватыми песками (табл. 3.4) плавунного типа, характерны для некоторых районов юга Молдовы. Модуль крупности песков изменяется от 0,01 до 0,06 при преобладании значений 0,02. Приведены составы песков, которые с точки зрения предотвращения суффозии наиболее неблагоприятны из опыта мировой практики.

Водоносный пласт залегал на глубинах от 200 до 320 м и был представлен песками (см. табл. 3.3) с прослойками глин. В подошве и кровле пласта находились глины. Традиционно скважины бурили до кровли водоносного пласта и закрепляли ее 168-мм трубами с последующим цементированием. Водоносный пласт вскрывали 145-мм долотом с учетом разбуривания 3–4 м ствола в глинах под отстойник. Промывали скважину утяжеленным глинистым раствором плотностью 1100–1200 кг/м³. В скважину устанавливали проволочные или сетчатые фильтры с обратным клапаном и противоаварийным переходником в нижнем торце башмака. На поверхности герметизировали верхний торец эксплуатационной колонны заглушкой с замком буровых труб, который соединяли с буровым насосом.

Скважину промывали через фильтрующую поверхность фильтра с расходом 0,8–1,5 л/с для создания скоростей восходящего потока 0,01–0,02 м/с. В кольцевой зазор засыпали гравий. Осваивали скважину желонированием с последующей откачкой эрлифтом. Удельный дебит скважин для глубокого интервала 280–310 м составлял 0,004–0,005 л/с, а для верхнего интервала 200–220 м – 0,04–0,05 л/с. Вынос песка превышал допустимые пределы. Со временем дебит скважины уменьшался, преимущественно после повторной остановки (пуск насоса). При изменении давления на фильтре, что наблюдается при остановке и пуске насоса, резко интенсифицировалось проникновение песка внутрь фильтровой колонны, и образовывались песчаные пробки. Сопротивление притоку резко возрастало, поэтому снижился дебит в 1,5–2 раза.

Образование песчаных пробок было вызвано неудовлетворительным подбором фильтра и технологией гравийной обсыпки. Наружный каркас фильтра на 108-мм трубе составлял 122–130 мм, а диаметр бурения – 145 мм. Кольцевой зазор гравийной обсыпки для таких фракций песка в 7–12 мм недостаточен. Кроме этого, пески плавунного типа имеют свойство образовывать сужение ствола в интервале водоносного пласта.

Образование каверны в таких условиях даже при использовании расширителей механического действия и традиционной технологии невозможно. Кавернограммы (рис. 3.13) после вскрытия пласта спустя 0,8–1,1 ч – время, необходимое для подъема инст-

Таблица 3.4

Типовые гранулометрические составы песков водоносного горизонта юга Молдовы

Частичные остатки, мм								Полные остатки, мм					Модуль крупности	Пылеватые и глинистые частицы, мм
10	5	2,5	1,25	0,63	0,31	0,14	<0,14	2,5	1,25	0,63	0,31	0,14		
—	—	—	0,08	0,12	0,12	0,92	98,69	—	0,08	0,20	0,32	1,24	0,02	31,44
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	0,12	0,08	0,16	0,20	0,44	98,92	0,12	0,20	0,36	0,56	1,0	0,02	15,16
—	—	—	0,08	0,16	0,24	1,0	98,44	—	0,08	0,24	0,48	1,48	0,02	35,8
—	—	—	0,04	0,12	0,12	0,52	99,16	—	0,04	0,16	0,28	0,80	0,01	52,56
0,22	0,14	0,14	0,14	0,15	0,72	1,47	97,37	0,14	0,28	0,43	1,15	2,62	0,05	12,1
0,17	0,51	0,20	0,23	0,15	0,87	1,74	96,8	0,20	0,43	0,58	1,45	3,19	0,06	11,64
—	—	0,12	0,16	0,19	0,84	1,67	97,0	0,12	0,28	0,48	1,31	2,98	0,05	14,01
—	—	—	—	0,04	0,28	21,12	78,54	—	—	0,04	0,32	21,44	0,22	11,24
—	—	—	0,02	0,02	0,02	1,86	98,08	—	0,02	0,04	0,06	1,92	0,02	5,14
—	—	0,04	0,1	0,14	0,16	0,32	99,2	0,04	0,14	0,28	0,44	0,76	0,02	6,94

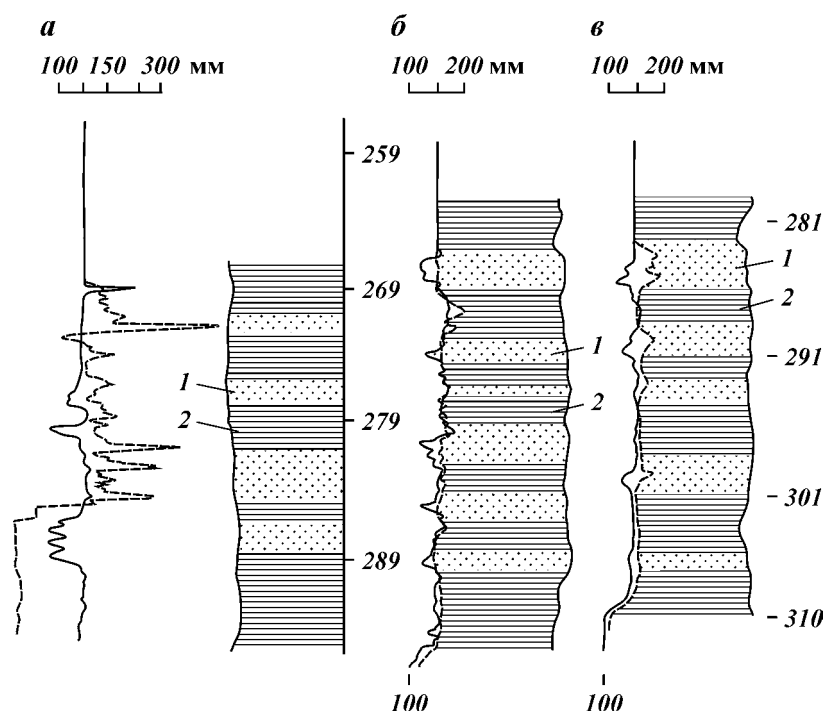


Рис. 3.13. Типовые калвернограммы до (а) и после (б, в) расширения:
1 – песок; 2 – глина

румента и спуска калверномера, стенки скважины в интервале пласта сужаются со 145 до 90–100 мм. Разумно предположить, что за 1,5–2,3 ч – время, необходимое для установки фильтровой колонны, происходит более существенное сужение ствола, препятствующее нормальному формированию гравийного фильтра и экранированию песка водоносного пласта по всей поверхности. Предупредить пескование при размерах частиц 0,01–0,02 мм без гравийной обсыпки невозможно.

Была предложена следующая последовательность технологических операций. Водоносный пласт после крепления обсадными трубами скважины до его кровли долотом вскрыли. После извлечения инструмента стенки скважины обрушились, так как пласт вскрывался с промывкой чистой водой. В скважину спустили расширитель, которым через центральную насадку промыли скважину и вынесли обрушившуюся породу водоносного пласта до забоя. Во время промывки стенки скважины поддерживались в устойчивом состоянии из-за динамической составляющей ре-

прессии на пласт. С целью исключения кольтматации пласт вскрывали с промывкой чистой водой. Расширитель приподняли от забоя до нижней границы интервала расширения и привели рабочие органы в открытое положение. Начали вращение и разработку каверны пока без осевого перемещения инструмента. Одновременно с расширением начали подавать на забой гравий. Одна часть гравия закачивалась через инструмент и расширитель непосредственно на забой, а другая часть подавалась через кольцевое пространство. Гравий надежно осаждался на забой из-за разрушения первичных структур пробок при вращении инструмента. После заполнения гравием пространства под отстойник до нижней границы интервала расширения расширитель стали приподнимать вверх, постоянно поддерживая его над уровнем намываемого фильтра, который контролировали инструментом при прекращении вращения.

Итак, разрабатываемая расширителем каверна почти сразу заполнялась гравием, что предохраняло стенки 12 скважин от обрушения. Расширитель поднимали с вращением до верхней границы установки фильтра, затем вращение прекратили, породоразрушающие органы привели в транспортное положение, а гравийный фильтр намыли на 1–2 м выше башмака обсадной колонны. В скважину засыпали гравий фракции 0,8–1,2 мм.

На поверхности смонтировали фильтровую колонну в следующем порядке: забурник винтовой, отстойник с обратным клапаном и противоаварийным переходником с винтовой спиралью, фильтр, надфильтровая труба. Использовали проволочный фильтр с трехугольной обмоткой и шириной щели 1,5 мм. При установке забурника на забой фильтровую колонну с промывкой ввинтили в гравийную обсыпку в заданный интервал. Процесс завинчивания занял несколько минут. Бурильные трубы, находящиеся внутри фильтровой колонны, отвернули от противоаварийного переходника и извлекли на поверхность. В процессе подъема инструмента через внутреннюю поверхность эксплуатационной колонны начался самоизлив чистой воды без песка и глинистых примесей.

Дебит самоизлива после внедрения новой технологии увеличился, а при откачке – в 2–3 раза при отсутствии песка. Применение описанной технологии и соответствующих технических средств позволило сформировать в интервале установки фильтра каверну заданного диаметра, обеспечить расчетную толщину гравийной обсыпки. Замена низкопроницаемого песка водоносного пласта на высокопроницаемый гравий повысила удельный дебит скважины при полном предотвращении пескования. Снижения дебита при повторном выключении (пуск насоса) не наблюдалось.