

Глава 2



СНИЖЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

Существуют методы повышения фильтрационных свойств пород, которые позволяют обработать не только околоскважинную зону, но и затрагивают более отдаленные участки, отстоящие от скважины на 50 м и более. В этом случае можно говорить об улучшении фильтрационных параметров пласта. К методам, позволяющим решить эту задачу, следует отнести гидравлический разрыв пласта, размыв пласта и электрообработку.

2.1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАЗРЫВ ПЛАСТА

Гидравлический разрыв пласта – процесс воздействия жидкости на пластовую породу под высоким давлением при ее нагнетании в пласт. В основе гидравлического разрыва лежит принцип изменения структуры породы при высоких репрессиях. Теоретически скелет горной породы будет разрушаться при воздействии на пласт, превышающем горное давление на заданной глубине. Как показала практика, гидроразрыв породы наблюдается при существенно меньших репрессиях. Это обстоятельство объясняется, во-первых, наличием начальной трещиноватости пород, разломов и неоднородностей, а во-вторых, существенно меньшими предельно допустимыми напряжениями породы на разрыв, чем на сжатие.

Гидроразрыв наблюдается в трещиноватых породах с ярко выраженными природно-пластичными свойствами. Различают направленный гидроразрыв для определенного интервала пласта и общий гидроразрыв по всей мощности пласта.

Направленный гидроразрыв проводится в перспективных областях, и, как правило, имеет поинтервальный характер. После проведения опробования скважины и выделения основных ин-

тервалов притока в нее спускают специальную компоновку снаряда, содержащую два пакера, разделенных перфорированной трубой. Инструмент фиксируют поочередно в каждом заданном интервале. Пакера приводят в рабочее положение. Качество распакеровки контролируют по наличию циркуляции в затрубном пространстве скважины, а также специальными затрубными манометрами с регулятором давления. В случае качественной герметизации выделенного интервала, который проверяется опрессовкой, начинают гидроразрыв пласта.

В скважину нагнетают жидкость, которая может иметь водную или углеводородную основу (в зависимости от типа коллектора). В случае обработки водозаборных и гидрогеологических скважин на минеральные воды и парогидротермы следует использовать в качестве жидкости воду либо соленую воду. Жидкость нагнетают через колонну бурильных труб и поверхностную обвязку цементировочными агрегатами ЦА-320М и ЦА-400. Можно использовать насосные установки высокого давления.

В начальный момент нагнетания на первой скорости работы цементировочного или насосного агрегата расход поглощения минимален, происходит резкое увеличение перепада давления на пласт, прессование. В некоторых случаях при средней или высокой начальной приемистости пласта расхода, обеспечиваемого одним цементировочным агрегатом, бывает недостаточно. Увеличение подачи из-за снижения давления нагнетания препятствует созданию требуемой репрессии на пласт. Поэтому при повышенной проницаемости пласта для гидроразрыва используют несколько спаренных цементировочных агрегатов.

Увеличение давления нагнетания приводит к проникновению жидкости в начальные пустоты, небольшие трещины и возникновению расклинивающего эффекта. При достижении давлением нагнетания предельного значения естественные трещины в пласте начинают расширяться и распространяться в глубь пласта. Расклинивающий эффект, действующий на расклиниваемую трещину, позволяет раскрыть ее при перепадах давления, существенно меньших горного давления, как это предполагается теоретически.

При раскрытии трещин расход поглощения увеличивается и снижается давление нагнетания. В начальный момент гидроразрыва (первый этап) происходит раскрытие только нескольких наиболее проницаемых трещин, через которые и растет расход поглощения. Уменьшение давления после стабилизации расхода поглощения не позволяет, как правило, обработать трещины меньшего размера, и они не участвуют в развитии процесса. При первом скачке давления обычно образуется несколько горизон-

тальных или наклонных трещин в направлении естественной трещиноватости.

На втором этапе производства работ увеличивают расход поглощения обычно за счет увеличения числа спаренных цементировочных агрегатов. Происходит повторное прессование, после чего трещины раскрываются, образуя новые ответвления, и расход поглощения увеличивается, а затем стабилизируется. При возрастании расхода поглощения давление нагнетания падает, а после стабилизации расхода стабилизируется.

Характерно, что трещины гидроразрыва образуются после формирования нескольких продольных каналов в направлении, близком к перпендикулярному направлению естественного простирания пласта. Это объясняется тем, что в вертикальной плоскости трещину формировать и расширить проще, так как для этого необходимо преодолеть усилие, пропорциональное величине горного давления, умноженной на коэффициент бокового распора, значения которого всегда меньше единицы. В этой связи при гидроразрыве формируется сетчатая структура трещин, взаимно перпендикулярных. С интенсификацией воздействия на пласт число вертикальных или восстающих трещин существенно превышает число горизонтальных трещин. Горизонтальные трещины, возникшие на первом этапе гидроразрыва, впоследствии соединяются между собой рядом вертикальных разломов.

Гидравлический разрыв пласта имеет многоцикловый характер. Поэтому возможно проведение нескольких этапов по увеличению расхода поглощения, прессованию, стабилизации расхода и давления. На каждом новом этапе формируются дополнительные структуры трещин, а старые расширяются, расчленяя естественный скелет породы продуктивного пласта и улучшая его фильтрационные свойства.

Число этапов обработки пласта зависит от планируемого удельного дебита скважины. После каждой стабилизации расхода поглощения его измеряют и определяют величину репрессии на пласт, при которой произошла очередная стабилизация. Делением расхода поглощения W_0 на величину репрессии на пласт J определяют удельную приемистость интервала обработки, т.е.

$$q_n = W_0/J. \quad (2.1)$$

Необходимо учесть, что после гидравлического разрыва пласта и снятия давления трещины частично сомкнутся и заполнятся наполнителем, что приведет к снижению их проницаемости и удельной приемистости. Учитывая, что общая приемистость увеличивается для n интервалов в n раз, можно записать

$$q_{\text{п}} = an \frac{W_0}{J}, \quad (2.2)$$

где a – коэффициент снижения проницаемости трещин после обработки; n – число интервалов гидроразрыва.

Теоретически удельная приемистость скважины соответствует ее удельному дебиту при откачке с понижением, соответствующем репрессии при наливе. Однако в реальных условиях приемистость скважины оказывается существенно меньшей, чем удельный дебит. Соотношение удельного дебита q и приемистости можно уравнивать для определенных условий с помощью понижающего коэффициента b , который определяется экспериментально, т.е.

$$q_{\text{п}} = bq. \quad (2.3)$$

Подставляя в выражение (2.2) значения, рассчитанные по формуле (2.3), получим соотношение удельной приемистости $q_{\text{п}}$ как функцию планируемого эксплуатационного дебита и двух коэффициентов a и b

$$q_{\text{п}} = \frac{W_0}{J} = \frac{bq}{an}. \quad (2.4)$$

Эксперименты показали, что отношение коэффициентов b и a в реальных условиях близко к единице. В этой связи с достаточной точностью (для практических условий) гидроразрыв можно прекращать, когда удельный расход поглощения соответствует удельному дебиту в перерасчете на мощность интервала обработки.

После формирования трещин гидроразрыва важно предотвратить или по возможности минимизировать их закрытие после окончания обработки. Для этого после раскрытия трещин до расчетного расхода поглощения в них закачивают наполнитель. Рекомендуется в качестве наполнителя использовать кварцевый однородный окатанный песок фракции 0,5–1 мм. При выборе более крупных частиц наполнителя, несмотря на их повышенную фильтрационную способность, затрудняется проникновение таких частиц в глубь трещин, и они закупоривают развившиеся структуры в непосредственной близости от скважины. После снятия давления остальная часть трещин смыкается.

Песчаную смесь закачивают в скважину насосами цементировочных агрегатов. Для улучшения работы клапанной и поршневой систем перед закачкой песка его следует тщательно просеять от крупных и пылеватых фракций, промыть, а в жидкостеноситель добавить соль или полимерные компоненты. Концен-

трация песка при использовании водяных жидкостей-носителей составляет 5–10 %, но не должна превышать 15 %. В случае использования в качестве жидкости-носителя вязкого раствора на углеводородной основе рабочая концентрация может быть увеличена до 20–30 %. Песчаную смесь приготавливают в пескосмесительных агрегатах. Готовую пульпу подают на всасывающую магистраль насоса цементирующего агрегата. При небольших объемах закачки песчаную смесь готовят в специальных емкостях и смесителях. Имеется опыт переоборудования емкостей цементирующих агрегатов для приготовления песчаной смеси.

Наиболее трудоемкой считается работа по транспортировке песка в процессе гидроразрыва в пределах буровой площадки. Автором разработан струйный пневмосмеситель с приводом от компрессора, позволяющий засасывать пески с воздухом и транспортировать его по гибкому шлангу диаметром 100 мм на расстояние до 20–25 м. Применение струйного пневмосмесителя позволяет механизировать процесс особенно при отсутствии пескосмесительных агрегатов.

В скважину при гидроразрыве закачивают обычно от 2 до 40 т песка. Сложность точного определения объемов закачки связана с невозможностью определения объемов раскрывшихся трещин. Поэтому авторами предлагается контролировать процесс закачки песка в трещины по изменению давления нагнетания. При заполнении песком отдаленных участков трещин будет происходить постепенное увеличение давления нагнетания, которое приведет к распространению и развитию новых ответвлений трещин, но уже в близлежащей к скважине зоне. Рост давления будет постепенным до тех пор, пока трещины в своем основании у стенок скважины не заполнятся песком. В этом случае сразу прекращать закачку смеси не следует, так как прессование давления и перекрытие песком уже образовавшихся трещин приведут к формированию новых продольных, а затем и сети вертикальных трещин, которые по мере развития будут заполняться наполнителем.

После закачки в трещины расчетного объема песка нагнетание прекращают. В некоторых случаях при продуктивных пластах, сложенных карбонатными породами, после гидроразрыва рекомендуется проводить кислотную обработку. В процессе гидравлического разрыва важно не допустить проникновения в пласт мелких и тонких частиц, примесей, которые в совокупности с песком и частицами пластовой породы могут образовывать слабопроницаемую смесь, повышать гидравлическое сопротивление и снижать дебит.

При высоких репрессиях процесс гидроразрыва захватывает

отдаленные участки пласта, отстающие от скважины на 80–100 м.

После обработки заданного интервала гидроразрыва инструмент промывают, пакера приводят в транспортное положение и перемещают снаряд в новую зону обработки. После чего операции по гидроразрыву повторяют. При многоинтервальном гидроразрыве трещины, образованные в различных зонах, соединяются между собой, формируя единую фильтрационную систему. Поинтервальный метод обработки пласта предпочтительнее особенно в неоднородных пластах большой мощности. При обработке одного интервала в таких условиях появляется опасность нераскрытия трещин по основной длине зоны обработки и проведения только частичного разрыва пласта, неравномерно сосредоточенного по длине продуктивного интервала.

Поинтервальный метод гидравлического разрыва пласта предусматривает многократную установку пакеров в стволе скважины и герметизацию выделенной зоны. Это может быть обеспечено только в случае или однородного устойчивого ствола при отсутствии каверн, или при конструкции забоя, предусматривающего цементацию обсадной колонны с последующей ее перфорацией.

При неоднородном и относительно неустойчивом стволе скважины с открытым забоем поинтервальный метод гидроразрыва применить быть не может. Нерационально также использовать многоинтервальный гидроразрыв при малой мощности пласта и его относительной однородности по фильтрационным свойствам. В этих случаях можно использовать упрощенную схему гидроразрыва.

В скважину на бурильных трубах спускают специальную компоновку с пакером, циркуляционным переходником и фильтром. Инструмент компонуют таким образом, чтобы при фиксации пакера выше башмака обсадной колонны фильтр располагался напротив продуктивного интервала. При достижении снарядом заданной глубины спуска пакер разжимают, проверяют качество герметизации, после чего начинают проводить гидроразрыв в последовательности, аналогичной для поинтервального метода.

После окончания работ бурильные трубы отсоединяют от пакера и извлекают на поверхность. В скважине остается фильтровая колонна, установленная «впотай» и обсыпанная высокопрочным наполнителем. Схема одноинтервального гидроразрыва рациональна в относительно неустойчивых породах, когда в процессе эксплуатации возможен вынос из трещин наполнителя и другой породы. Песчаный слой вокруг фильтра будет препят-

ствовать такому выносу, а значит будет предотвращать постепенное смыкание трещин и снижение дебита.

При правильном выполнении и существенной зоне охвата пласта обработкой гидроразрывом можно получить многократное увеличение дебита. Однако гидроразрыв применим только в продуктивных пластах, сложенных трещиноватыми породами.

2.2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАЗМЫВ ПЛАСТА

В слабосцементированных породах, песках, песчано-глинистых породах, характеризующихся пластичными свойствами, не происходит гидравлического разрыва пласта. Однако при значительных репрессиях возможен эффект, аналогичный гидравлическому разрыву. Обязательное условие обработки пласта, сложенного песчано-глинистыми слабосцементированными породами, – наличие разгрузки потока, нагнетаемого в скважину. Функцию разгрузки могут выполнять вспомогательные скважины, карьеры, зоны разломов, реки и т.д.

При нагнетании жидкости в продуктивный пласт наблюдается фильтрация потока в наиболее проницаемых интервалах. При наличии разгрузки фильтрационный поток начинает двигаться сквозь наиболее проницаемые зоны. В процессе фильтрации мелкие частицы выносятся из прифильтровой зоны, формируя в ней проницаемые участки. С увеличением давления нагнетания в скважине в области разгрузки также наблюдается рост давления, что сопровождается повышением динамического уровня.

При создании репрессии на продуктивный пласт возникает перепад давления между обрабатываемой скважиной и областью разгрузки, который приводит к возникновению фильтрации от скважины к области разгрузки. Фильтрационный поток распространяется по мощности обрабатываемого интервала неравномерно. Поток движется по пути наименьшего сопротивления и поэтому фильтрация наблюдается только через наиболее проницаемые зоны, сложенные обычно крупными фракциями. При фильтрации потока (преимущественно по ограниченным пропласткам) основная часть пласта не работает, что приводит к высоким скоростям движения потока.

Интенсивный фильтрационный поток в ограниченных пропластках способствует возникновению суффозионных явлений, транспортировке мелких фракций от скважины к области разгрузки. Наиболее проницаемые участки околоскважинной зоны и пласта промываются и освобождаются от глинистых и мелких фракций, снижающих проницаемость пропластков. При обработ-

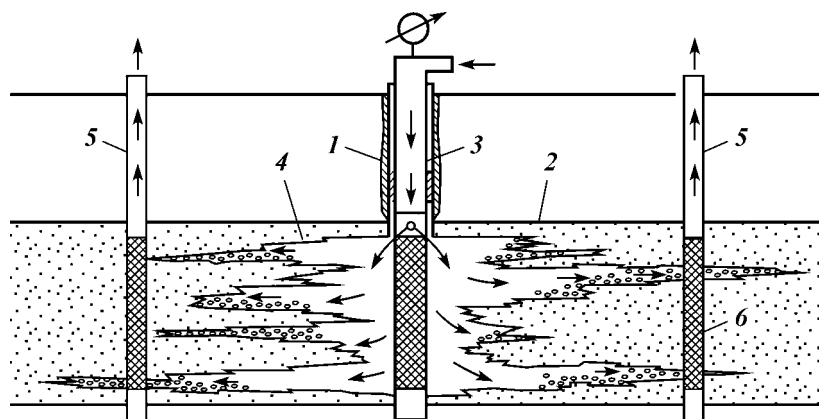


Рис. 2.1. Принципиальная схема гидравлического разрыва пласта:
 1 – эксплуатационная колонна; 2 – кровля пласта; 3 – обсадная колонна; 4 – каналы гидроразрыва; 5 – вспомогательные скважины; 6 – фильтр

ке скважин проницаемые участки пласта становятся еще более проницаемыми. Фильтрационные свойства остальных интервалов остаются приблизительно постоянными.

При обработке пласта под давлением путем нагнетания в него жидкости между скважиной и областью разгрузки формируются высокопроницаемые каналы, заполненные наиболее крупнозернистыми окатанными и промытыми частицами. Итак, в слабоцементированных породах наблюдается эффект, аналогичный гидроразрыву. Однако как такового разрыва сплошности не происходит, а наблюдается размывание каналов и трещин.

Рассмотрим технологию проведения гидроразрыва. После опробования и определения интервала залегания продуктивного интервала в скважину устанавливают фильтровую колонну, в нижней части которой имеется башмак с обратным клапаном и противоаварийным переходником. В верхней части фильтровой колонны монтируют циркуляционный переходник, над которым находится пакер. При спуске фильтра и достижении им заданного интервала пакер приводят в рабочее положение и колонну устанавливают впотай (рис. 2.1).

Через буровую колонну и циркуляционный переходник нагнетают жидкость в зафильтрованное пространство для предотвращения кольматации. Для гидроразрыва пласта рекомендуется использовать жидкость, аналогичную по свойствам пластовой. Жидкость нагнетают цементировочными агрегатами или буровыми насосами. В начальный момент нагнетания наблюдается прес-

сование насоса, после чего вся жидкость начинает поступать в пласт. По мере нагнетания давление постепенно снижается, а расход поглощения растет.

В качестве разгрузки удобно использовать соседние скважины, которые есть на всех объектах. При обработке в соседних разгрузочных скважинах повышается уровень, а иногда наблюдается фонтанирование. В зависимости от назначения разгрузочных скважин могут применяться различные схемы укладки вынесенных частиц. Если разгрузочная система представлена в виде наблюдательных скважин, то целесообразно обеспечить вынос мелких фракций непосредственно внутрь разгрузочных скважин. Для беспрепятственного поступления мелких частиц в наблюдательные скважины необходимо предусмотреть соответствующий подбор фильтров, обеспечивающих свободное прохождение частиц сквозь отверстия (при интенсивном притоке) и предотвращающих пескование (при режимных наблюдениях). В этом случае фильтры разгрузочных скважин должны работать на арочном эффекте, предусматривающем размер отверстий в несколько раз больше среднего размера миграционных частиц.

В процессе нагнетания поток выносит мелкие фракции из наиболее проницаемых интервалов пласта в разгрузочные скважины, из которых отложившаяся порода затем удаляется простым желонированием.

Если функцию разгрузки выполняют соседние эксплуатационные скважины, то допускать скопление мелких фракций в области разгрузки опасно. В этом случае необходимо, чтобы частицы откладывались в области, расположенной в центре между скважиной и разгрузкой. Интервал отложения частиц регулируется изменением расходов нагнетания. Известно, что частицы будут транспортироваться по пласту в случае поддержания определенных скоростей фильтрации. Если скорость потока недостаточна для транспортировки частицы, то она откладывается. Расход, необходимый для транспортировки частицы гидравлической крупностью со скоростью $v_{кр}$ на расстояние r от скважины

$$W_0 = 2v_{кр}\pi r m, \quad (2.5)$$

где m – суммарная мощность фильтрующих интервалов.

В процессе гидроразрыва можно прогнозировать эксплуатационный дебит скважины по методике, аналогичной гидроразрыву. По мере удаления из околоскважинной зоны и пласта мелких фракций приемистость скважины увеличивается, пласт начинает принимать все больше нагнетаемой жидкости при меньшей репрессии. При достижении удельной приемистости скважины зна-

чений проектного дебита (при эксплуатации) работы по гидро-размыву можно прекратить.

Внедрение технологии гидроразмыва позволяет существенно увеличить производительность скважины за счет создания в пласте сети высокопроницаемых трещин. Особенно эффективна эта технология при оборудовании крупных водозаборов и проведении гидроразмыва в каждой скважине. В пласте формируются системы высокопроницаемых каналов, соединяющихся между собой в различных сочетаниях и охватывающих значительную область месторождения. Создание высокопроницаемых каналов аналогично гидравлической сбойке скважин, формированию искусственных горизонтальных дрен.

Применение технологии в южных районах Молдовы при каптаже подземных вод из пылеватых глинистых пород позволило получить дебиты, превышающие расход бесфильтровых скважин, которые постоянно песковали и были непригодны к эксплуатации. После гидроразмыва через циркуляционный переходник при комбинированной циркуляции рекомендуется намыт гравийный фильтр, который обеспечит устойчивость стенок скважины при эксплуатации.

2.3. ЭЛЕКТРООБРАБОТКА

С.П. Крайковым в XIX веке была установлена возможность преобразования структуры горных пород при воздействии на них электрическим током. Первоначально исследования сводились к изучению влияния электрического тока на структуру песчано-глинистых почв с целью повышения их продуктивности. Было установлено, что песчано-глинистые породы под воздействием электрического тока преобразуются в крупнозернистую породу с ярко выраженными улучшенными фильтрационными свойствами. Влияние электрического тока при обработке продуктивных пластов начали изучать гораздо позднее в некоторых организациях, в том числе во ВСЕГИНГЕО.

Различают методы воздействия на породу постоянным и переменным электрическим током. В простейшем случае обрабатываемую скважину подключают к одному электроду, а другой заглубляют на расчетном расстоянии от обрабатываемой скважины с учетом заданного масштаба электрообработки. Между катодом и анодом возникает электрическое поле. Влияние последнего на структуру породы обусловлено электрической природой взаимодействия дисперсных частиц горной породы с поровым раствором, возникновением электрических, электрокинетических, элек-

трохимических и коагуляционных сил. Перегруппировка сил в породе сопровождается нарушением термодинамического равновесия системы твердая фаза – поровый раствор, вызванного миграцией электрических зарядов от одного электрода к другому.

Внешнее электрическое поле взаимодействует с атомами и молекулами вещества и оказывает влияние на поведение свободных и связанных зарядов. Свободные заряды под действием электрического поля перемещаются в породе и доходят до электродов, где разряжаются. Процесс миграции зарядов характеризует электропроводность. Связные заряды прочно связаны друг с другом и электрически закреплены вокруг определенных положений равновесия. В электрическом поле связные заряды могут перемещаться на очень ограниченные расстояния, превращаясь в диполи. Ориентация зарядов под воздействием электрического поля представляет собой поляризацию.

Изменение структуры породы связано с массообменом составных элементов, который происходит через границу раздела фаз. Минералы осадочных пород – дисперсные системы, количественной характеристикой которых служит удельная поверхность. С ростом дисперсности увеличивается число молекул, находящихся на разделе фаз и способных участвовать в массообмене. Поэтому наиболее дисперсные породы лучше поддаются электрообработке. Молекулы на поверхности раздела фаз характеризуются избыточной свободной энергией, имеющей электрическую природу. Дисперсные минералы при воздействии на них электрического поля могут, с одной стороны, сорбировать ионы из раствора, а с другой стороны, ионы могут поступать в раствор. Ионы твердой фазы с разрядами одного знака остаются непосредственно связанными с поверхностью кристаллической решетки, а ионы с противоположными зарядами поступают в близлежащие слои жидкости.

Поступающие в раствор ионы вещества мигрируют в электрическом поле под влиянием электроосмоса. Мигрирующие ионы за счет сил трения вовлекают в движение и поровую жидкость, возникает осмотическая фильтрация. Этот процесс характеризуется коэффициентом электроосмоса, который увеличивается с интенсификацией фильтрации и ростом дисперсности системы горных пород, достигая максимума у глинистых фракций. Процесс изменения структуры горных пород под воздействием электрического поля определяется следующим:

способностью фракций пород либо принимать, либо отдавать свои структурные элементы, в зависимости от свойств; способностью перемещения элементов отдельных фракций под влиянием электроосмоса.

Различают три стадии влияния электрического поля на структуру пород. На первой стадии в течении 5–20 ч электрообработки происходит интенсивный электроосмос, перегруппировка ионов в поровом растворе и скелете породы, начальное агрегатирование наиболее тонкодисперсных частиц. На второй стадии при более длительном пропускании электрического тока через породы процесс агрегатирования приобретает необратимый характер. После прекращения интенсивной электрообработки процесс агрегатирования продолжается, но медленнее, что представляет собой третий этап влияния электрического поля на породу.

Ю.Г. Ткаченко на основании анализа опыта работ по электро-технологии и собственных исследований во ВСЕГИНГЕО установил, что наиболее интенсивно происходит преобразование структур глинистых, песчано-глинистых пород, пылеватых фракций песков. В глинистых породах, считающихся традиционно водоупорами, за счет электрообработки возможно получить слоистую и даже трещиноватую проницаемую структуру. Процесс преобразования структуры пород зависит от расстояния между электродами и интенсивности электрообработки. При расстоянии между электродами в несколько метров затраты электроэнергии на 1 м³ породы составляют для глин 2 и для песков 30 кВт. При этом коэффициенты фильтрации обычно после обработки достигают значений 1–3 м/сут. Межэлектродные расстояния могут составлять 300 и более метров при напряжении на электродах не более 20 В и длительности воздействия до 60 сут.

Мелкие фракции пород существенно влияют на их проницаемость. Установлено, что общая проницаемость породы соответствует проницаемости мелкой фракции, если ее состав находится в пределах 8–10 %. С целью улучшения фильтрационных свойств пород важно устранить влияние тонкодисперсных фракций. Это может быть достигнуто электрообработкой, при которой наиболее мелкие (глинистые) частицы собираются и агрегируются в строго определенных местах, а остальное поровое пространство от них освобождается. В породе образуются зоны повышенной проницаемости, через которые осуществляется основное движение потока, снижается гидравлическое сопротивление породы и появляется возможность увеличения дебита скважин.

Для выявления количественных закономерностей электрообработки была поставлена серия опытных работ. Были проведены опыты по выявлению влияния электрообработки на проницаемость суглинков. Скважины были пробурены до заданного интервала и обсажены 708-мм трубами с перфорацией в нижней части. Трубы выполняли функцию электродов. Центральная

скважина – анод, а три скважины, пробуренные по окружности от центральной – катоды. Электрообработка проводилась постоянным током напряжением 180 В при силе тока 18 А. Общее время опыта составило 165 ч при затратах электроэнергии 560 кВт·ч. После обработки скважины были исследованы методом экспресс-откачек, который показал увеличение коэффициента фильтрации с 0,08 до 0,16–0,21 м/сут.

ВСЕГИНГЕО проводил исследования изменения структур мелкозернистых песков и супесей под влиянием электрообработки. Для опыта была оборудована площадка размером 20×20 м, в центре которой разместили электрод в виде 168-мм трубы. По краям площадки были установлены четыре электрода в виде 108-мм труб. Центральный электрод выполнял функцию анода, а периферийные – катода. Электрообработку проводили постоянным током напряжением 70–180 В при плоскости тока на центральном электроде 0,15–0,73 мА/см². Общее время электрообработки составило 765 ч при затратах электроэнергии 563 кВт·ч. Для проверки эффективности электрообработки опытная площадка была пересечена двумя лучами скважин, которые были затем опробованы опытными откачками. Максимальный дебит был получен в скважине, пробуренной на расстоянии 1 м от анода и составил 0,7 л/с. В 5 м от анода скважины дали дебит 0,4 л/с. За границами площадки дебит составлял 0,12 л/с, что соответствует фоновым значениям.

Исследования грансостава пород показали, что после электрообработки в интервале фильтров скважин на 5–10 % возросло содержание песчаных частиц за счет глинистых и пылеватых фракций. Это свидетельствовало об агрегатировании пород под влиянием электрического тока. Химический анализ воды после электрообработки показал снижение концентрации двуокиси кремния SiO₂ с 45 до 0,15 мг/л. По мнению Ю.Г. Ткаченко часть растворенной в воде двуокиси кремния израсходовалась на формирование кристаллических связей в породе при ее агрегатировании. Скважина на полигоне «Петушки» была оборудована после бурения 146-мм фильтром ФКО. При откачке сначала был получен дебит 0,15, а после освоения – 0,4 л/с. Увеличить дебит свыше 0,4 л/с традиционными методами не удалось. Проведение электрообработки при напряжении 800 В и силой тока 3 А позволило увеличить дебит до 0,91 л/с. Обсадная труба выполняла функцию катода, а анодом служили обсадные трубы четырех соседних скважин. Через год откачка из скважины была повторена. Получили стабильный дебит 0,8 л/с. Понижение оставалось постоянным в сравнении с первоначальным. Указанный опыт свидетельствует о длительности воздействия электрообработки на

породу продуктивного пласта. Аналогичные результаты были получены на скважинах на о. Сахалин, где водопроницаемость пород была увеличена с 204 до 336 м²/сут.

На полигоне «Петушки» были проведены работы по исследованию изменения проницаемости юрских глин при электрообработке. Обработывался блок объемом 12 000 м³ при общих затратах электроэнергии на 1 м³ породы 0,4 кВт·ч в течение 71 сут. Коэффициенты фильтрации в анодной зоне увеличились с $2,4 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/сут, а в катодной с 10^{-5} до $5 \cdot 10^{-2}$ м/сут, т.е. на два-три порядка.

Наиболее существенное влияние на гидравлическое сопротивление пород и соответственно дебит скважины оказывают тонкозернистые, пылеватые и глинистые фракции, распределенные определенным естественным образом в пластовой породе. Во ВСЕГИНГЕО были проведены опыты по оценке влияния кольматантов мелких фракций песков на расход потока через фильтрационную трубу.

Кольматант был представлен тонкозернистыми глинистыми песками тульского водоносного горизонта следующего грансостава: частицы 0,5–0,25 мм (до 35 %), частицы 0,25–0,1 мм (до 55 %), глинистые фракции 0,01 мм – до 10 %. Основная порода была представлена однородными среднезернистыми песками. Расход через фильтрационную колонну без породы составил 80 см³/с. При установке внутри колонны на сетке слоя среднезернистого песка толщиной 2 см расход уменьшился до 2,2 см³/с. С увеличением толщины слоя песка до 5 и 10 см расход снижался прямо пропорционально до 0,84 и 0,44 см³/с соответственно.

Добавление к слою песка толщиной 2 см слоя кольматанта толщиной 0,5 мм привело к снижению расхода до 0,0061 см³/с. Увеличение слоя песка при наличии кольматанта не влияло на расход, который составлял 0,0061 мл/с. Итак, присутствие даже незначительного слоя кольматанта в пласте приводит к снижению расхода примерно в 300 раз. Наличие в пласте кольматанта, представленного глинистыми и пылевыми фракциями, обусловлено естественным строением большинства пластов и от технологических процессов сооружения скважины не зависит. Поэтому в реальных условиях важно улучшить естественные фильтрационные свойства пласта за счет агрегатирования мелких фракций, создания проницаемых трещин в слоях кольматанта. Такой эффект можно обеспечить электрообработкой.

С целью проверки этого положения в лабораторных условиях на фильтрационной колонне слой кольматанта толщиной 0,5 мм пригруженный слоем среднезернистого песка обрабатывали по-

стоянным электрическим током. По мере электрообработки расход через колонну увеличивался. Первоначально до подачи кольматанта расход потока через песок составил 29,4, а после кольматации породы расход снизился до 1,5 см³/с. Порода подвергалась электрообработке при напряжении 60 В и силе тока 120 мА. Спустя 30 мин расход увеличился до 5,1, а через 145 мин – до 10 см³/с. Более длительная электрообработка к увеличению расхода свыше 10 см³/с не привела. Увеличение расхода в опыте объясняется структурообразованием кольматанта, агрегатированием глинистых и пылеватых частиц.

Для электрообработки можно использовать вертикальную и горизонтальную схемы расположения электродов. Вертикальная схема наиболее проста, так как не требует бурения вспомогательных скважин под электроды. Функцию одного электрода выполняет обычно обсадная колонна, зацементированная до кровли продуктивного пласта, а второго электрода – специальный забурник в подошве пласта.

Вертикальная схема применялась при электрообработке меловых песков с характерными коэффициентами фильтрации 0,11–0,16 м/сут. Экспресс-опробование скважин показало их инерционность в пределах 2500–3000 с, характеризующей низкую проницаемость пород. Электрообработка проводилась при силе тока 18–20 А и напряжении 110–115 В в течение 258 ч. Общие затраты электроэнергии составили 550 кВт·ч. Опробование скважин показало увеличение коэффициента фильтраций с 0,11 до 0,14 м/сут, т.е. на 27 %. Относительно низкая эффективность увеличения проницаемости пород при вертикальной схеме объясняется несущественной по масштабу зоной электрообработки, ограниченной околоскважинной областью. По-видимому, вертикальная схема электрообработки эффективна при декольматации после вскрытия пласта и его глинизации. В этом случае зона электрообработки может соответствовать размеру зоны кольматации. Существенного влияния на фильтрационные параметры пласта вертикальная схема электрообработки не оказывает.

С целью повышения фильтрационных свойств пласта, включая его отдаленные участки, применяют горизонтальную схему электрообработки, которая предполагает использование центральной скважины в качестве электрода одного знака, а скважин, пробуренных по контуру обрабатываемой площадки, – другого. При подключении электродов к противоположным полюсам источника тока в пласте создается электрическое поле, обуславливающее преобразование структуры породы, агрегатирование мелких, тонких и глинистых фракций. Оконтуривающие электроды могут заглубляться на несколько метров или

перекрывать продуктивный пласт – на всю мощность. Последняя схема более предпочтительна, так как позволяет создать равномерное электрическое поле в обрабатываемой зоне. Была опробована анодная горизонтальная схема электрообработки, при которой центральная скважина выполняла роль анода, а оконтуривающие скважины – катодов. Анодная обработка, в отличие от катодной (центральная скважина выполняет функцию катода), сопровождается более интенсивным агрегатированием тонкодисперсной фазы в центральных участках обрабатываемого блока. Электрообработку осуществляли при напряжении 100–105 В и силе тока 5–6 А. Всего провели шесть циклов электрообработки за 6,5 ч. Затраты электроэнергии составили 4 кВт·ч. Электрообработку сочетали с откачкой, при которой визуально наблюдался вынос тонкодисперсных частиц из скважины. Коэффициент фильтрации пород при опробовании после электрообработки вырос с 0,15 до 0,5 м/сут.

Максимальное увеличение проницаемости было зафиксировано экспресс-методом, показавшим снижение инерционности по постоянной времени с 3000 до 13,44 с или повышение фильтрационных параметров в 223 раза. По-видимому, полученные данные рано распространять на весь пласт, так как они характерны для околоскважинной зоны, которую в основном и охватывают экспресс-методы при опробовании.

На соседнем блоке горизонтальная схема электрообработки проводилась при напряжении 265–270 В и силе тока 47–28 А. После электрообработки провели откачку из центральной скважины, в процессе которой наблюдался вынос песка при расходе 0,3 л/с и понижении 3,6 м. При опытно-фильтрационных работах был получен коэффициент фильтрации пород 3,16 м/сут, т.е. в 20 раз больший, чем до электрообработки.

В околоскважинной зоне повышение фильтрационных параметров было еще более заметным. Параметр инерционности снизился с 2500 до 10,31. Это свидетельствует о повышении фильтрационных параметров скважины в 242 раза.

Горизонтальная схема электрообработки была применена для обработки глубокозалегающих пылеватых песков пльвунного типа фракции 0,01–0,02 мм на юге Молдовы. Мощность пласта составляла 8,5 м при залегании в интервале глубин 158–166,5 м. В кровле и подошве залегаали алевритистые глины. Водопроницаемость горизонта составляла около 10 м²/сут. Центральная скважина была оборудована 168-мм проволочным фильтром с последующей гравийной обсыпкой. На определенном расстоянии от центральной были пробурены вспомогательные электродные скважины, в которые установили 89-мм электроды длиной 9 м. В

качестве провода использовали кабель марки ВПП-10. На площадке ранее были пробурены наблюдательные скважины. Источником электроэнергии служила электростанция АД-60, от которой ток напряжением 380 В подавался на понижающий трансформатор типа АДД-303 и далее на систему выпрямителей на базе вентилях типа ВК-500 м радиаторами охлаждения. На выходе с выпрямителей снимался постоянный ток напряжением 60 В.

Перед электрообработкой провели опробование центральной скважины, при котором получили дебит 1 л/с при динамическом уровне 101,5 м и понижении 21,2 м.

Электрообработка пород водоносного пласта проводилась при непрерывной откачке на протяжении 11 сут с небольшими перерывами на техническое обслуживание электростанции. Электроды располагались на расчетном расстоянии от центральной скважины, которая во избежание повреждения фильтра к источнику тока не подключалась.

При напряжении 60 В и силе тока 30 А время электрообработки составило 168, а затраты электроэнергии – 302 кВт·ч. В процессе откачки дебит оставался постоянным в пределах 1 л/с, а динамический уровень и понижение постепенно уменьшались соответственно с 101,5 до 94,5 и с 21,2 до 14,2 м. В наблюдательных скважинах также отмечалось поднятие динамического уровня, свидетельствующее об улучшении фильтрационных свойств пласта. Удельный дебит центральной скважины после электрообработки вырос от 0,05 до 0,08 л/с, т.е. в 1,6 раза, а водопроницаемость пород увеличилась от 10 до 22 м²/сут.

В процессе электрообработки существенно изменился состав пластовых вод. Например, в одной из скважин после 165 ч электрообработки процентное соотношение фракций уменьшилось (в %): глинистых частиц (фракции 0,001–0,005 мм) с 8 до 4; пылеватых частиц (фракция 0,005–0,05 мм) с 30 до 13; тонкодисперсных фракций песка (0,05–0,1 мм) с 40 до 38.

Средний диаметр частиц увеличился с 0,05–0,06 до 0,18 мм, т.е. примерно в 3 раза. Полученные результаты по изменению грансостава считаются характерными для электрообработки и эти соотношения можно использовать для качественной оценки изменения структуры пород при подборе фильтров.