

В.В. Ивашечкин
П.А. Автушко

РЕМОНТОПРИГОДНЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ СКВАЖИНЫ

Под редакцией В.В. Ивашечкина

**Минск
БНТУ
2016**

УДК 628.112.2

Ивашечкин, В. В. Ремонтпригодные водозаборные скважины / В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2016. – 228 с. – ISBN 978-985-550-948-7.

В монографии рассмотрены конструкции ремонтпригодных водозаборных скважин, устройства для обнаружения и ремонта мест пескования, а также методы капитального ремонта пескующих скважин. Изложены методики расчета пьезометрических напоров в прифильтровой зоне скважин при затрубной гидродинамической и циркуляционной реагентной промывке гравийных фильтров, продолжительности растворения отложений, параметров гидрозелаторной установки для удаления песчаных пробок.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами сооружения и эксплуатации водозаборов подземных вод, студентов вузов.

Табл. 10. Ил. 88. Библиогр. 148 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол №8 от 4.11.2016 г.)

Р е ц е н з е н т ы :

заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем ГНУ Института природопользования
НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. *Г.П. Бровка*;
профессор кафедры водоснабжения и водоотведения
Белорусского национального технического университета,
д-р техн. наук, проф. *В.Т. Климков*

ISBN 978-985-550-948-7

© Ивашечкин В.В., Автушко П.А., 2016
© Белорусский национальный
технический университет, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения надежного и качественного хозяйственного водоснабжения существует во многих странах мира и Республика Беларусь не является исключением. Государственная водохозяйственная политика нашей страны направлена в первую очередь на защиту водных источников от загрязнения и решение важнейших социальных задач – обеспечение населения качественной питьевой водой и создание благоприятных условий проживания [1-2]. Основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения в Республике Беларусь являются пресные подземные воды, ресурсы которых оцениваются в 49,6 млн. куб. метров в сутки [3]. По данным Департамента по геологии Минприроды в настоящее время на балансе водопользователей в Республике Беларусь находится более 36 тысяч разведочно-эксплуатационных скважин.

Анализ их долговечности показал, что основными причинами снижения удельного дебита и выхода скважин из строя являются химический кольматаж и пескование [4, 5, 6, 7].

Кольматаж фильтров и прифильтровых зон для большинства скважин носит неизбежный характер. Основная масса отложений концентрируется в отверстиях водоприемной поверхности фильтра и в порах гравийной обсыпки, создавая снаружи каркаса фильтра так называемое «кольматационное кольцо». Сложность проблемы удаления отложений заключается в том, что «кольматационное кольцо» находится снаружи, а существующие импульсные, реагентные и комбинированные методы регенерации в скважинах типовых конструкций могут применяться только изнутри фильтрового каркаса, имеющего обычно вид перфорированной трубы с плотной проволоочной обмоткой, что затрудняет декольматацию. Из-за недостаточной эффективности обработок, «кольматационное кольцо» с течением времени прирастает по толщине, упрочняется за счет дегидратации отложений, теряет проницаемость, что приводит к росту энергозатрат на подъем воды. Поэтому около 90 % скважин эксплуатационного фонда работает со сниженной производительностью, а их средний срок службы редко превышает 18 – 20 лет, что существенно ниже расчетных показателей. Одним из путей повышения долговечности водозаборов подземных вод является применение ремонтпригод-

ных скважин с затрубными системами промывки, включающими специальные циркуляционные трубки, установленные на внешнем контуре гравийного фильтра. Такую систему монтируют снаружи фильтровой колонны при сооружении скважины, и она обеспечивает возможность гидродинамической и циркуляционной реагентной регенерации «кольматационного кольца» снаружи, чем достигается более высокая эффективность удаления отложений.

Вторая основная причина выхода скважин из строя - «пескование» может быть решена в скважинах типовых конструкций следующими методами: путем обследования скважины, определения местоположения притока песка и его местного ремонта, установкой фильтра меньшего диаметра вовнутрь пескующего и, наконец, извлечением на поверхность пескующего фильтра и его полной заменой. Последняя технология является самой эффективной, но существует серьезный риск разрыва соединений фильтра при преодолении трения от обжимающего горного давления. Поэтому буровые организации предпочитают перебурить скважину в той же санитарной зоне, нежели ее ремонтировать, переложив затраты на перебуривание на эксплуатирующую организацию. К сожалению, единственной ремонтпригодной конструкцией для проведения извлечения фильтра является скважина с фильтром «впотай» и гравийным сальником. Но и она в большинстве случаев является «неизвлекаемой» при значительных длинах фильтров. Все это требует совершенствования конструкций скважин.

Цель предлагаемой монографии – оценить ремонтпригодность существующих водозаборных скважин, предложить новые конструкции и ознакомить читателя с теоретическими подходами к обsolesнованию технологий их текущего и капитального ремонта.

Основные результаты, отражённые в настоящей книге, получены при выполнении НИР в БНТУ.

Введение, заключение, главы 1-5 написаны авторами совместно, главы 6-7 - д.т.н. В.В. Ивашекиным. Авторы благодарны к.ф.-м.н. Веременику В.В., ст. преподавателю Кондратовичу А.Н. за участие в исследованиях; директору УП «Минскводоканал» Аврутину О.А. и главному механику Мезину А.В. за внедрение разработок в производство. Авторы благодарят рецензентов профессоров Бровку Г.П. и Климкова В.Т. за критические замечания, которые были учтены при подготовке к изданию данной монографии.

ГЛАВА 1. ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ РЕМОНТА ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

1.1 Анализ конструкций скважин с оценкой их ремонтопригодности и долговечности

Буровые скважины широко используются для нужд водоснабжения, гидротехнического строительства, мелиорации и являются наиболее распространенными типами водозаборных сооружений в Республике Беларусь. Конструкция водозаборных скважин должна: обеспечивать высококачественное вскрытие водоносных горизонтов и изоляцию их друг от друга; длительный срок эксплуатации и минимальный темп снижения производительности; возможность выполнения ремонтных и восстановительных работ [8–11].

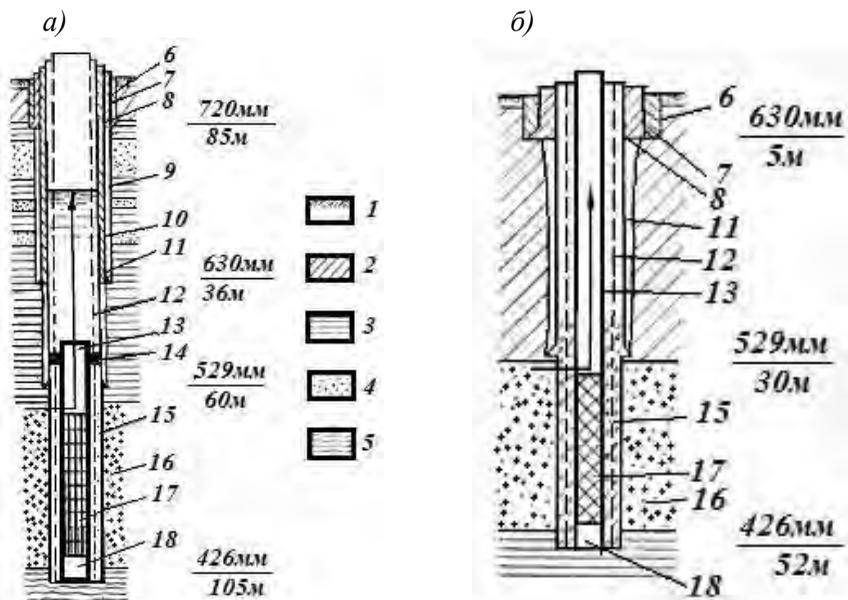
Конструктивно скважины на воду состоят из: кондуктора, технических колонн труб, эксплуатационной колонны, цементной защиты и фильтра (водоприемной части с отстойником и надфильтровой колонной). Эти элементы применяются в том или ином сочетании в зависимости от выбранного способа бурения, глубины скважины, гидрогеологических условий местности, требований эксплуатации, санитарной защиты и целевого назначения скважины [12, 13].

Неотъемлемой частью процесса эксплуатации и технического обслуживания скважин на воду являются ремонтные и восстановительные работы, основная задача которых состоит в повышении эксплуатационной надежности и увеличении сроков службы водозаборов. Текущий ремонт скважин предусматривает работы по восстановлению дебита (механическая очистка фильтра, импульсная, реагентная или комбинированная декольматация, очистка ствола от песчаной пробки), а капитальный ремонт предусматривает замену фильтра в случае выхода его из строя [4, 5, 14-15].

1.1.1 Скважины типовых конструкций

При добыче подземных вод в Республике Беларусь наиболее широко эксплуатируется комплекс четвертичных отложений. Доля пробуренных на эти отложения скважин достигает 85% от их общего количества по стране, а по водозаборам города Минска – 94%. Они в большинстве своем оборудованы гравийными фильтрами

(рисунок 1.1), которые по результатам исследований ВОДГЕО (Гаврилко В.М., Алексеев В.С.), в связи с их относительно длительной и устойчивой работой, отнесены к наиболее эффективному типу [4].



1 – почвенный грунт; 2 – суглинки; 3 – глины; 4 – пески; 5 – аргиллиты;
 6 – затрубная цементация; 7 – кондуктор; 8 – затрубно-межтрубная цементация;
 9 – техническая колонна труб; 10 – затрубно-межтрубная цементация;
 11 – эксплуатационная колонна труб; 12 – техническая колонна труб (извлекается после установки фильтра); 13 – глухие трубы фильтровой колонны; 14 – сальник;
 15 – песчано-гравийная обсыпка; 16 – водоносный пласт; 17 – рабочая часть фильтра; 18 – отстойник

Рисунок 1.1 – Конструкции водозаборных скважин [12]:

а – установка фильтра «впотай»; *б* – фильтр на эксплуатационной колонне

В неустойчивых водовмещающих породах фильтры «впотай» устраивают с гравийной обсыпкой (см. рисунок 1.1, *а*). Капитальный ремонт таких скважин предполагает спуск ловильного инструмента на бурильных трубах, захват вышедшего из строя фильтра и его извлечение домкратами, проработку ствола долотом, опущенным

на бурильной трубе, и спуск нового фильтра. Однако, как показала практика, извлечь такие фильтры удается только в редких случаях. При нагрузках до 950-1000 кН фильтры, как правило, не извлекаются [7]. Это связано с большими силами сцепления фильтра с породой и опасностью разрыва его секций по сварным швам. Кроме этого, опыт эксплуатации скважин с фильтрами, установленными «впотаи», показал, что они часто пескуют через сальник, который разрушается вследствие роста перепада давления на нем при кольматации и увеличении понижения в скважине.

Другим наиболее распространенным типом скважин являются скважины с установкой фильтра на эксплуатационной колонне труб (см. рисунок 1.1, б). В случае снижения производительности такой скважины и выхода фильтра из строя, извлечь и заменить его практически невозможно, поэтому капитальный ремонт скважины сводится к установке нового фильтра меньшего диаметра вовнутрь вышедшего из строя [10]. Вместе с тем, опыт эксплуатации такого «двойного» фильтра показывает, что он быстро кольматируется, а скважина становится неремонтопригодной и после непродолжительной работы снижает дебит.

Для интенсификации водоотбора, когда требуется получить максимальную производительность в заданной точке водоносного пласта, могут устраиваться скважины двухколонной конструкции, разработанные Ткаченко В.П. [16]. Конструкция такой скважины представлена на рисунке 1.2.

В скважинах двухколонной конструкции в качестве первой водоподъемной колонны используется надфильтровая труба, а вторая труба врезается в отстойник и устанавливается параллельно фильтру в контуре гравийной обсыпки.

При этом насос монтируют в обводной трубе с заглублением под минимальный уровень 1-3 м (по условиям эксплуатации). При капитальном ремонте такой скважины невозможно извлечь и заменить фильтр. В случае значительного снижения ее производительности, когда текущие ремонты оказываются неэффективными, такую скважину тампонируют и перебуривают.

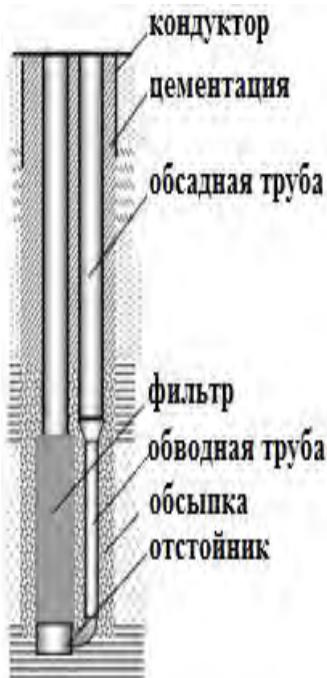


Рисунок 1.2 – Конструкция двухколонной скважины [17]

Кроме того, сооружение двухколонной скважины является весьма трудоемким и дорогостоящим мероприятием, что сужает область ее применения.

Конструкции фильтров оказывают большое влияние на дебит и сроки эксплуатации скважин [7]. В практике строительства систем водоснабжения, глубинного водопонижения и вертикального дренажа известно применение пластмассовых фильтров, изготавливаемых из полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида или стеклопластика [4,10,18,19]. Применение таких фильтров снижает опасность коррозионного разрушения и закупорки отверстий продуктами коррозии, уменьшает интенсивность процесса кольматажа гидрoхимическими отложениями вследствие гидрофобности пластмасс [10]. При необходимости

капитального ремонта скважин с пластмассовыми фильтрами, установленными «впотаи», фильтры разбуривают или дробят в скважине, а затем извлекают на поверхность по частям, после чего устанавливают новый фильтр. Применение пластмассовых фильтров несколько продлевает срок службы скважин, однако не позволяет избежать кольматации и снижения их производительности. К основным недостаткам пластмассовых фильтров можно отнести недостаточную механическую прочность, что ограничивает область их применения и не позволяет использовать высокоэнергетические импульсные и комбинированные методы для их регенерации.

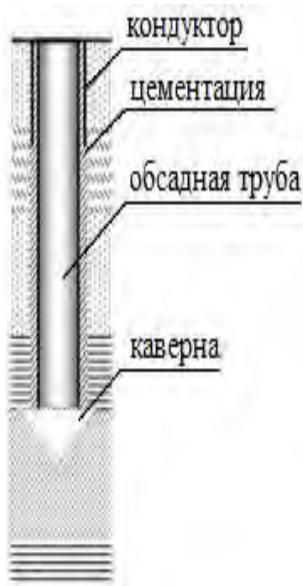


Рисунок 1.3 – Бесфильтровая скважина [17]

Для водоснабжения применяют также бесфильтровые скважины (рисунок 1.3), основным конструктивным отличием которых является наличие водоприемной каверны [9, 13, 20, 21]. Форма и размеры каверны определяются характером переслаивания горных пород и производительностью скважины. Эти скважины позволяют достигать хороших результатов при каптаже водоносных горизонтов в пылеватых и мелкозернистых песках, где подбор и устройство гравийных фильтров является весьма затруднительной задачей. Бесфильтровые скважины характеризуются устойчивой работой во времени при сохранении неизменных гидродинамических условий водоносного пласта, так как процессы химического и биологического кольяматажа здесь не наблюдаются [9].

Бесфильтровые скважины могут устраиваться только в условиях, когда водовмещающие породы залегают под устойчивой кровлей [13].

При эксплуатации бесфильтровых скважин необходимо учитывать вероятность их временного пескования в период пуска глубинных насосов. Их нельзя устраивать при предполагаемом прогрессирующем снижении пьезометрических напоров каптируемого водоносного пласта, так как это может вызвать обрушение кровли. Кроме того, устройство бесфильтровых скважин под влиянием сработки запасов подземных вод и выноса значительных объемов пород при размыве каверны может вызвать локальные просадки поверхности земли, что является весьма неблагоприятным процессом. Все это накладывает ряд ограничений и сужает область применения таких скважин.

Для предотвращения обрушения пород кровли и длительного пескования бесфильтровых скважин выполняют их капитальный ремонт, который заключается в заполнении каверны гравийным

материалом или установкой фильтра. В случае обрушения пород кровли в пределы залегания водоносного пласта, что влечет за собой резкое ухудшение его фильтрационных характеристик, рабочие части фильтра располагают ниже этой зоны, а интервал пород кровли перекрывают глухой надфильтровой трубой [9]. Таким образом бесфильтровая скважина переоборудуется в фильтровую.

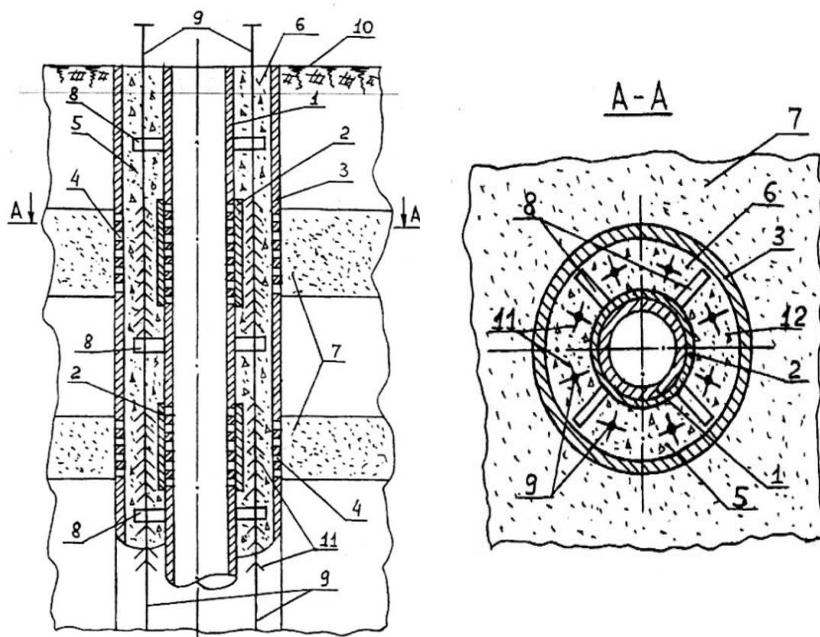
1.1.2 Скважины с затрубной регенерацией

Для повышения ремонтпригодности скважин В.Я. Катюхиным и др. (РФ, г. Тула) предложена дренажно-водозаборная скважина, оснащенная системой рыхлителей [22]. Конструкция скважины представлена на рисунке 1.4. Она состоит из центральной водосборной фильтровой колонны 1, фильтрующего покрытия 2 и приспособления для рыхления обсыпки. Скважина снабжена ограждающей трубой 3 с фильтрационными устройствами 4 и обсыпкой 5, размещенной в кольцевом промежутке 6 между центральной водосборной фильтровой колонной и ограждающей трубой, которая имеет фильтрационные устройства в местах распространения по глубине скважины водоносных слоев 7. На наружной поверхности центральной водосборной фильтровой колонны закреплены дискретно ярусами и продольными рядами по ее высоте центрирующие выступы 8.

Приспособление для рыхления гравийной обсыпки состоит из расположенных вдоль нее стержней, нижней частью доходящих до низа скважины и верхней частью выходящих на дневную поверхность, рыхлителей 11. Они выполняются в виде нанизанных на стержни ершей, шайб, пластин или конусов, обращенных вершиной вверх.

При снижении дебита скважины к выходящим на дневную поверхность верхним концам стержней присоединяют вибратор, которым воздействуют на каждый стержень 9, освобождая его от прочного контакта с сыпучим материалом фильтрующей обсыпки и передавая вибрационное воздействие на нее. В результате этого разрушаются коагуляционные связи между частицами сыпучего материала, происходит смещение этих частиц друг относительно друга и рыхление гравийной (фильтрующей) обсыпки, что увеличивает ее

пористость и проницаемость. При снижении эффективности вибрационного воздействия, стержни приподнимают на небольшую величину (1-2 шага размещения рыхлителей) с помощью грузоподъемного устройства.



- 1 – фильтр; 2 – фильтрующее покрытие; 3 – ограждающая труба;
 4 – фильтрационные устройства; 5 – обсыпка; 6 – кольцевой зазор; 7 – водоносный слой; 8 – центрирующие выступы; 9 – стержни; 10 – дневная поверхность;
 11 – рыхлители; 12 – сектор

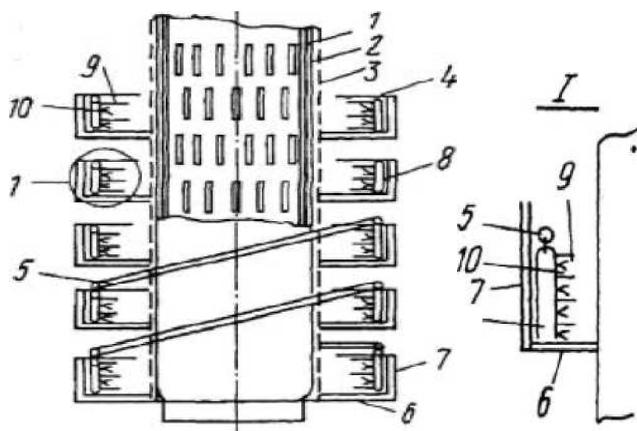
Рисунок 1.4 – Дренажно-водозаборная скважина, оснащенная системой стержней с рыхлителями [22]

При этом рыхлители, размещенные на стержнях, интенсивно разрушают кольматационные связи в порах фильтрующей обсыпки, увеличивая ее проницаемость.

К основным недостаткам конструкции скважины и способа ее регенерации следует отнести: отсутствие возможности воздействия на кольматирующие отложения, которые будут неизбежно накапливаться

снаружи ограждающей трубы; недостаточную эффективность механических и вибрационных методов регенерации фильтров скважин; значительные затруднения при извлечении фильтровой колонны, сопряженные с рисками ее обрыва.

В Курском политехническом университете предложена конструкция фильтра водозаборной скважины со спиралевидным эластичным шлангом на внешней стороне фильтрующего покрытия [23]. На покрытии установлены Г-образные скобы, в которых заключены размещенный по спирали заглушенный снизу шланг, выполненный из эластичного материала, и плоские эластичные кольца. Верхний конец шланга через ствол скважины выведен на поверхность земли и открыт для соединения с компрессором или насосом. На внутренней стороне плоских эластичных колец, контактирующих с фильтрующим покрытием фильтра, размещена щетина из гибких штырей. Между штырями выполнены отверстия с насадками, направленными в сторону фильтрующего покрытия.



- 1 – перфорированная труба; 2 – проволочная спираль; 3 – фильтрующее покрытие;
 4 – Г-образные скобы; 5 – гибкий шланг; 6 – полка Г-образных скоб;
 7 – стойка Г-образных скоб; 8 – плоские пластичные кольца; 9 – гибкие штыри;
 10 – насадки на отверстия

Рисунок 1.5 – Фильтр водозаборной скважины, оснащенный спиралевидным шлангом снаружи его водоприемной поверхности [23]

При кольматации фильтрующего покрытия в шланг подают воду или сжатый воздух, при этом плоские эластичные кольца расширяются. Штыри достигают загрязненного фильтрующего покрытия, а из насадок разбрызгивается промывная жидкость. Предполагается, что механическое воздействие штырей на внешнюю поверхность покрытия с одновременным гидродинамическим воздействием промывной жидкости разрушит кольматант. Вместо воды или сжатого воздуха допускается применение химических реагентов, способных растворить отложения.

К недостаткам конструкции фильтра относится ее сложность и наличие подвижных частей, которые должны перемещаться внутри гравийной обсыпки, что маловероятно. К положительным сторонам относится возможность реагентного воздействия на отложения снаружи фильтрующего покрытия.

В БНТУ разработана конструкция скважины с затрубной системой промывки, содержащей несколько циркуляционных трубок для закачки реагента [24-26]. По сравнению с известными типовыми конструкциями такая скважина обладает преимуществами в части повышения эффективности проведения текущих ремонтов и реконструкции. Обоснование конструктивных параметров системы затрубной промывки дано в следующих главах.

1.2 Краткий обзор методов регенерации типовых скважин

Текущий ремонт (регенерация) водозаборных и дренажных скважин предполагает выполнение комплекса работ по восстановлению их дебита. Рассматривая вопросы текущего ремонта, необходимо отметить, что долговременная и надежная работа скважин определяется, прежде всего, их конструкцией и качеством бурения. Если скважины пробурены с нарушением технологии и долгое время находились в эксплуатации, то нельзя рассчитывать на эффективное восстановление дебита, прибегая к известным способам [7].

Результаты многолетних исследований и наблюдений за работой дренажных и водозаборных скважин показали, что независимо от их конструкции и конструкции водоприемника происходит неизбежный процесс уменьшения производительности скважин во времени [4, 10, 28]. Основными причинами этого являются пескование

и повышение входных сопротивлений на фильтре, что обусловлено явлениями механического, химического и биологического кольматажа. Наиболее распространенным является химический кольматаж, который обусловлен смещением химического равновесия в воде.

Характер и размеры зон кольматации скважин были изучены сотрудниками ВНИИВОДГЕО при вскрытии затрубного пространства и расчистке фильтров водопонизительных скважин Волгоградской ГЭС [7]. В верхней части фильтров в интервале глубин 21–25,5 м, где наблюдалось колебание депрессионной поверхности, была вскрыта зона I цементированных отложений значительных размеров – до 1,5 м по радиусу (рисунок 1.6). По мере стабилизации депрессионной поверхности толщина зоны II цементации, сильно обогащенной гидроксидами железа, уменьшалась и на участке ниже колебаний кривой депрессии составила 0,15–0,2 м. При этом прочность кольматирующих образований достигала 2 МПа.



Рисунок 1.6 – Зона измененной проницаемости вокруг фильтров водопонизительных скважин Волгоградской ГЭС [7]

В длительно эксплуатирующихся водозаборных скважинах происходит накопление кольматирующих отложений с образованием цемента обрастания, который прочно скрепляет частицы песка и

гравия в прифильтровой зоне, образует наросты в отверстиях и на внутренней поверхности фильтра. На рисунке 1.7 показаны фильтры, покрытые прочными конгломератовидными отложениями. Фильтры были извлечены ОАО «Буровая компания «Дельта» из скважины водозабора «Неманица» (г. Борисов Минской области).



Рисунок 1.7 – Закольматированные фильтры скважины водозабора «Неманица» г. Борисова Минской области [26]

Проволочная обмотка фильтра покрыта частично оставшейся после извлечения плотной коркой толщиной 10–12мм, которая представляет собой слой гравийной обсыпки прифильтровой зоны, прочно связанный с проволочной обмоткой природным цементом обрастания. Внутри каркас также покрыт слоем отложений. Степень зарастания некоторых отверстий каркаса фильтра близка к 100% (см. рисунок 1.7). Пространство между проволочной обмоткой и каркасом на глухих его участках оказалось заполненным водонепроницаемыми железистыми отложениями. Результаты измерения количества продуктов реакции в процессе откачек после реагентных обработок показали, что количество кольматанта на одном погонном метре фильтра может достигать 40–60 кг [26].

Основной задачей восстановления производительности скважин с гравийными фильтрами является полное извлечение кольматирующих отложений из фильтра и из прифильтровой зоны. В прак-

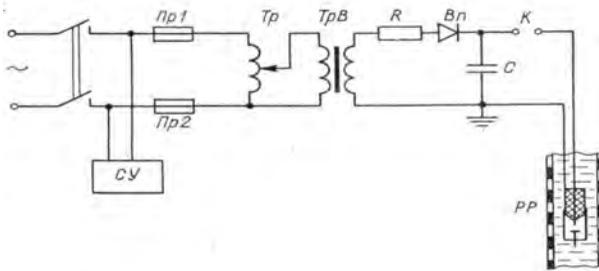
тике эксплуатации водозаборных и дренажных скважин применяются три основных метода регенерации: импульсный, реагентный и комбинированный.

1.2.1 Импульсный метод

Импульсное воздействие на скважины является одним из наиболее широко распространенных методов регенерации. Это во многом связано с относительной простотой применяемого оборудования и ощутимым эффектом, достигаемым при регенерации. Опыт импульсных обработок скважин достаточно велик и позволяет с достаточной надежностью сделать вывод о возможности восстановления производительности скважин до 40-70% от первоначальной [9]. Для обработки скважин ранее применялись специальные торпеды из детонирующего шнура (ТДШ), которые помещали в фильтровую часть скважины и подрывали [29]. Однако в последнее время данный способ на водозаборных и дренажных скважинах применяется ограниченно из-за специальных требований техники безопасности при работе с твердыми взрывчатыми веществами. В настоящее время наибольшее распространение получили электрогидроударный, пневмоимпульсный и газоимпульсный способы .

Электрогидроударный способ регенерации скважин основан на импульсном выделении энергии при высоковольтных электро-разрядах в фильтре [29-30]. Основными разрушающими факторами данного способа являются ударная волна и волны сжатия [31]. Принципиальная электрическая схема электро-гидроударной установки для осуществления разрядов в скважине представлена на рисунке 1.8.

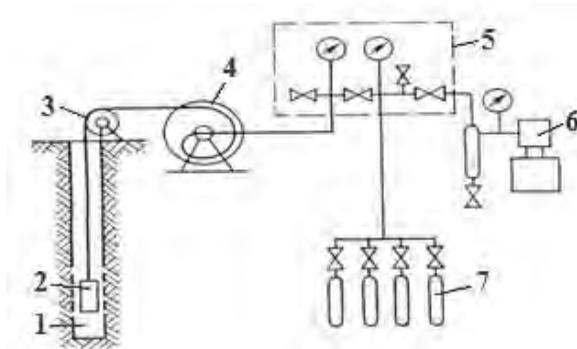
Эффективность электрогидроударного способа уменьшается с ростом диаметра фильтров. Кроме того, такие установки работают при высоких напряжениях (30–50 кВ), что повышает опасность поражения электрическим током.



РР – рабочий разрядник; СУ – система управления; ТрВ – высоковольтный трансформатор; R – зарядное сопротивление; Вп – выпрямитель; С – конденсатор; К – коммутатор; Тр – автотрансформатор; Пр1, Пр2 – предохранители

Рисунок 1.8 – Принципиальная электрическая схема электрогидроударной установки [29]

Пневмоимпульсный способ воздействия на призабойную зону скважин был предложен в 1964 году АзНИИ водных проблем и основан на использовании энергии сжатого воздуха, при этом основным разрушающим фактором являются волны сжатия и гидропоток [7, 29, 32-33]. Принципиальная схема установки для пневмоимпульсной обработки скважин представлена на рисунке 1.9.



1 – скважина; 2 – пневмокамера; 3 – направляющий блок; 4 – лебедка; 5 – щит управления; 6 – компрессорный агрегат; 7 – воздухоотборник

Рисунок 1.9 – Принципиальная схема установки для пневмоимпульсной обработки скважин [4, 29]

При работе пневмоснаряда ударная волна отсутствует, а энергия первой волны составляет 2–3% от общей энергии при давлении в камере от 10–12 МПа [34], поэтому большая часть энергии выхлопа идет на пульсации воздушного пузыря и создание гидротоков.

К основным недостаткам способа следует отнести сравнительно узкую область применения, ограниченную скважинами глубиной до 150 м, а также опасность интенсификации кольматажа фильтра из-за введения кислорода в прифильтровую зону при обработке [35].

Газоимпульсный способ основан на импульсном выделении энергии при окислении горючих газов. Основными разрушающими факторами являются: ударная волна (при детонации), волны сжатия и разрежения, гидроток. В качестве рабочего тела в основном используют смесь пропан-бутана с воздухом [36], водородно-кислородную [5, 23, 27] и ацетилено-воздушную смеси [27, 38], хлор-водородную газовую смесь, получаемую электролизом NaCl, HCl [39, 40]. Схемы установок для обработки скважин с помощью пропана-бутана и водорода приведены на рисунке 1.10.

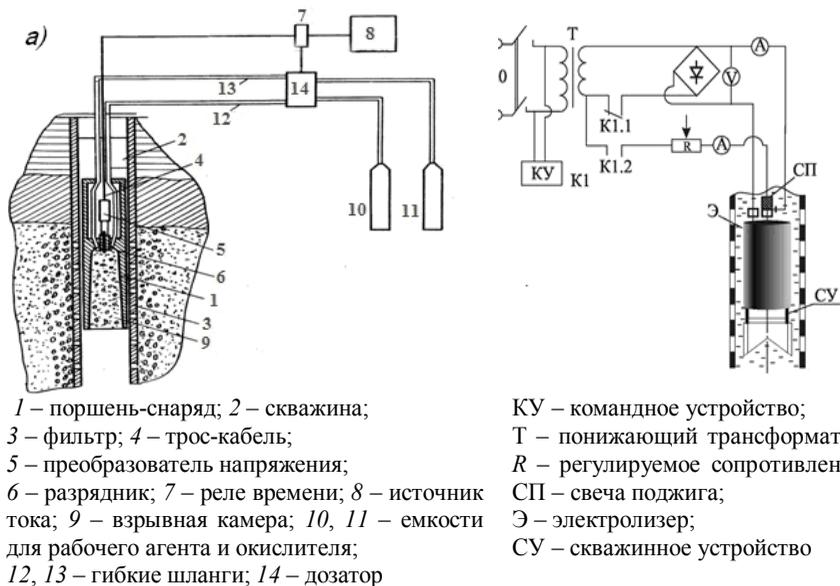


Рисунок 1.10 – Схемы установок для газоимпульсной обработки: *a* – смесью пропана-бутана с воздухом [36]; *б* – водородно-кислородной газовой смесью [23]

При обработке скважины (см. рисунок 1.10) в ее фильтровой части размещают рабочую (взрывную) камеру, а затем инициируют взрыв. Такой способ позволяет вести обработку фильтров с применением различных режимов химического превращения (взрывного горения и детонации), отличается существенной эффективностью и незначительными эксплуатационными затратами.

Описанные импульсные способы регенерации скважин направлены в основном на механическое разрушение кольматанта и образование дополнительных микротрещин и каналов в прифильтровой зоне. Это существенно увеличивает дебит скважины при небольших сроках эксплуатации и приближает его к первоначальному, однако при этом практически не происходит вынос отложений и очищение гравийной обсыпки. Опыт использования импульсных способов показал, что они малоэффективны при обработке длительно эксплуатирующихся скважин, при значительных размерах «кольматационного кольца» и необходимости осуществления многократного воздействия [4].

1.2.2 Реагентный и комбинированный методы

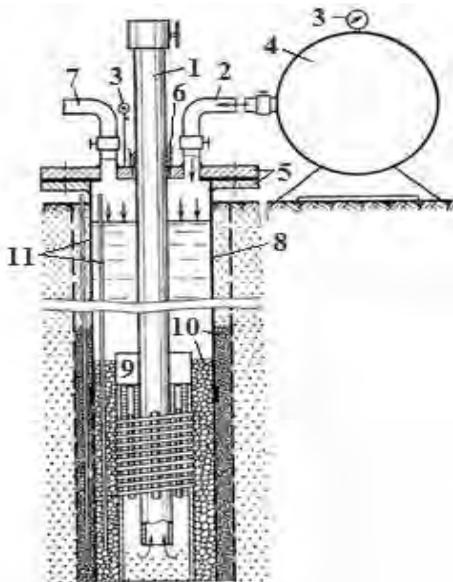
Необходимость проведения более эффективного ремонта скважин, связанного в первую очередь с удалением кольматирующих отложений с наружной поверхности фильтра и прифильтровой зоны, заставляет прибегать к более совершенным методам регенерации, таким как реагентный и комбинированный. В настоящее время применяются три реагентных способа регенерации: реагентная ванна; циклическое задавливание реагента за контур фильтра сжатым воздухом; циркуляция реагента в прифильтровой зоне скважины.

Способ реагентной ванны предполагает заливку в открытый ствол скважины реагента, который под влиянием процессов диффузии проникает за контур фильтра и растворяет осадки [7, 41]. Растворение кольматирующих соединений происходит в статических условиях (продолжительность обработки составляет 10 – 24 ч), при которых продукты реакции кольматанта и реагента могут экранировать доступ поступающего реагента, что замедляет скорость процесса растворения [42-43]. Поэтому обработка типовых скважин способом реагентной ванны не всегда обеспечивает значительный

прирост удельных дебитов, однако отличается простотой, т.к. не требует применения сложного технологического оборудования.

Способ циклического задавливания (рисунок 1.11) был предложен В. М. Гаврилко и впервые опробован на одном из водозаборов г. Дзержинска (РФ) [7]. Такой способ предполагает заливку реагента в скважину, герметизацию устья и отжатие уровня воды компрессором [4, 44-47].

Цикл обработки заключается в следующем. После заливки реагента в скважину компрессором нагнетают воздух для отжатия уровня воды, затем компрессор отключают. После этого сбрасывают давление воздуха и газов. Раствор, отжатый за контур, возвращается в фильтр скважины, где, смешиваясь с кислотой, повышает свою концентрацию. Интервал между циклами задавливания принимается равным 5 – 10 мин.



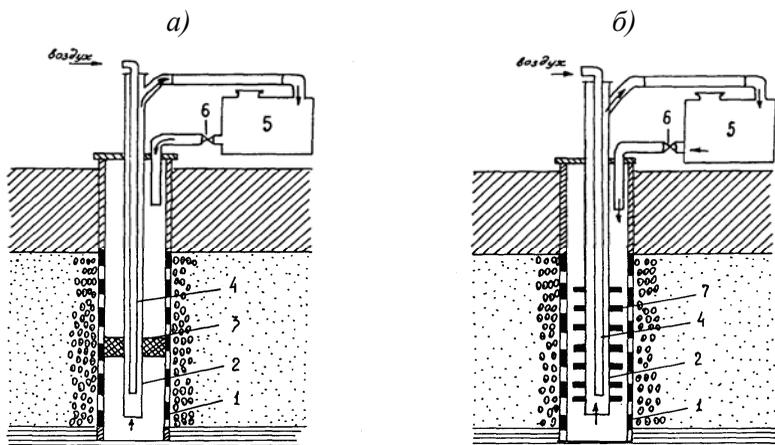
- 1 – труба для кислоты; 2 – шланг; 3 – манометр; 4 – воздухосборник;
5 – фланцы; 6 – сальник; 7 – труба для отвода газа; 8 – обсадная труба;
9 – фильтр; 10 – обсыпка; 11 – пьезометры

Рисунок 1.11 – Схема установки при циклическом задавливании [7]

К основным недостаткам этого способа можно отнести неравномерность очистки прифильтровой зоны, так как в процессе задавливания реагент может поглощаться наиболее проницаемыми участками фильтра и уходить в пласт, а также узкую область применения, ограниченную скважинами с длиной фильтров до 20 м со статическими уровнями, расположенными на глубинах до 50 м [44].

Циркуляционный способ регенерации скважинных фильтров развился и нашел свое применение в таких странах, как США [48-49], Германия [50-51], Россия [52-57], Беларусь [58]. Основной особенностью известных циркуляционных способов регенерации является разделение фильтра скважины во время обработки на секции. При этом процесс циркуляции реагента происходит за счет того, что в одну секцию производится его закачка, а из другой одновременно – откачка. В результате такого деления фильтра на ряд секций происходит циркуляция реагента в прифильтровой зоне.

В. Г. Теслей в работе [57] исследованы закономерности вертикального фильтрационного движения реагента в прифильтровой зоне скважин при разделении их фильтра горизонтальным пакером на две секции равной длины (рисунок 1.12, а).



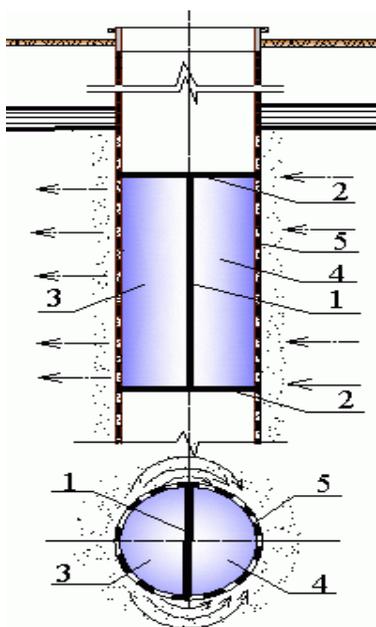
1 – фильтр; 2 – водоподъемная колонна; 3 – пакер; 4 – воздухопроводная колонна; 5 – емкость; 6 – задвижка; 7 – негерметичные перегородки

Рисунок 1.12 – Устройства для циркуляционной регенерации скважин [57]:
а – схема с одним пакером; б – схема с негерметичными перегородками

Анализ полученных Теслей В.Г. расчетных зависимостей показал, что размеры зоны циркуляции в любой момент времени зависят от длины пакера и соотношения расходов $Q_{\text{ц}}$ (подается в верхнюю секцию) и $Q_{\text{о}}$ (откачивается из нижней секции). Установлено, что максимальные размеры зоны обработки, соответствующие поступлению в откачную секцию 95 % закачиваемого расхода, составляют всего 1,4–1,6 м. Регулирование размеров зоны циркуляции возможно за счет сокращения общего времени обработки, однако это приводит к тому, что нижняя часть пласта вместе с участком откачной секции фильтра остаются необработанными. Теслей В. Г. была также рассмотрена циркуляционная схема с установкой в фильтре нескольких негерметичных дисков (см. рисунок 1.12, б). При такой схеме наряду с движением жидкости в прифильтровой зоне имеет место и его циркуляция в фильтре скважины. Величина расходов, циркулирующих в прифильтровой зоне и фильтре, зависит от общего расхода откачки (закачки), сопротивления, создаваемого дисками, а также от сопротивления прифильтровой зоны. Показано [57], что при установке в фильтре n_n пакеров конечные размеры обрабатываемой зоны по сравнению с однопакерной схемой уменьшаются в n_n раз, а общее время обработки сокращается в n_n^2 раз. Предложенная схема может применяться только в скважинах с небольшими сроками эксплуатации, когда рыхлый кольматирующий осадок не успевает дегидратироваться и упрочниться.

Результаты исследования горизонтального циркуляционного движения реагента в прифильтровой зоне скважины, когда фильтр внутри разделяют на два вертикальных сектора (рисунок 1.13) приведены в работах А.М. Шейко [58]. При этом реагент задавливают в прифильтровую зону через нагнетательные сектора и, создавая разрежение во всасывающих секторах, возвращают обратно в фильтр. К основным недостаткам предложенной технологии следует отнести неравномерность поля скоростей фильтрационного потока. Учитывая, что здесь линии тока близки по виду к дуге окружности, можно заключить, что промывка наиболее отдаленных участков закольматированной прифильтровой зоны малоэффективна и требует значительных энергозатрат. Кроме того, реализация предложенных Теслей В. Г. и Шейко А. М. технологий регенерации характеризуется утечкой реагента в пласт и основана на использова-

нии сложного оборудования, что требует привлечения специализированных ремонтных организаций.



1, 2 – вертикальный и горизонтальный пакеры; 3, 4 – нагнетательный и всасывающий сектора; 5 – фильтр

Рисунок 1.13 – Схема горизонтальной циркуляции реагента [58]

Теоретические исследования кинетики растворения кольматанта фильтров и прифилтровых зон скважин растворами реагентов показали, что интенсивность процесса декольматации существенно увеличивается с ростом скорости движения реагента в порах [7]. Для увеличения поверхности контакта реагента с осадками и обеспечения его более глубокого проникновения за контур скважин целесообразно перед началом обработок разрушить структуру отложений, что способствует появлению новых фильтрационных каналов. Особенно это актуально для плотных цементированных отложений. Это обусловило появление комбинированных способов регенерации. Они сочетают в себе импульсное воздействие с последующей или одновременной обработкой скважины реагентами.

Основными видами комбинированного воздействия являются: электрогидроудар в реагенте [47], пневмо-реагентный [32], газоимпульсно-реагентный [5, 23] и виброреагентный [9, 60] способы.

1.3 Предотвращение пескования скважин

Пескование является одной из главных причин выхода скважин из строя. Суть процесса заключается в интенсивном выносе водовмещающих песчаных пород в ствол скважины при ее работе. Пескование, как и кольматаж фильтров, приводит к существенному

снижению производительности водозаборов подземных вод. Кроме того, оно ведет к преждевременному износу водоподъемного оборудования, занесению песком водосборных емкостей и трубопроводов, повышению стоимости их эксплуатации. Основные причины пескования скважин следующие [7]: некачественное выполнение сальника при установке фильтра «впотай»; повреждение пробки отстойника; несоответствие номера сетки или шага намотки спирали гранулометрическому составу пород водоносного горизонта; неравномерность слоя обсыпки или отсутствие направляющих фонарей; несоответствие подбора гравийной обсыпки составу водоносных пород; повреждение водоприемной поверхности фильтра при импульсной и реагентной регенерации; разрушение фильтра из-за коррозии.

При систематическом песковании скважин нередко наблюдается образование воронок обрушения, размеры которых в некоторых случаях измеряются несколькими десятками кубических метров [7].

Известны два основных метода предотвращения пескования водозаборных скважин: гидродинамический и механический. Суть гидродинамического метода заключается в исключении возникновения значительных депрессий на пласт в ограниченные промежутки времени, приводящих к нарушению устойчивой структуры пород [61]. Однако эксплуатация скважины со сниженным дебитом может быть экономически невыгодна. Суть механического метода заключается в создании различного рода преград на пути миграции частиц грунта при механической суффозии [62]. Такой метод более эффективен и экономичен. Лумис (США) предложил в корпус двухкамерного оборудования [63], применяемого для определения интервала повреждения колонны, помещать пакеты с тампонирующим составом на основе терморезистивных смол. В одном из патентов США, выданном на имя Питерса (США), предлагается перекрывать места повреждений в обсадной колонне и фильтрах сегментными накладками [63]. Наружный диаметр накладок равен внутреннему диаметру поврежденного места, а их края имеют эластичное уплотнение (из резины или другого материала). Промысловые эксперименты были проведены также с так называемым пластмассовым пластырем, устанавливаемым в интервале повреждения [63]. Приспособление опускают на насосно-компрессорных трубах к месту повреждения, предварительно обернув резиновую трубу устройства несколькими слоями стеклоткани, пропитанной смолой. Затем в

насосно-компрессорные трубы (НКТ) нагнетают жидкость. Под действием нагнетаемой жидкости раздувается резиновая труба, прижимающая пропитанную смолой ткань к стенкам колонны (фильтра). При этом часть смолы выдавливается к месту повреждения, заполняя его. После затвердевания смолы давление в НКТ сбрасывается, и резиновая оболочка занимает свое исходное положение, после чего извлекается на поверхность. К недостаткам применяемых тампонирующих материалов и смол относится их токсичность, не позволяющая применять их в водозаборных скважинах, и сравнительно высокая стоимость.

Ремонт пескующих скважин часто сопряжен со сложными работами, требующими применения специального технологического оборудования. При этом одним из основных условий эффективного ремонта скважины является необходимость установления причин, вызвавших механическую суффозию, и места расположения дефекта [64]. Решение данных задач требует очистки фильтра скважины от песчаной пробки. Чаще всего это выполняется желонкой (обычной клапанной, поршневой, пневматической и др.) либо путем промывки скважины [7, 65-66]. Для извлечения песчаной пробки могут также применяться эрлифт или гидроэлеватор [67-68], что наиболее эффективно, так как такой способ позволяет очистить фильтр в сжатые сроки и при этом существенно снижается вероятность его повреждения.

1.4 Методы расчета реагентного воздействия на кольматирующие отложения

Процесс выщелачивания кольматирующих отложений в гравийной обсыпке скважин можно рассматривать как химическую гетерогенную реакцию, в ходе которой кристаллические связи компонентов кольматанта разрушаются, ионные связи разрываются и компоненты переходят в раствор. Такие реакции протекают в несколько стадий: перенос реагента (растворителя) к поверхности, на которой происходит реакция; собственно химическая реакция; отвод продуктов реакции от поверхности [4, 14]. Общая продолжительность процесса, зависит от скоростей отдельных стадий, причем определяющей является стадия, протекающая медленнее остальных. Результаты исследований кинетики растворения твердых

веществ в жидкостях при различных гидродинамических условиях приведены в работах Г.А. Аксельруда, А.Д. Молчанова, В.М. Лысянского [42, 69].

Н.Н. Веригиным исследовался вопрос фильтрационного выщелачивания засоленных грунтов для двух различных способов локализации солей: дисперсно-рассеянного и поверхностно-пленочного [70]. Принимая, что скорость растворения солей подчиняется диффузионной кинетике, учитывая модель пористой среды, характер изменения коэффициента скорости растворения и удельной поверхности растворения, Н.Н. Веригиным предложено следующее уравнение кинетики:

$$\rho_{oc} \frac{db}{dt} = -B(C_m - C)b^z, \quad (1.1)$$

где ρ_{oc} – плотность отложений;

b – удельный объем отложений к моменту времени t ;

B – константа, определяемая скоростью движения жидкости и рядом физических параметров среды;

C_m – предельное насыщение реагента растворенными солями;

C – концентрация растворенных солей к моменту времени t ;

z – показатель степени (для реальных пород $0 \leq z \leq 1$).

А. Е. Орадовской проводились экспериментальные исследования выноса включений гипса из слоя песка и получила приемлемую сходимость результатов опытов и теоретических расчетов [71]. При фильтрации воды в пористой среде для описания процесса изменения концентрации в воде растворенного гипса использована зависимость

$$C(t) = C_m \left(1 - e^{-\varphi \frac{L}{v}} \right), \quad (1.2)$$

где L – длина пути фильтрации;

v – скорость фильтрации;

φ – коэффициент, характеризующий интенсивность процесса растворения солей и зависящий от размера, состава, формы частиц солей, содержащихся в объеме грунта, площади фильтрующего сечения.

В.М. Гаврилко, В.С. Алексеевым в работе [4] и А.М. Тугаем, О.Я. Олейником, Я.А. Тугаем в работе [14] представлены результаты теоретических исследований растворения кольматирующих осадков в скважинах. Установлено, что процесс растворения солей металлов в водных растворах и кислотах протекает по диффузионному закону и такие реакции являются необратимыми. Для описания кинетики растворения осадков предложено уравнение [4]

$$\frac{db}{dt} = \frac{\omega\beta}{\rho_{oc}} [C_m - C(t)], \quad (1.3)$$

где $\omega = \omega_0(1 + \alpha b)^{2/3}$ – удельная поверхность закольматированного грунта;

$$\alpha = 1/(1 - n_0);$$

β – коэффициент массоотдачи, который определяет скорость подвода реагента к поверхности (или отвода продуктов реакции от поверхности в объем реагента).

При растворении отложений в статических условиях (режим реагентной ванны) выражение для расчета β имеет вид [4]

$$\beta = 2D/d, \quad (1.4)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии;

$d = d_0(1 + \alpha b)^{1/3}$ – диаметр зерен грунта; d_0 – размер частиц некольматированной гравийной обсыпки скважины.

Величина коэффициента молекулярной диффузии D незначительно зависит от концентрации растворителя, но существенно растет с ростом его температуры. Так, для подземного растворения каменной соли коэффициент молекулярной диффузии увеличивается от $0,706 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ до $2,61 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ при увеличении температуры от 273 К до 323 К и концентрации растворителя $51,7 \text{ кг/м}^3$ [42].

В.М. Гаврилко и В.С. Алексеевым процесс регенерации закольматированной гравийной обсыпки способом реагентной ванны предложено описывать системой двух уравнений: обобщенным уравнением кинетики и уравнением баланса вещества

$$\begin{cases} \frac{db}{dt} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} \cdot f(b) \cdot (C_m - C), \\ \frac{d(n_k \cdot C)}{dt} + \rho_{oc} \frac{db}{dt} = 0, \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\quad (1.6)$$

где $B_i = 2D \cdot \omega_0 / d_0$; $f(b) = (1 + \alpha \cdot b)^{1/3}$; $n_k = n_0 - b$; n_0, ω_0 – соответственно пористость и удельная поверхность незакольматированной гравийной обсыпки скважины.

Система этих уравнений в работе [4] решалась приближенно при линейризации функции $f(b)$ зависимостью вида $f(b) = (1 + \gamma b)$, где γ – некоторая константа, обоснованный выбор которой не обсуждался. Это не позволяло получить точное решение. Здесь также не было получено выражение для расчета продолжительности реакгентной регенерации. Точное решение системы уравнений (1.5) - (1.6), учитывающее также такие важные факторы, как эффект экранизации (блокировки) поверхности частиц продуктами реакции и наличие нерастворимых соединений в составе кольматирующих отложений, приведено в главе 4 настоящей работы.

Применительно к технологии обработки скважин способом циклического задавливания реагента за контур фильтра В.М. Гаврилко и В.С. Алексеевым предложена следующая зависимость для расчета коэффициента массопереноса β , полученная из критериального уравнения [4]

$$\beta = A_1 \sqrt{\frac{v}{dn_k}}, \quad (1.7)$$

где A_1 – коэффициент, определяемый из формулы $A_1 = A_\beta (D^4 / v_c)^{1/6}$;

A_β – численная константа, принимаемая в интервале от 0,76 до 0,997;

v_c – коэффициент кинематической вязкости жидкости;

n_k – пористость закольматированных пород.

А. М. Шейко и В.В. Ивашекиным в результате экспериментальных исследований процесса выщелачивания дитионитом натрия $Na_2S_2O_4$ искусственно цементированного железистого осадка по-

лучена логарифмическая регрессионная модель, устанавливающая зависимость продолжительности растворения отложений от скорости движения реагента [23, 58]

$$t = -0,15 \ln(\bar{v}) + 0,04, \quad (1.8)$$

где $\bar{t} = t/t_{\max}$; $\bar{v} = v/v_{\max}$; t_{\max} – максимальная продолжительность процесса выщелачивания;

v_{\max} – максимальная скорость движения реагента.

Анализ выражений (1.7) и (1.8) показывает, что чем выше скорость движения реагента в закольматированной обсыпке, тем быстрее протекает процесс ее декольматации. Методы регенерации скважин, основанные на создании принудительного фильтрационного движения реагента в гравийной обсыпке (циркуляционные), являются наиболее перспективными. Они позволяют за счет поддержания необходимой скорости движения реагента обеспечить интенсивное растворение и вынос кольматанта, что выгодно отличает их от способов реагентной ванны и циклического задавливания.

1.5 Пути повышения долговечности скважин

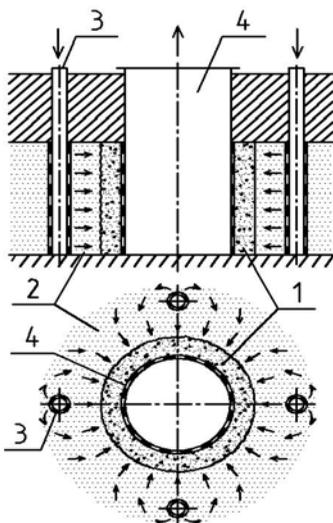
Анализ работы водозаборных скважин с гравийными фильтрами в УП «Минскводоканал», проведенный Шейко А.М. [58], показал, что средний срок их службы составляет 23,5 года, а снижение начального удельного дебита на 25% происходит здесь в среднем за 3,4 года, что вызвано процессами кольматажа. Кольматирующие отложения аккумулируются и закупоривают гравийную обсыпку, и если их не удастся удалить, то между кольматантом и частицами грунта обсыпки образуются сильные химические связи. В результате этого увеличивается гидравлическое сопротивление фильтра и фильтрационных каналов гравийной обсыпки, при этом растут потери напора и снижается пропускная способность фильтра. Одновременно снижается производительность скважины. В результате понижения динамического уровня воды растет депрессия на пласт и увеличиваются геометрический напор погружного насоса и затраты электроэнергии на подъем воды. При длительной эксплуатации скважина начинает ра-

ботать особенно неэффективно с высокими удельными затратами на кубометр добываемой воды.

Анализ типовых конструкций водозаборных скважин показал, что в них можно проводить обработки только изнутри фильтра, хотя основной объем кольтматирующих отложений сосредоточен в гравийной обсыпке, которая обычно отделена от внутренней полости фильтра перфорированным каркасом с низкой скважностью и закольматированной водоприемной поверхностью. Поэтому воздействие известных методов регенерации на отложения является недостаточно эффективным, т.к. при обработках не достигается полная степень удаления отложений и не обеспечивается восстановление первоначальной производительности скважины. При несвоевременном и неполном удалении кольтматирующих отложений эксплуатация скважины становится нерентабельной, в результате ее тампонируют и перебуривают, что приводит к значительным и неоправданным материальным затратам. Поэтому проблема поддержания стабильной работы водозаборных скважин в процессе их многолетней эксплуатации остается весьма острой и представляет собой актуальную научно-практическую проблему.

Для решения этой проблемы в БНТУ предложены конструкции ремонтпригодных скважин (рисунок 1.14), с затрубными системами промывки [23, 24, 27, 72-75].

Установка затрубных систем на скважинах обеспечивает доступ к «кольтматационному кольцу» снаружи и создает благоприятные условия для осуществления декольтматации гравийной обсыпки с двух сторон: с внутренней (традиционные способы регенерации) и с наружной (затрубная гидродинамическая и реагентная промывки).



1 – «кольматационное кольцо»; 2 – гравийная обсыпка; 3 – затрубная система; 4 – фильтровая колонна

Рисунок 1.14 – Принципиальная схема затрубной промывки скважины

Затрубную регенерацию можно выполнять водой или реагентами, при этом не требуется применение технологического оборудования индивидуального исполнения. Установка для реализации затрубной регенерации состоит из стандартного погружного насоса (эрлифта), бака, трубопроводов и насоса системы закачки, которые имеются в распоряжении практически у любой эксплуатирующей организации.

Выводы по главе 1

1. Из литературных источников следует, что основными причинами снижения удельного дебита водозаборных скважин в Республике Беларусь являются химический кольматаж, результатом которого является образование «кольматационного кольца» снаружи водоприемной поверхности фильтра в гравийной обсыпке. Типовые конструкции скважин, которых в стране насчитывается более 36 тысяч, не обладают достаточной ремонтпригодностью, так как позволяют производить регенерацию только изнутри фильтра. Из-за недостаточной эффективности таких обработок, с течением времени «кольматационное кольцо» прирастает по толщине, упрочняется за счет дегидратации отложений, теряет проницаемость, что приводит к росту энергозатрат на подъем воды. Поэтому около 90 % скважин эксплуатационного фонда работает со сниженной произво-

длительностью, а их средний срок службы редко превышает 18 – 20 лет, что существенно ниже расчетных показателей.

2. Оценка эффективности импульсных и реагентных обработок показала, что последние характеризуются наибольшей степенью удаления отложений. При реагентных обработках процесс растворения кольматирующих образований интенсифицируется увеличением скорости движения потока промывной жидкости, поэтому для удаления цементированных отложений целесообразно применять технологии, основанные на создании циркуляционного потока реагента в профильтровой зоне скважин.

3. Анализ конструкций скважин показал, что перспективными являются конструкции, позволяющие осуществлять воздействия на «кольматационное кольцо» с двух сторон (внутренней и наружной), что повышает эффективность регенерации. К такому типу скважин относятся разработанные в БНТУ водозаборные скважины, оборудованные затрубными системами промывки. Затрубная система устанавливается в новых скважинах на этапе их сооружения и выполняется в виде нескольких симметрично расположенных циркуляционных трубок, перфорированных в интервале фильтра и помещенных на внешний контур гравийной обсыпки.

Вместе с тем, недостаточная изученность основных закономерностей и технологических возможностей процесса затрубной регенерации таких скважин существенно сдерживают их промышленное внедрение, поэтому вопросы разработки эффективных технологий их текущего ремонта представляют собой важную и актуальную научно-практическую задачу.

ГЛАВА 2. СКВАЖИНЫ С ЗАТРУБНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРОМЫВКИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОМЫВНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА

2.1 Новые конструкции ремонтпригодных скважин с затрубными системами промывки

Конструкция скважины с фильтром на сплошной колонне, оборудованной затрубной системой промывки, представлена на рисунке 2.1.

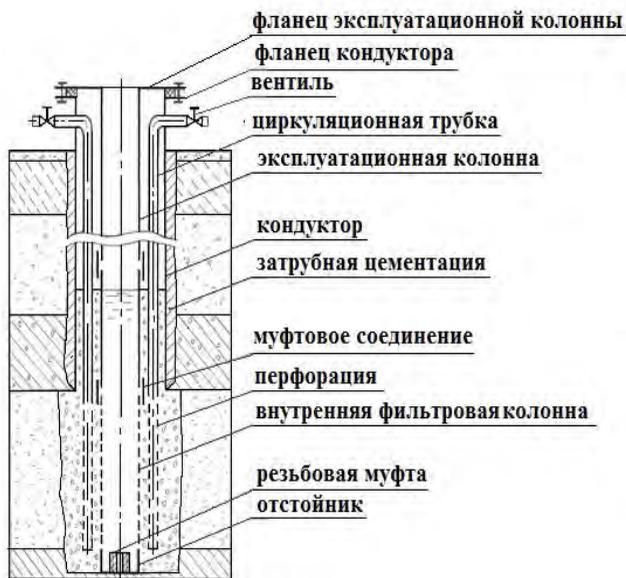


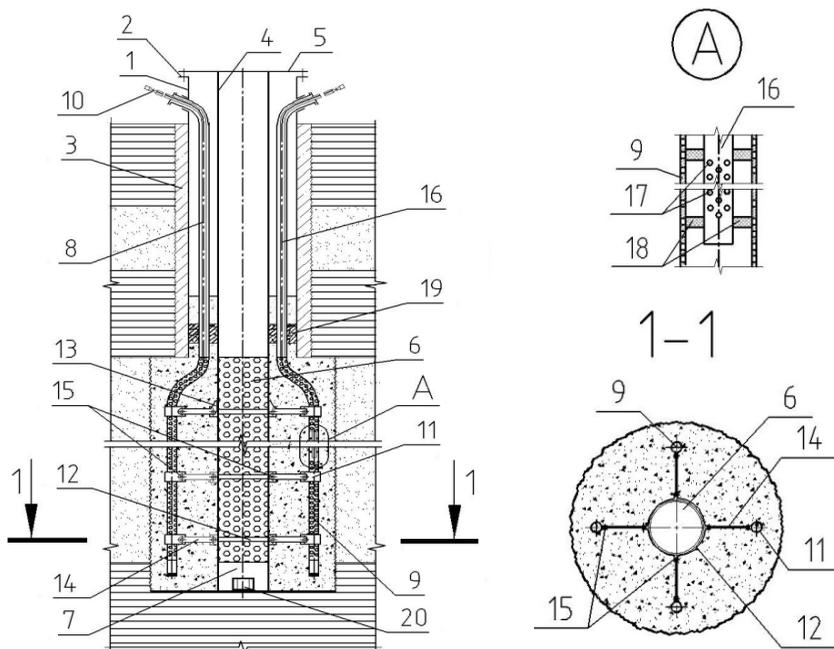
Рисунок 2.1 – Скважина с затрубной системой промывки и фильтром, установленным на эксплуатационной колонне [24, 25]

Затрубной системой промывки оснащают скважину на этапе бурения, она представляет собой перфорированные трубки для подачи промывной жидкости, установленные на внешнем контуре гравийной обсыпки и выведенные к устью.

Циркуляционные трубки симметрично размещают относительно оси скважины. Основное назначение системы промывки заключается в облегчении доступа в прифильтровую зону скважины, где сосредоточена основная масса кольматирующих отложений. Поэтому в процессе эксплуатации и текущих ремонтов скважина, оборудованная затрубной системой промывки, позволяет воздействовать на отложения как изнутри (традиционные способы регенерации), так и снаружи (гидродинамическая и реагентная промывка) водоприемной поверхности. В качестве циркуляционных применяются полиэтиленовые трубки с наружным диаметром 20-25 мм. Такие трубки технологичны, долговечны (гарантия производителя 50 лет), имеют высокую химическую стойкость и поставляются в бухтах длиной 100 м, что является весьма удобно при монтаже затрубной системы промывки. Трубки могут также использоваться в качестве пьезометров для контроля пьезометрического уровня подземных вод за стенкой фильтра, что необходимо для мониторинга обобщенного гидравлического сопротивления и диагностики состояния гравийной обсыпки. Специальная конструкция фильтра с резьбовой муфтой позволяет с достаточной степенью надежности осуществлять его извлечение и замену при необходимости.

Известно, что чем больше толщина гравийной обсыпки, тем выше производительность и устойчивее работа скважины [66]. На рисунке 2.2 представлена конструкция скважины с уширенным контуром гравийной обсыпки [76].

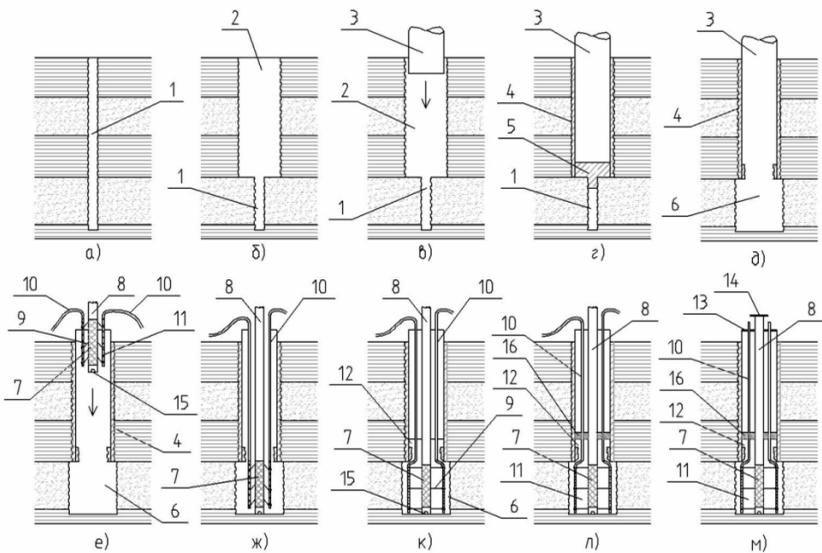
Для увеличения охвата прифильтровой зоны скважин, пробуренных с использованием расширителя, циркуляционные трубки устанавливают на внешний контур гравийной обсыпки с помощью специальных вращающихся тяг с упорами.



- 1 – кондуктор; 2 – фланец кондуктора; 3 – затрубная цементация;
 4 – эксплуатационная колонна; 5 – фланец эксплуатационной колонны;
 6 – фильтровая колонна; 7 – отстойник; 8 – циркуляционная трубка;
 9, 17 – перфорация; 10 – вентиль; 11, 12 – хомуты; 13 – упор; 14 – тяга;
 15 – проушина; 16 – заливочная трубка; 18 – манжеты; 19 – глиняный замок;
 20 – резьбовая муфта

Рисунок 2.2 – Скважина с затрубной системой регенерации и уширенным контуром гравийной обсыпки [76]

Для сооружения скважин предлагаемых конструкций следует применять роторный способ бурения с обратной промывкой чистой водой, который обеспечивает высокое качество вскрытия продуктивного пласта, возможность бурения скважин открытым стволом большим диаметром (до 1,5 м) и стабильно высокие удельные дебиты или с прямой промывкой с использованием расширителя. На основе имеющегося опыта сооружения скважин типовых конструкций разработана технология бурения предлагаемых скважин. Технологическая последовательность операций представлена на рисунке 2.3.



1 – ствол разведочной скважины; 2 – ствол скважины для кондуктора;
 3 – кондуктор; 4 – затрубная цементация; 5 – цементная пробка; 6 – ствол скважины для фильтровой колонны; 7 – фильтровая колонна с отстойником;
 8 – эксплуатационная колонна; 9 – тяга с упором; 10 – циркуляционные трубки;
 11 – фильтры циркуляционных трубок; 12 – фильтрующая засыпка;
 13 – герметизирующая плита; 14 – герметичный оголовок; 15 – муфта;
 16 – глиняный замок

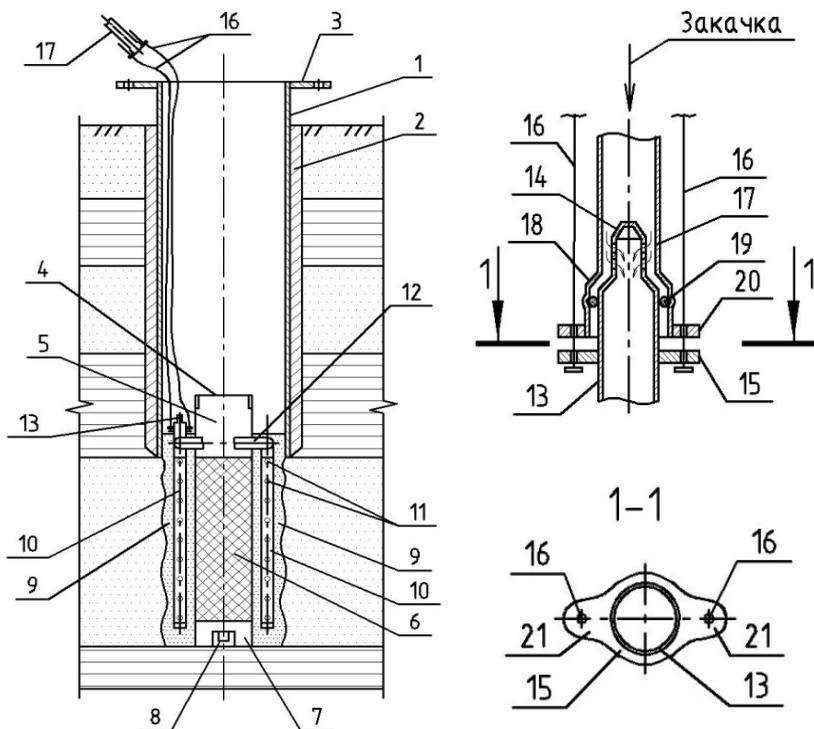
Рисунок 2.3 – Технологическая последовательность бурения скважины с затрубной системой промывки при уширенном контуре гравийной обсыпки

После бурения разведочного ствола и выполнения каротажных работ бурят ствол под кондуктор практически до кровли эксплуатационного водоносного горизонта. Далее в скважину опускают кондуктор и производят затрубную цементацию. Образовавшуюся цементную пробку выбуривают при вскрытии эксплуатационного водоносного горизонта с использованием долота с расширителем, лопасти которого принудительно или под действием центробежных сил раскрываются при выходе под башмак кондуктора. В открытый ствол последовательно опускают фильтровую и эксплуатационную колонны труб, предварительно прикрепив к ним при помощи вращающихся тяг с упорами циркуляционные трубки. После установки

всей колонны на забой скважины, циркуляционные трубки приподнимают вверх до упора, при этом тяги поворачиваются и занимают рабочее положение, близкое к горизонтальному. Затем выполняют фильтрующую засыпку, фиксируя новое (проектное) положение трубок. После производства строительной откачки и дезинфекции скважины определяют положение верхнего уровня фильтрующей засыпки и при необходимости ее досыпают, после чего устраивают глиняный замок, предназначенный для перекрытия пути фильтрации в межтрубном пространстве. Для герметизации межтрубного пространства и закрепления устьев циркуляционных трубок к кондуктору приваривают плиту, а к эксплуатационной колонне – фланец.

Для глубоких скважин, когда установка фильтра на эксплуатационной колонне экономически нецелесообразна, предложена скважина с затрубной системой регенерации при установке фильтра «впотай» (рисунок 2.4).

Технологии бурения типовой и предлагаемой скважин при установке фильтра «впотай» аналогичны. При оборудовании скважины затрубной системой регенерации циркуляционные трубки с кольцевым коллектором и соединительным патрубком крепят к наружной поверхности фильтровой колонны по мере ее опускания на забой. Для подвода рабочей жидкости к затрубной системе при регенерации такой скважины предусматриваются гибкие направляющие, выведенные на поверхность. С помощью направляющих, выполненных в виде двух тонких канатов из нержавеющей стали, заливочную трубу при необходимости соединяют или разъединяют с кольцевым коллектором на глубине.

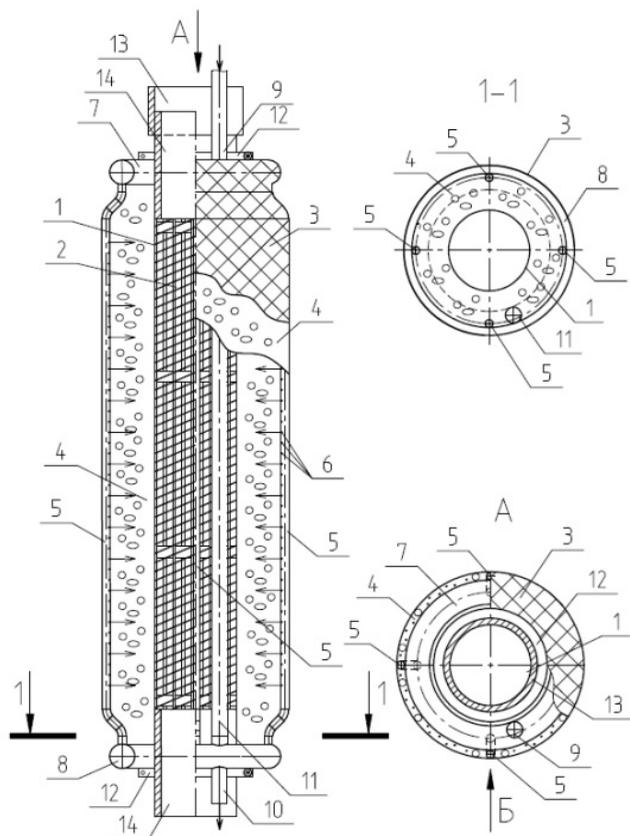


- 1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3 – фланец; 4 – фильтровая колонна;
 5 – эксплуатационная колонная; 6 – рабочая часть фильтра; 7 – отстойник;
 8 – резьбовая муфта; 9 – обсыпка; 10 – циркуляционные трубки;
 11 – перфорация; 12 – кольцевой коллектор; 13 – соединительный патрубок;
 14 – перфорированный наконечник; 15 – упорное кольцо;
 16 – гибкая направляющая; 17 – заливочная труба; 18 – раструб;
 19 – кольцевое уплотнение; 20 – кольцо; 21 – проушина

Рисунок 2.4 – Скважина с затрубной системой регенерации с фильтром «впотаи»

Для водозаборных скважин значительной глубины, когда затруднительно выполнить качественную гравийную обсыпку, а также для каптирования водоносных горизонтов, сложенных мелкозернистыми песками, предложена новая конструкция кожухового фильтра (рисунок 2.5) [77]. Такие фильтры собирают на поверхности в стационарных условиях или на буровой площадке. Каркас фильтра выполняют в виде продольных перфорированных трубок, объединенных коль-

цевыми коллекторами сверху и снизу. Трубчатый каркас служит опорой для сетчатого кожуха, заполняемого фильтрующим материалом, и обеспечивает равномерность выполнения обсыпки.



1 – опорный каркас; 2 – водоприемная поверхность; 3 – сетчатый кожух;
 4 – обсыпка; 5 – циркуляционные трубки; 6 – отверстия; 7, 8 – верхний и нижний
 кольцевой коллекторы; 9 – подводящий трубопровод; 10 – штуцер; 11 – патрубок;
 12 – зажимной хомут; 13 – муфта; 14 – соединительные патрубки

Рисунок 2.5 – Кожуховый фильтр с затрубной системой регенерации

Предложенная конструкция позволяет применять различные типы фильтрующей обсыпки. Учитывая, что частицы гравия имеют развитую шероховатую поверхность, к которой легко прикрепляются

ся отложения и их трудно удалить при реагентной обработке, наиболее перспективным является применение обсыпки в виде стеклянных шариков или керамзитового песка. Гладкая поверхность таких гранул обеспечивает более высокое качество отмывки кольматирующих отложений.

2.2 Гидродинамическая промывка скважин

Для значительной части водозаборных и дренажных скважин характерна недостаточная начальная производительность из-за внесения кольматирующего материала в прифилтровую зону еще в процессе сооружения при бурении вращательным способом с прямой промывкой глинистым, глинисто-карбонатным и сапропелевым растворами. Остатки бурового раствора могут оставаться в прифилтровой зоне на контакте с водовмещающими породами и снижать водопрпускную способность фильтров. Для освоения скважин, оборудованных затрубными системами промывки, а также для регенерации их фильтров, закольматированных пластичными, рыхлыми или пастообразными осадками, поддающимися струйному размыву, предложен способ гидродинамической промывки, когда в затрубную систему непрерывно подают чистую воду и одновременно производят откачку загрязнений из ствола скважины [79, 80]. При регенерации может быть использовано различное соотношение расходов закачки-откачки, однако наиболее предпочтительным является случай, когда расход откачки Q_c превышает расход закачки Q_n в трубчатую систему, что предполагает привлечение для промывки дополнительного расхода $Q_{пл}$ воды из водоносного пласта. Причем забираемый расход воды из пласта не должен быть больше предельного дебита скважины, при котором нарушается суффозионная устойчивость водовмещающих пород пласта, начинается их вынос в гравийную обсыпку и пескование. Теоретические и экспериментальные исследования такой схемы движения жидкости в прифилтровой зоне скважины в литературе отсутствуют, поэтому возникла необходимость в дальнейшем изучении данного вопроса применительно к водозаборным скважинам, оборудованным затрубными системами регенерации.

Водозаборная скважина, устраиваемая в напорном пласте. Рассмотрим установившуюся фильтрацию жидкости в прифилтровой зоне совершенной по степени вскрытия водоносного пласта водозаборной скважины при подаче воды в циркуляционные трубки и одновременной откачке из ствола скважины. Схема к расчету представлена на рисунке 2.6.

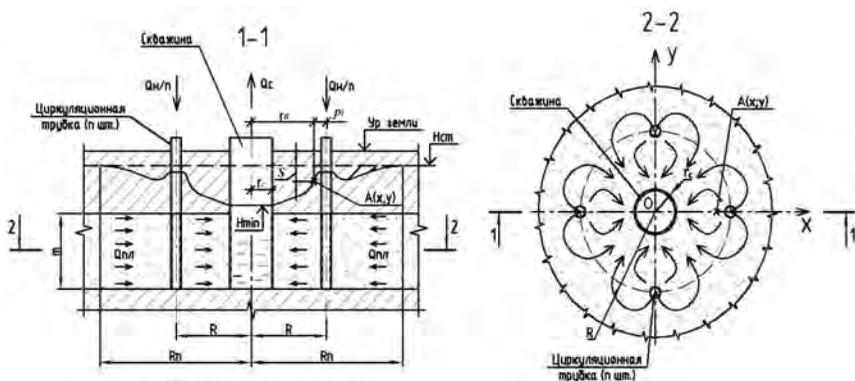


Рисунок 2.6 – Расчетная схема зафилтровой гидродинамической промывки водозаборной скважины в напорном пласте [79]

Введем обозначения: n – количество циркуляционных трубок; которые установлены на внешнем контуре гравийной обсыпки; R – расстояние от оси водозаборной скважины до циркуляционных трубок; m – мощность напорного водоносного пласта; k и k_{ϕ} – коэффициенты фильтрации пласта и прифилтровой зоны соответственно.

Пусть расход, откачиваемый из ствола скважины, превышает суммарный расход воды, подаваемый в циркуляционные трубки, это значит, что некоторая часть расхода будет забираться из водоносного пласта

$$Q_c = Q_n + Q_{пл}, \quad (2.1)$$

где Q_c – расход воды, откачиваемый из водозаборной скважины;
 Q_n – суммарный расход, подаваемый в циркуляционные трубки;
 $Q_{пл}$ – дополнительный расход, отбираемый из водоносного пласта.

Используя метод наложения фильтрационных течений, получим уравнение для расчета изменения пьезометрического уровня S в

любой точке прифильтровой зоны скважины после установления квазиустановившегося движения. Понижение уровня относительно статического уровня определим по уравнению [79]

$$S = (S_o - S_n) + S_{пл} = S' + S_{пл}, \quad (2.2)$$

где S_o – понижение уровня при откачке из скважины расхода Q_c , подаваемого в циркуляционные трубки;

S_n – повышение уровня при закачке в циркуляционные трубки расхода Q_n ;

$S_{пл}$ – понижение уровня при откачке из скважины расхода, дополнительно отбираемого из пласта $Q_{пл}$.

Пусть прифильтровая зона снизила свою проницаемость в результате кольматажа. Кольматаж наиболее интенсивно проявляется в непосредственной близости от водозаборной скважины в области $(R-r_c)$, где r_c – радиус фильтра, R – радиус бурения скважины (радиус внешнего контура гравийной обсыпки, на котором установлены циркуляционные трубки). Таким образом, скважина имеет «кольматационное кольцо» толщиной $(R-r_c)$ со сниженной проницаемостью. Примем допущения: зона кольматации однородная и имеет коэффициент фильтрации k_ϕ ; циркуляционные трубки работают в режиме нагнетательных скважин; скважина и трубки являются совершенными по степени вскрытия напорного водоносного пласта; за пределами зоны кольматации коэффициент фильтрации не изменяется и равен коэффициенту фильтрации пласта k .

Понижение $S_{пл}$ в скважине при наличии «кольматационного кольца» определяем по зависимости [9]

$$S_{пл} = \frac{Q_{пл}}{2\pi km} \left[\ln \frac{R_{II}}{r_a} + \zeta_1 \right], \quad (2.3)$$

где R_{II} – радиус влияния водозаборной скважины;

r_a – расстояние от оси водозаборной скважины до точки, в которой определяется понижение;

ζ_1 – показатель обобщенного сопротивления, обусловленного кольматажом в зоне $(R-r_c)$, определяемый по зависимости [9]

$$\zeta_1 = \left(\frac{k}{k_\phi} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c}. \quad (2.4)$$

Для простейшей лучевой схемы взаимодействия скважин при равенстве расходов закачки и отработки суммарное понижение $S' = S_o - S_n$ после установления квазиустановившегося движения определяем по выражению [81]

$$S' = \frac{Q}{4\pi k_\phi m} \left(\ln \frac{2,25a_0 t}{r_a^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{2,25a_0 t}{\rho_i^2} \right), \quad (2.5)$$

где r_a – расстояние от оси водозаборной скважины радиусом r_c до точки, в которой определяется понижение;

ρ_i – расстояние от i -ой трубки до точки, в которой определяется понижение;

t – время от начала работы системы;

a_o – коэффициент пьезопроводности, характеризующий скорость снижения уровня и осушения пласта.

Введем обозначения $\beta_Q = Q_{\text{пл}}/Q_H$ и $\varepsilon = k_\phi/k$. Принимая $R^2 = 2,25a_0 t$ [9] с учетом (2.3) и (2.4) из (2.2) получим

$$\begin{aligned} S &= \frac{Q_H}{2\pi k_\phi m} \ln \frac{R}{r_a} - \frac{Q_H}{2\pi k_\phi n m} \sum_{i=1}^n \ln \frac{R}{\rho_i} + \frac{Q_{\text{пл}}}{2\pi k m} \left[\ln \frac{R_{II}}{r_a} + \left(\frac{k}{k_\phi} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] = \\ &= \frac{Q_H}{4\pi k_\phi m} \left[\ln \frac{R^2}{r_a^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{R^2}{\rho_i^2} + 2\varepsilon\beta_Q \left[\ln \frac{R_{II}}{r_a} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right] = \\ &= \frac{Q_H}{4\pi k_\phi m} \left[-\ln r_a^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \rho_i^2 + 2\varepsilon\beta_Q \left[\ln \frac{R_{II}}{r_a} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right] = \\ &= \frac{Q_H}{4\pi k_\phi m} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{r_a^2} + 2\varepsilon\beta_Q \left[\ln \frac{R_{II}}{r_a} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right]. \quad (2.6) \end{aligned}$$

Для построения гидродинамической сетки фильтрации необходимо в выражении (2.6) перейти от полярных координат к прямоугольным координатам, расположив начало в центре водозаборной скважины, а ось абсцисс, проходящей через n -ую циркуляционную трубку. Тогда имеем следующие соотношения [82]

$$\begin{aligned} r_a^2 &= x^2 + y^2; \quad \rho_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2; \quad x_i = R \cos \alpha_i; \quad y_i = R \sin \alpha_i; \\ \alpha_i &= \frac{2\pi}{n} i, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где x, y – координаты точки, в которой определяется изменение уровня;

x_i, y_i – координаты циркуляционных трубок;

α_i – угол между лучом, проходящим из начала координат через циркуляционную трубку с номером i , и осью абсцисс.

С учетом (2.7) выражение (2.6) приобретает вид

$$\begin{aligned} S(x, y) &= \frac{Q_H}{4\pi k_\phi m} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2}{x^2 + y^2} + \right. \\ &\quad \left. + 2\varepsilon\beta_Q \left[\ln \frac{R_{II}}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Общий вид гидродинамической сетки, построенной по выражению (2.8), представлен на рисунке 2.7, а.

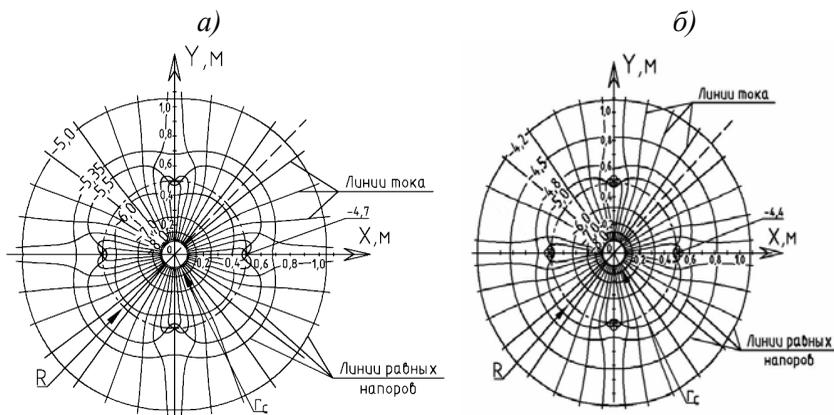


Рисунок 2.7 – Гидродинамические сетки фильтрации ($n=4; R=0,5 \text{ м}; m=10 \text{ м}; h_e=10 \text{ м}; Q_n=Q_{пл}=0,006 \text{ м}^3/\text{с}; k_{\phi}=k=0,0001 \text{ м/с}; R_n=200 \text{ м}; r_c=0,1 \text{ м}; \beta_Q=1; \varepsilon=1$):
a – скважина в напорном пласте; *б* – скважина в безнапорном пласте

Водозаборная скважина в безнапорном пласте. Рассмотрим установившуюся фильтрацию жидкости в прифильтровой зоне скважины, пробуренной в безнапорном пласте. Расчетная схема при закачке – откачке воды в системе циркуляционные трубки – скважина представлена на рисунке 2.8.

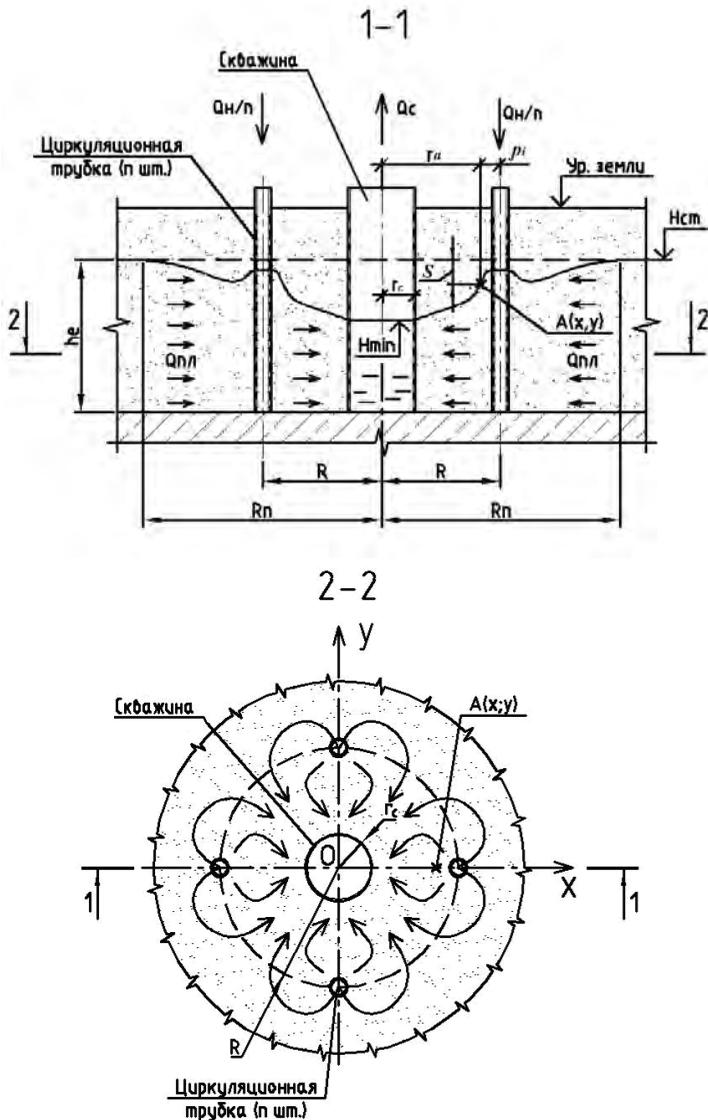


Рисунок 2.8 – Расчетная схема затрубной гидродинамической промывки фильтра скважины в безнапорном пласте [79]

Примем следующие допущения: зона кольматации однородная, кольцевая и имеет постоянный сниженный коэффициент фильтрации k_ϕ ; циркуляционные трубки работают в режиме нагнетательных скважин; за пределами зоны кольматации коэффициент фильтрации не изменяется и равен коэффициенту фильтрации пласта k .

Баланс расходов и напоров описывается выражениями (2.1) и (2.2).

Для получения уравнения, описывающего процесс совместной работы скважины и циркуляционных трубок, используем линеаризованное по методу Н.А. Багрова и Н.Н. Веригина уравнение Буссинеска для расчета неустановившегося движения грунтовых вод со свободной поверхностью [21]

$$a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (2.9)$$

где $U = \frac{1}{2} (h_e^2 - h^2)$;

h_e – статическая глубина грунтовых вод;

h – мощность потока грунтовых вод в точке пласта с координатой r в момент времени t .

Процесс будем считать квазиустановившимся с обеспечением равенства расходов закачки и откачки. Тогда $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$, и уравнение (2.9) приобретает вид

$$\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} = 0. \quad (2.10)$$

Зададим граничные условия

$$Q = -2\pi r k_\phi \frac{dU}{dr} \Big|_{r=r_0}, \quad (2.11)$$

$$U(r) = 0 \text{ при } r \geq R, \quad (2.12)$$

где R – радиус влияния скважины.

Из уравнения (2.10) имеем

$$\frac{dU}{dr} = \frac{C_1}{r}. \quad (2.13)$$

Из условия (2.11) находим $C_1 = -\frac{Q}{2\pi k_\phi}$, $\frac{dU}{dr} = -\frac{Q}{2\pi k_\phi r}$.

Тогда $U = -\frac{Q}{2\pi k_\phi} \ln r + C_2$ и $C_2 = \frac{Q}{2\pi k_\phi} \ln R$.

Окончательно получим для $r \leq R$

$$U = \frac{Q}{2\pi k_\phi} \ln \frac{R}{r}, \quad h^2 = h_e^2 - \frac{Q}{\pi k_\phi} \ln \frac{R}{r},$$

$$h = \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{\pi k_\phi} \ln \frac{R}{r}} = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{\pi k_\phi} \ln \frac{r}{R}}. \quad (2.14)$$

Таким образом, с учетом (2.14) имеем уравнение для определения понижения уровня грунтовых вод S_0 в любой точке пласта, вызванного работой скважины (откачка расхода Q_n)

$$S_0 = h_e - h = h_e - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q_n}{\pi \cdot k_\phi} \ln \frac{r}{R}}, \quad r \leq R. \quad (2.15)$$

Уравнение для определения повышения уровня грунтовых вод в любой точке пласта на расстоянии ρ от циркуляционной трубки при работе одной трубки, работающей в режиме нагнетания, с учетом того, что расход Q_n равномерно распределяется между n циркуляционными трубками аналогично уравнению (2.15) и имеет вид

$$S_n = h_e - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q_n}{n \cdot \pi \cdot k_\phi} \ln \frac{\rho}{R}}. \quad (2.16)$$

Уравнение для определения понижения уровня грунтовых вод $S_{\text{пл}}$ в любой точке пласта, вызванного работой скважины со сниженной проницаемостью в зоне $(R-r_c)$ при заборе воды из пласта в количестве $Q_{\text{пл}}$, имеет вид

$$S_{\text{пл}} = \left[h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q_{\text{пл}}}{\pi \cdot k} \left(\ln \frac{R_{\text{II}}}{r_a} + \zeta_1 \right)} \right]. \quad (2.17)$$

Используем принцип наложения фильтрационных течений и определим понижение S в точке при работе n циркуляционных труб. Согласно (2.2) с учетом (2.4) получим

$$S = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q_H}{2\pi \cdot k_{\Phi}} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{R^2}} - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q_H}{2\pi \cdot k_{\Phi}} \ln \frac{r_a^2}{R^2}} + \left[h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q_{\text{пл}}}{\pi \cdot k} \left[\ln \frac{R_{\text{II}}}{r_a} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right]} \right]. \quad (2.18)$$

В декартовых координатах согласно (2.7) выражение (2.18) имеет вид

$$S(x, y) = \sqrt{h_e^2 + \frac{\bar{Q}}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2}{R^2}} - \sqrt{h_e^2 + \bar{Q} \cdot \ln \frac{x^2 + y^2}{R^2}} + \left[h_e - \sqrt{h_e^2 - 2\varepsilon \cdot \beta_Q \cdot \bar{Q} \cdot \left[\ln \frac{R_{\text{II}}}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right]} \right], \quad (2.19)$$

где $\bar{Q} = Q_H / 2\pi k_{\Phi}$.

Общий вид гидродинамической сетки в прифильтровой зоне скважины в безнапорном пласте при ее промывке представлен на рисунке 2.7, б. По гидродинамической сетке можно определить местную скорость фильтрации в любой точке гравийной обсыпки скважины. Анализ построенных сеток показывает, что вблизи фильтра скважины линии равных напоров представляют собой кон-

центрические окружности, расстояние между которыми убывает по мере приближения к наружной поверхности фильтра, что указывает на существенный рост градиентов напора. Одновременно возрастает средняя скорость в этих цилиндрических сечениях, совпадающих с линиями равных напоров (скорость определяют как суммарный расход, деленный на площадь соответствующего сечения).

2.3 Циркуляционная реагентная промывка скважин, пробуренных в напорных водоносных пластах

Для промывки фильтров скважин, закольматированных цементированными прочными отложениями, предложен способ зафильтровой циркуляционной реагентной промывки, когда в затрубную систему непрерывно подают свежий раствор реагента и одновременно производят его откачку вместе с продуктами реакции из ствола скважины, производя циркуляцию реагента в системе бак-затрубная система-скважина-бак. При этом фильтрационный поток реагента в пласте должен иметь такие параметры, чтобы обеспечить равномерное растворение и удаление отложений во всей закольматированной прифильтровой зоне и на фильтре. В общем случае параметры фильтрационного потока (скорость фильтрации и напор в заданной точке прифильтровой зоны) зависят от ряда факторов: количества циркуляционных трубок, их расстояний от водозаборной скважины, циркуляционного расхода, мощности пласта и коэффициента фильтрации грунта [81].

Рассмотрим гидродинамику движения фильтрационного потока жидкости от нескольких циркуляционных трубок, работающих в режиме закачных скважин, расположенных в вершинах правильного многоугольника, к одной откачной (водозаборной) скважине, находящейся в центре многоугольника. Примем следующие допущения: зона кольматации однородная и имеет постоянный сниженный коэффициент фильтрации $k_{\text{ф}}$; циркуляционные трубки работают в режиме нагнетательных скважин; скважина и трубки являются совершенными по степени и характеру вскрытия напорного водоносного пласта.

Пусть водозаборная скважина вскрывает напорный водоносный горизонт и применяемый для ее циркуляционной реагентной регенерации раствор незначительно отличается по физическим свой-

вам от подземных вод. В момент времени $t=0$ начинается откачка из водозаборной скважины с расходом $Q=Q_c$, с того же момента времени в каждую из n циркуляционных трубок начинает поступать расход раствора Q_n/n , причем $Q=Q_c=Q_n$. В части пласта, примыкающего к водозаборной скважине, формируется депрессия, а у циркуляционных трубок – репрессия. Для напорного пласта установившийся режим фильтрации наступает практически мгновенно.

Расчетная схема циркуляционного движения в системе водозаборная скважина - циркуляционные трубки представлена на рисунке 2.9.

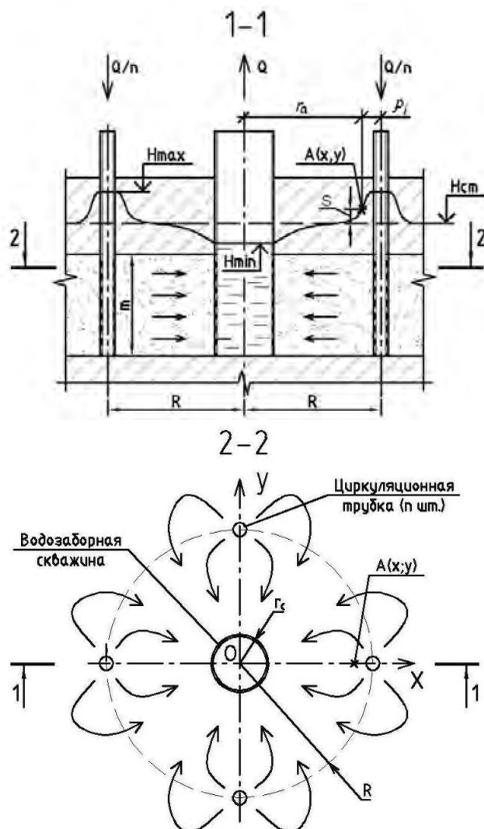


Рисунок 2.9 – Расчетная схема циркуляционного движения в системе водозаборная скважина - циркуляционные трубки

Для расчета необходимых расходов закачки и откачки необходимо построить гидродинамическую сетку фильтрации, которая позволит определить напор в любой точке прифилтровой зоны и в циркуляционных трубах, а также направление и скорость фильтрации раствора. Применительно к целям геотехнологических методов добычи полезных ископаемых, такая задача частично рассматривалась в работе [82].

Для лучевой схемы взаимодействия скважин при циркуляционной регенерации общее уравнение для расчета изменения уровня в любой точке прифилтровой зоны после установления квазиустановившегося движения, полученное из баланса напоров $S=S'=S_o-S_n$, имеет вид [82]

$$S = \frac{Q}{4\pi k_{\phi} m} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{r_a^2}, \quad (2.20)$$

где r_a ; ρ_i ; n ; m ; k_{ϕ} – то же, что в разделе 2.2.

Для построения гидродинамической сетки перейдем от полярных координат к прямоугольным, расположив начало в центре водозаборной скважины, а ось абсцисс, проходящей через n - ую циркуляционную трубку. Тогда, с учетом выражений (2.7) уравнение (2.20) приобретает вид

$$S = \frac{Q}{4\pi k_{\phi} m} \left(-\ln(x^2 + y^2) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left[(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2 \right] \right). \quad (2.21)$$

При $r_a=r_c$ и $\rho_i=R$ выражение (2.20) принимает вид формулы Дюпюи, по которой можно найти понижение в скважине

$$S = \frac{Q}{2\pi k_{\phi} m} \ln \frac{R}{r_c}. \quad (2.22)$$

Отсюда можно решить обратную задачу – найти расход Q откачки при заданном понижении S откачной скважины

$$Q = \frac{2\pi k_{\phi} m S}{\ln(R/r_c)}. \quad (2.23)$$

Задаваясь координатами x и y строим гидродинамическую сетку для водозаборной скважины с затрубной системой из четырех циркуляционных трубок при следующих исходных данных: трубки располагаются на расстоянии $R=0,5$ м от оси откачной скважины; проницаемость пласта $k_{\phi}m=10^{-3}$ м²/с; расход жидкости, откачиваемый из скважины $Q=0,006$ м³/с=21,6м³/час. Исходные данные подставляем в уравнение (2.21) и определяем изменение напора S в точке с заданными координатами. Построенная гидродинамическая сетка и пьезометрическая линия по профилю OX представлены на рисунке 2.10.

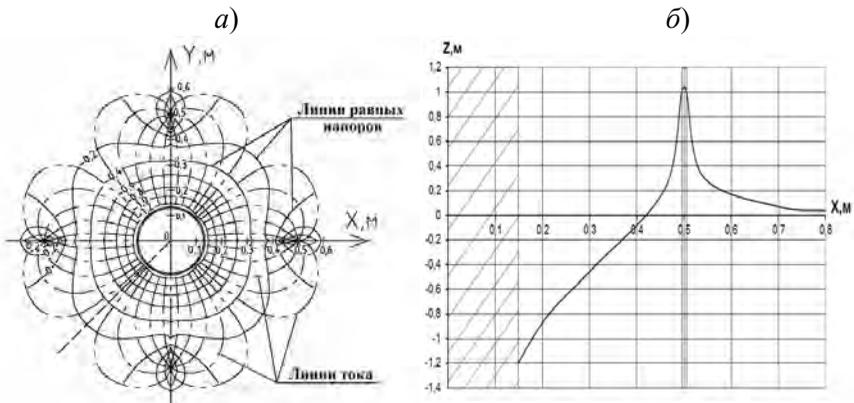


Рисунок 2.10 – Теоретические данные ($n=4$; $R=0,5$ м; $k_{\phi}m=10^{-3}$ м²/с; $Q=0,006$ м³/с):
 а – гидродинамическая сетка; б – график изменения напора в профиле OX [81]

Так как циркуляционные трубки располагаются симметрично относительно водозаборной скважины, гидродинамическая сетка является также симметричной. Цифры на линиях равных напоров гидродинамической сетки (см. рисунок 2.10) соответствуют значениям пьезометрических напоров.

2.4 Исследование циркуляционной реагентной регенерации скважин, пробуренных в безнапорных пластах

Как водозаборные, так и дренажные скважины подвержены процессам кольматажа, что существенно снижает срок их службы. Для увеличения ремонтпригодности и долговечности скважин, устраиваемых в безнапорных водоносных пластах, на этапе бурения скважины следует оборудовать затрубными системами промывки. При циркуляционной реагентной промывке таких скважин раствор реагента подается в затрубную систему и циркулирует в системе бак-затрубная система-скважина-бак. Теоретические и экспериментальные исследования такой схемы циркуляции промывочной жидкости в прифильтровой зоне скважины в литературе отсутствуют. Поэтому возникла необходимость в дальнейшем изучении циркуляционного движения в безнапорном пласте с целью обоснования оптимальных конструктивных параметров затрубной системы промывки.

Гидродинамика фильтрационного потока жидкости. Рассмотрим гидродинамику фильтрационного потока жидкости при совместной работе водозаборной скважины в безнапорном пласте и нескольких циркуляционных трубок, работающих в режиме нагнетательных скважин и расположенных симметрично вокруг водозаборной скважины. Расчетная схема фильтрационного потока в системе скважина - трубки представлена на рисунке 2.11.

Примем следующие допущения: циркуляционные трубки работают в режиме нагнетательных скважин; скважина и трубки являются совершенными по степени и характеру вскрытия водоносного пласта; зона кольматации однородная и имеет постоянную сниженную проницаемость.

Для получения общего уравнения для расчета изменения уровня грунтовых вод в любой точке безнапорного водоносного горизонта при циркуляции после наступления квазиустановившегося движения используется метод наложения фильтрационных течений.

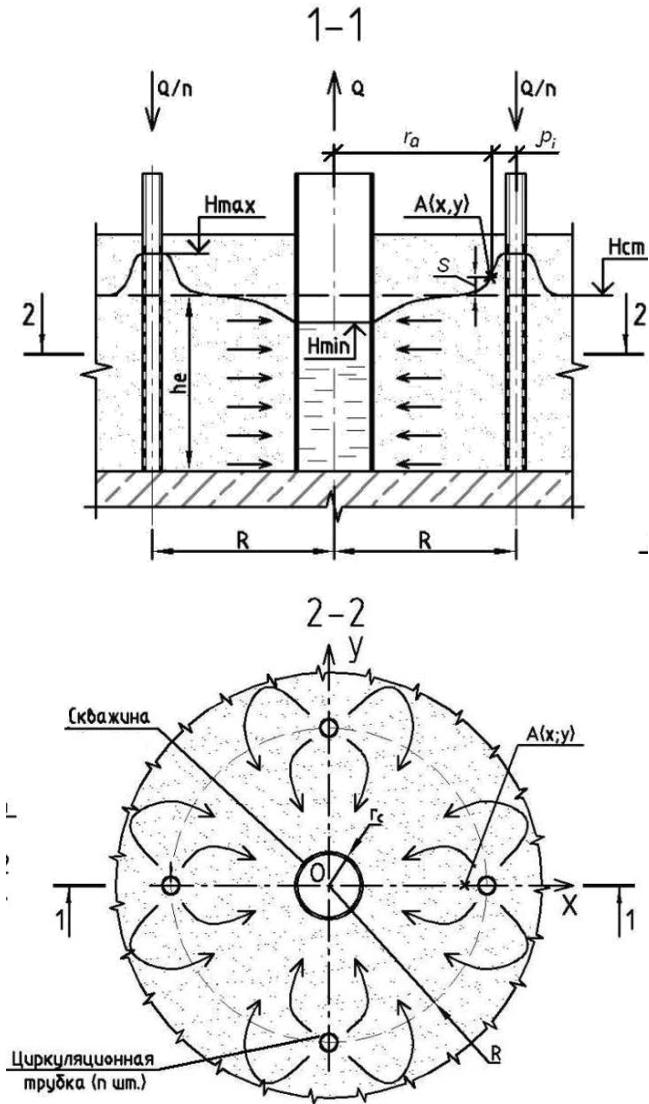


Рисунок 2.11 – Расчетная схема циркуляционного движения в безнапорном пласте в системе скважина - циркуляционные трубки

Понижение уровня воды в любой точке прифильтровой зоны скважины относительно статического уровня определим из уравнения баланса напоров

$$S = S_o - S_n . \quad (2.24)$$

Подставив выражения (2.15) и (2.16) в уравнение (2.24) для n циркуляционных трубок получим

$$S = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2\pi \cdot k_\phi \cdot n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{R^2}} - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2\pi \cdot k_\phi} \ln \frac{r_a^2}{R^2}} . \quad (2.25)$$

Для выполнения практических расчетов перейдем к прямоугольным координатам с началом в центре скважины и осью абсцисс, проходящей через n -ую циркуляционную трубку. С учетом выражений (2.7) и (2.25) получаем

$$S(x, y) = A - B , \quad (2.26)$$

где

$$A = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_\phi \cdot n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2}{R^2}} ,$$

$$B = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k_\phi} \cdot \ln \frac{x^2 + y^2}{R^2}} .$$

Зависимость (2.26) позволяет построить гидродинамическую сетку фильтрации в безнапорном пласте для скважины, оборудованной затрубной системой промывки [83]. Примеры построения гидродинамической сетки и пьезометрической линии по профилю OX при $R=0,5$ м; $h_e=10$ м; $Q=0,006$ м³/с; $k_\phi=0,1$ мм/с для четырехтрубной и шеститрубной систем представлены на рисунках 2.12 и 2.13.

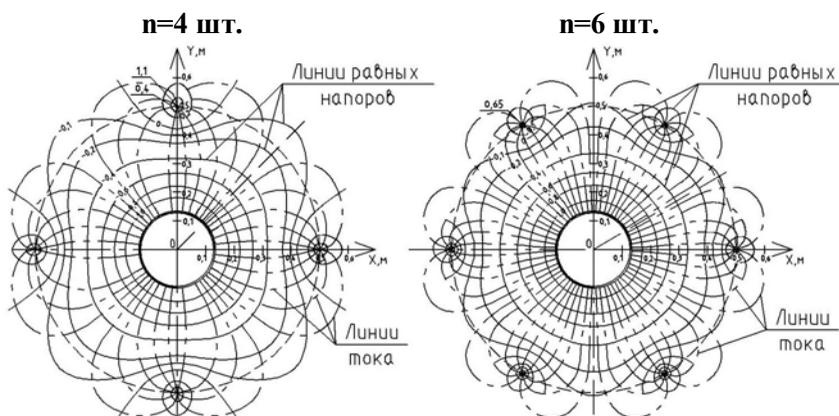


Рисунок 2.12 – Гидродинамические сетки фильтрации при циркуляционной реагентной промывке скважин в безнапорном пласте, оборудованных затрубными системами с различным количеством трубок ($R=0,5$ м; $h_e=10$ м; $Q=0,006$ м³/с; $k_f=0,1$ мм/с)

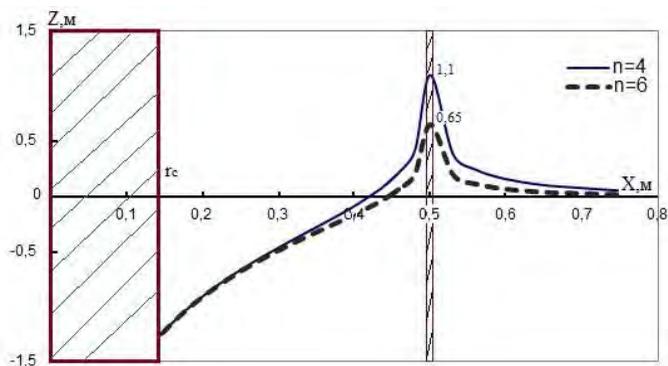


Рисунок 2.13 – Теоретический график изменения напора по главной линии тока между скважиной в безнапорном пласте и циркуляционной трубкой

Анализ гидродинамических сеток, построенных для скважин, пробуренных в напорном и безнапорном пластах, показывает их значительное сходство (см. рисунки 2.10 и 2.12). На периферийных участках зоны кольматации ширина поясов сетки, кривизна и длина линий тока, выходящих из циркуляционных трубок, наибольшая. Это свидетельствует о том, что скорость фильтрационного потока

вдоль этих линий меньше чем по главной линии тока (в профиле ОХ), т.е. периферийные сегменты зоны кольматации, лежащие между циркуляционными трубками, будут выщелачиваться медленнее, чем участки, лежащие между скважиной и циркуляционной трубкой, так как скорость выщелачивания пропорциональна скорости фильтрации. Отсюда следует, что чем больше затрубная промывная система содержит циркуляционных трубок, тем лучше охват зоны кольматации потоками реагента и меньше время выщелачивания. Однако в этом случае из-за появления дополнительного сопротивления снижается пропускная способность гравийной обсыпки и растет стоимость самой системы. Требуется оптимизация количества циркуляционных трубок.

Обоснование конструктивных параметров затрубной системы промывки. При определении степени влияния количества циркуляционных трубок, входящих в состав затрубной системы регенерации, на величину средней скорости фильтрации в самых неблагоприятных с точки зрения промывки секторах прифилтровой зоны скважины, для каждого значения n (от 2 до 8) строили гидродинамическую сетку. Затем на ней выбирали линию тока, совпадающую с биссектрисой угла (штриховая линия на рисунке 2.12), образующего сектор между двумя соседними циркуляционными трубками. По этой линии тока определяли по формуле Дарси значения скорости фильтрации между соседними линиями равных напоров $u = k_{\phi} \Delta z / \Delta l$, где Δl - расстояние между линиями равных напоров. Как среднее арифметическое, определяли значение скорости \bar{u} на участке $(R-r_e)$ всей линии тока и строили график $\bar{u} = f(n)$ (рисунок 2.14).

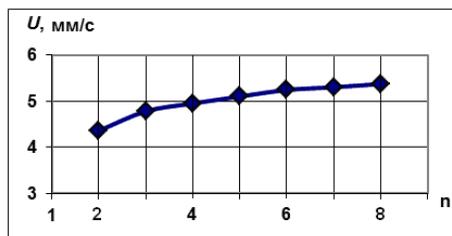


Рисунок 2.14 – График зависимости $\bar{u} = f(n)$ ($R=0,5$ м; $h_e=10$ м; $k_{\phi}=0,1$ мм/с; $Q=0,006$ м³/с)

Из анализа полученного графика следует, что при увеличении числа циркуляционных трубок n средняя скорость фильтрации u в центральной части сектора между циркуляционными трубками возрастает. Это указывает на увеличение скорости растворения коагулирующих отложений в этой зоне. Однако, интенсивность роста средней скорости u с ростом числа циркуляционных трубок n неодинакова: при увеличении n в диапазоне от 2 до 4 значение u возрастает на 13,2%, с ростом n от 4 до 6 значение u возрастает на 5,6%, а с ростом n от 6 до 8 наблюдается рост u только на 2,4%. Отсюда следует, что количество циркуляционных трубок следует рекомендовать в диапазоне от $4 \leq n \leq 6$. При меньшем количестве трубок поле скоростей промывного потока крайне неоднородно. С увеличением количества циркуляционных трубок охват зоны коагуляции потоками реагента улучшается незначительно при одновременном увеличении стоимости затрубной системы промывки.

При проектировании затрубных систем рекомендуется применять циркуляционные трубки с большим сопротивлением фильтровой части, т.к. за счет этого достигается равномерность распределения промывной жидкости по всей длине трубок. Аналогичные распределительные системы большого сопротивления широко применяются в системах водоподготовки при промывке скорых фильтров [84].

Для затрубной системы регенерации общую площадь отверстий фильтровой части циркуляционных трубок рекомендуется принимать равной $\eta_o = 0,25 \dots 0,3$ % площади фильтра [84]. Размеры проходных отверстий зависят в основном от фракционного состава грунтов, контактирующих с фильтром и формы отверстий [13]. Для дырчатых фильтров диаметры круглых отверстий $d_{отв}$ подбирают на основании данных о гранулометрическом составе водовмещающих пород и гравийной обсыпки скважины. Диаметр отверстий может быть принят равным $d_{отв} = (2 \dots 3)d_o$, где d_o – расчетный диаметр зерен гравийной обсыпки, принимаемый для однородных грунтов как средний [13, 85].

Выводы по главе 2

1. Рассмотрены конструкции разработанных в БНТУ скважин с затрубными системами промывки: с фильтром на сплошной колонне; с фильтром, устанавливаемым «впотаи»; с уширенным контуром гравийной обсыпки; с кожуховым фильтром.

2. Получены зависимости (2.8) и (2.19) для расчета полей пьезометрических напоров, возникающих при затрубной безреагентной гидродинамической промывке прифилтровых зон скважин со сниженной водопроницаемостью, пробуренных в напорном и безнапорном водоносных пластах. Полученные выражения позволяют при различных соотношениях расходов закачки и откачки определить параметры промывного фильтрационного потока (скорости и градиенты напора), обеспечивающих эффективное удаление рыхлых отложений из гравийной обсыпки.

3. Рассмотрены основные закономерности циркуляционного движения раствора реагента в прифилтровых зонах регенерируемых скважин, пробуренных в напорном и безнапорном пластах, создаваемого путем подачи реагента в затрубную систему с одновременной откачкой из ствола скважины профильтровавшегося раствора. Выражения (2.21) и (2.26) позволяют определить понижения пьезометрического уровня в любой точке прифилтровой зоны скважины и построить гидродинамическую сетку фильтрационного потока, необходимую для нахождения скорости движения реагента в «кольматационном кольце» и подбора насосного оборудования.

4. Для водозаборных скважин, сооружаемых в безнапорных водоносных пластах, на основании анализа построенных гидродинамических сеток при $Q = const$, $k = const$ и $h_e = const$ из условий обеспечения равномерной промывки гравийной обсыпки приведено обоснование конструктивных параметров затрубной системы регенерации, количества и размещения циркуляционных трубок, входящих в ее состав. Рекомендовано симметричное размещение трубок на внешней границе гравийной обсыпки в количестве от 4 до 6 шт.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ КОЛЬМАТИРУЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ С ЗАТРУБНОЙ СИСТЕМОЙ ПРОМЫВКИ

При регенерации скважин, оборудованных затрубными системами промывки, реагент может подаваться по циркуляционным трубкам непосредственно в гравийную обсыпку. Реагентные обработки здесь могут осуществляться способами поэтапных закачек реагента и циркуляционной реагентной промывки. Тот или иной способ обработки назначается в зависимости от возраста скважины, степени снижения ее дебита, а также физико-химических свойств кольматирующих отложений. При кольматаже скважин величина удельного объема отложений b , как правило, не превышает значения $0,5n_0$ [4].

В процессе декольматации скважин реагентным методом с помощью затрубной системы промывки можно условно выделить три характерных этапа:

1. Заливка реагента в затрубную систему.
2. Проникновение реагента в прискважинную зону.
3. Растворение кольматанта в прискважинной зоне в режимах «реагентной ванны» (статические условия) или циркуляционной реагентной промывки.

Для практических расчетов процесса декольматации можно ограничиться только третьим этапом, так как здесь скорость растворения кольматирующих отложений значительно выше, чем при первых двух.

3.1 Исследование процесса регенерации скважин способом поэтапных закачек реагента

Рассмотрим режим обработки скважин – «реагентную ванну», когда перемещения реагента относительно поверхности зерен гравийной обсыпки не наблюдается [86]. Для описания кинетики растворения кольматирующих отложений используем известные уравнения (1.5) и (1.6), при этом учтем долю нерастворимых соединений в составе кольматанта и эффект экранизации поверхности зерен грунта пузырьками газа. Экранизация поверхности проявляется, в частности, при наличии в составе кольматанта соединений кальция

(карбонатов), при взаимодействии которых с соляной кислотой образуется углекислый газ CO_2 , создающий газовый кольтатаж. При наличии нерастворимых соединений в составе отложений, активная поверхность также уменьшается. Такими соединениями могут быть, например, частицы мелкого песка, выносимого из пласта и налипающего на кольтатант, а также сульфаты и сульфиды металлов, нерастворяемые реагентом, например, дитионитом натрия.

Суммарную поверхность ω_0 зерен шаровой формы диаметром d_0 в единице объема определяем по формуле [87]

$$\omega_0 = 6(1 - n_0) / d_0. \quad (3.1)$$

Введем в выражение (3.1) понижающие коэффициенты η и ζ , учитывающие соответственно степень экранизации поверхности зерен пузырьками газа и долю нерастворимых соединений в составе кольтатанта. Тогда получим

$$\omega_0 = 6\eta \cdot \zeta \frac{(1 - n_0)}{d_0}. \quad (3.2)$$

Систему двух уравнений (1.5) и (1.6) решаем при следующих начальных условиях

$$b(0) = N_0; C(0) = C_0, \quad (3.3)$$

где N_0 – удельный объем кольтатирующих отложений, находящихся в порах гравийной обсыпки скважины до ее обработки;

C_0 – концентрация солей кольтатанта, растворенных в реагенте перед началом обработки прискважинной зоны.

Проинтегрировав (1.6), получим: $n_k \cdot C = \rho_{oc} \cdot n_k + C_1(const)$. Так как из начальных условий (3.3) $C_1 = (n_0 - N_0) \cdot (C_0 - \rho_{oc})$, то

$$C = C(b) = \rho_{oc} - \frac{(n_0 - N_0) \cdot (\rho_{oc} - C_0)}{n_0 - b}. \quad (3.4)$$

Решая уравнение $C(b) = C_m$,

находим

$$b_{\text{крит}} = N_0 - \frac{(n_0 - N_0) \cdot (C_m - C_0)}{\rho_{oc} - C_m}. \quad (3.5)$$

Соотношения (3.4) и (3.5) показывают, что система уравнений (1.5) - (1.6) имеет стационарное решение $\begin{cases} b \equiv b_{\text{крит}} \\ C \equiv C_m \end{cases}$, которое притягивает решение задачи (1.5)-(1.6), (3.3) при $t \rightarrow \infty$, т.е. $\lim_{t \rightarrow \infty} b(t) = b_{\text{крит}}$; $\lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = C_m$, при этом $b(t)$ монотонно убывает, а $C(t)$ монотонно возрастает.

Используя (3.4), положим $g(b) = C_m - C(b) = \frac{B_z + b \cdot D_z}{n_0 - b}$, где $B_z = n_0 \cdot (C_m - C_0) + N_0 \cdot (C_0 - \rho_{oc})$; $D_z = \rho_{oc} - C_m$. Тогда уравнение (1.5) примет вид $\frac{db}{dt} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} \cdot f(b) \cdot g(b)$. Его частный интеграл, соответствующий начальным условиям (3.3), имеет вид

$$\int_{N_0}^b \frac{ds}{f(s) \cdot g(s)} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} \cdot t, \quad b > b_{\text{крит}}. \quad (3.6)$$

Обозначим неопределенный интеграл $\int \frac{(n_0 - b)db}{\sqrt[3]{1 + \alpha \cdot b \cdot (B_z + bD_z)}} = I_6$.

Делаем замену $1 + \alpha b = s^3$. Тогда $b = \frac{s^3 - 1}{\alpha}$, $db = \frac{3}{\alpha} s^2 ds$,

$$\frac{n_0 - b}{B_z + b \cdot D_z} = \frac{\alpha \cdot n_0 + 1 - s^3}{(\alpha \cdot B_z - D_z) + D_z \cdot s^3} = \frac{\alpha - s^3}{l^3 + (m_z \cdot s)^3}, \quad \text{где}$$

$$l = \sqrt[3]{\alpha \cdot B_z - D_z} < 0; \quad m_z = \sqrt[3]{D_z} > 0,$$

получаем

$$I_b = \frac{3}{\alpha} \int \frac{\alpha \cdot s - s^4}{l^3 + (m_z \cdot s)^3} ds = \frac{3}{\alpha} \int \left[-\frac{s}{D_z} + \left(\alpha + \alpha \frac{B_z}{D_z} - 1 \right) \frac{s}{l^3 + m_z \cdot s^3} \right] ds =$$

$$= -\frac{3s^2}{2\alpha \cdot D_z} + \frac{3}{\alpha} \left(\alpha + \alpha \frac{B_z}{D_z} - 1 \right) \cdot \int \frac{s \cdot ds}{l^3 + m_z^3 \cdot s^3}.$$

После преобразований имеем:

$$I_b = -\frac{3s^2}{2\alpha \cdot D_z} + \frac{1}{\alpha \cdot l \cdot m_z^2} \left[-\ln|l + m_z s| + \frac{1}{2} \ln(m_z^2 \cdot s^2 - m_z \cdot l \cdot s + l^2) + \right. \\ \left. + \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} \frac{2m_z \cdot s - l}{l \cdot \sqrt{3}} \right] \times \\ \times \left(\alpha + \alpha \frac{B_z}{D_z} - 1 \right), \text{ где } s = \sqrt[3]{1 + \alpha \cdot b}.$$

Преобразуем

$$\alpha - 1 + \alpha \frac{B_z}{D_z} = \frac{n_0}{1 - n_0} + \alpha \frac{n_0 \cdot (C_m - C_0) + N_0 \cdot (C_0 - \rho_{oc})}{\rho_{oc} - C_m} = \alpha \frac{(n_0 - N_0) \cdot (\rho_{oc} - C_0)}{\rho_{oc} - C_m}.$$

Обозначим

$$F(b) = C_2 \cdot s^2 + C_3 \cdot \left[\ln \frac{\sqrt{m_z^2 \cdot s^2 - m_z \cdot l \cdot s + l^2}}{|l + m_z \cdot s|} + \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} \frac{2m_z \cdot s - l}{l \cdot \sqrt{3}} \right], \Gamma$$

$$\text{де } C_2 = -\frac{3}{2\alpha \cdot D_z}, s = \sqrt[3]{1 + \alpha \cdot b}, \quad C_3 = \frac{1}{l \cdot m_z^2} \cdot \frac{(n_0 - N_0) \cdot (\rho_{oc} - C_0)}{\rho_{oc} - C_m}$$

(значения m_z и l указаны выше).

С учетом (3.4) и (3.6) получаем точное решение системы уравнений (1.5) и (1.6) при начальных условиях (3.3), описывающих кинетику растворения кольматанта в прискважинной зоне с учетом изменения структуры пористой среды

$$\begin{cases} F(b) - F(N_0) = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} \cdot t, & b > b_{\text{крит}}, \\ C = \rho_{oc} - \frac{(n_0 - N_0) \cdot (\rho_{oc} - C_0)}{n_0 - b}. \end{cases} \quad (3.7)$$

$$C = \rho_{oc} - \frac{(n_0 - N_0) \cdot (\rho_{oc} - C_0)}{n_0 - b}. \quad (3.8)$$

Отметим, что $F(b_{\text{крит}}) = -\infty$. Это означает, что решение $b(t)$ упадет в $b_{\text{крит}}$ за бесконечное время. Поэтому имеет смысл ограничиться промежутком времени $T_{\text{фин}}$, за который будет достигнуто равенство $C/C_m = K$ (заданная величина, $K = 0,995 - 0,999$, т.е. отклонение C от C_m составит 0,5-0,1 %).

Используя (3.8), находим из соотношения $C(b) = K \cdot C_m$ значение

$$b_{\text{фин}} = \frac{N_0 \cdot (\rho_{oc} - C_0) - n_0 \cdot (K \cdot C_m - C_0)}{\rho_{oc} - K \cdot C_m}.$$

Тогда из (3.7) следует, что рациональная продолжительность этапа обработки $T_{\text{фин}}$ определяется по выражению

$$T_{\text{фин}} = -\frac{\rho_{oc}}{B_i} [F(b_{\text{фин}}) - F(N_0)]. \quad (3.9)$$

Полученные выражения (3.7), (3.8) и (3.9) позволяют рассчитать, как изменяется в процессе выщелачивания удельный объем кольматирующих отложений $b(t)$ и концентрация солей в реагенте $C(t)$, а также определить рациональную продолжительность этапа обработки $T_{\text{фин}}$ прифилтровой зоны в режиме «реагентной ванны» при различных условиях регенерации.

Анализ расчетных зависимостей показывает, что скорость растворения отложений пропорциональна удельной поверхности кольматанта ω_0 , разности концентраций солей в реагенте ($C_m - C$), коэффициенту диффузии D и обратно пропорциональна диаметру зерен закольматированной обсыпки d_0 и плотности кольматирующих отложений ρ_{oc} . В процессе выщелачивания происходит сначала сравнительно интенсивное уменьшение начального удельного объема

отложений $b = N_0$, а затем с уменьшением величины ($C_m - C$) величина b практически стабилизируется, плавно монотонно убывая до значения $b_{\text{фин}}$. Это подтверждают расчеты, выполненные на ЭВМ.

На рисунке 3.1 представлены графики зависимости $b/N_0 = f(t)$ первого этапа обработки для трех значений крупности частиц грунта ($d_0 = 1,5$ мм; $d_0 = 2,0$ мм; $d_0 = 2,5$ мм), построенные при следующих данных: $b(0) = N_0 = 0,1$; $n_0 = 0,35$; $C(0) = C_0 = 0,1$ кг/м³; $D = 0,5 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $\eta = 0,95$; $\zeta = 0,95$; $C_m = 50$ кг/м³; $\rho_{\text{ос}} = 2200$ кг/м³; $K = C/C_m = 0,995$.

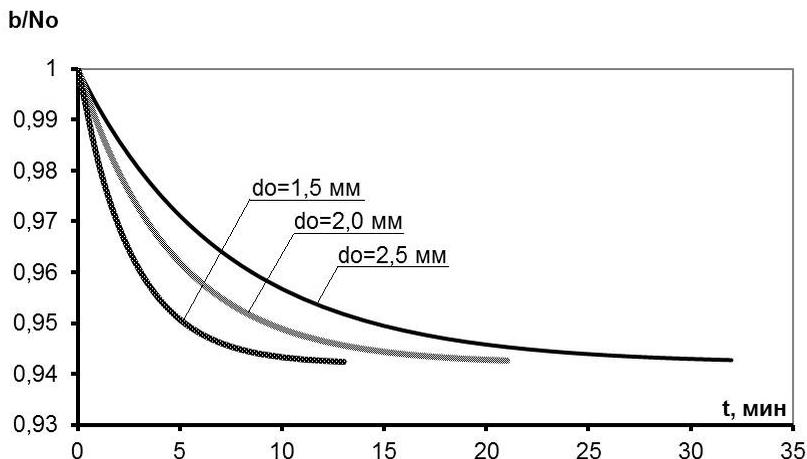


Рисунок 3.1 – Зависимость $b/N_0 = f(t)$ для первого этапа обработки скважины способом поэтапных закачек реагента [86]

Из графиков (см. рисунок 3.1) следует, что остаточный относительный объем отложений в грунте в конце первой обработки составляет $b_{\text{фин1}}/N_0 = 0,945$, в то время как планируемое значение должно составлять не более $b_{\text{фин}}/N_0 = 0,1$. Поэтому чтобы обеспечить нужную степень декольматации, требуются последующие этапы обработки. Невозможность достижения за один прием заливки реагента полной декольматации гравийной обсыпки ($b_{\text{фин}} = N_0$) обусловлена достижением предельной концентрации реагента продуктами реакции, а также сравнительно низкой пористостью закольматированной обсыпки, которая может составлять $n_k = (0,5 \dots 0,8)n_0$,

что не позволяет сюда залить достаточный объем реагента, чтобы растворить все колюматизирующие отложения. Расчеты продолжительности первого этапа обработки $T_{фин1}$ показали, что он составляет менее получаса при обычных скважинных условиях (см. рисунок 3.1). После этого необходимо залить в циркуляционные трубки затрубной системы регенерации свежую порцию реагента, который вытеснит продукты реакции в ствол скважины и заполнит частично промытые поры. Таким образом, расчет следующего $(i+1)$ -ого этапа обработки должен начинаться с учетом достигнутого в предыдущем этапе значения $b_{финi}$. Окончание процесса регенерации можно ограничить периодом времени $T_{фин}^P$, при котором будет достигнуто соотношение $b_{фин}/N_o = 0,1$. Эта цикличность расчетов реализована на ЭВМ.

На рисунке 3.2 представлены графики зависимости $b/N_o = f(t)$ при тех же исходных данных, что и на рисунке 3.1. Здесь точками обозначены границы этапов обработки скважины.

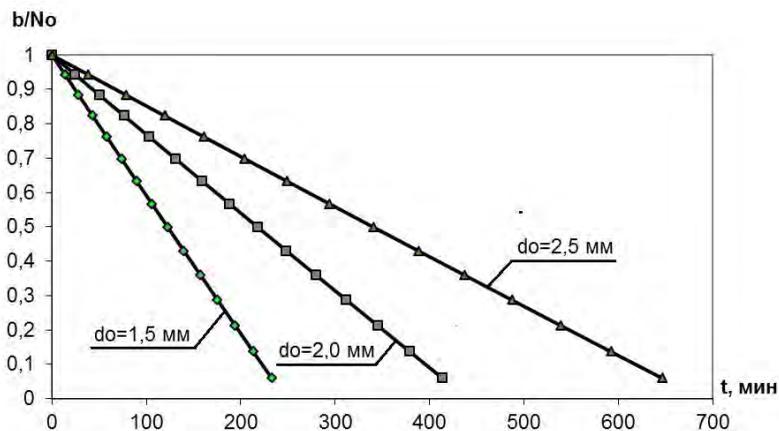


Рисунок 3.2 – Зависимость $b/N_o = f(t)$ для полного цикла обработки скважин способом поэтапных закачек реагента ($b_{фин}/N_o = 0,1$)

Анализ графиков показывает, что остаточный относительный объем отложений b/N_o уменьшается с течением времени и увеличением числа закачек реагента практически по линейной зависимости. Общее время регенерации зависит от крупности частиц гравийной обсыпки и составляет от 4 до 11 часов, а число этапов обработки с продолжительностью 15...30 минут может достигать 14.

3.2 Исследование процесса регенерации скважин способом циркуляционной реагентной промывки

Для удаления цементированных колюматирующих отложений из гравийных фильтров скважин, оборудованных затрубными системами регенерации, наиболее целесообразным является применение способа циркуляционной реагентной промывки. Этот способ позволяет существенно интенсифицировать массообмен между реагентом и колюматантом и ускорить процесс деколюматации. Продолжительность циркуляции реагента является важным технологическим параметром обработки и зависит от ряда факторов: скорости движения реагента в пористой среде, крупности частиц обсыпки, степени колюматации обсыпки и др.

С целью изучения интенсивности деколюматации гравийной обсыпки при создании в нем промывного потока раствора реагента с заданными гидродинамическими параметрами и определения общей продолжительности циркуляционной реагентной обработки скважин рассмотрим физические основы массообмена. В работе [69] рассмотрены гидродинамические условия обтекания жидкостью твердого сферического тела, являющегося моделью твердой дисперсной фазы и наиболее полно отражающего геометрические свойства частиц зернистого слоя. При реагентной промывке в пористой среде создается поток реагента, который обтекает частицы гравия. Гидродинамические условия обтекания сферических тел характеризуются числом Рейнольдса Re . Диффузия в движущейся жидкости ($Re > 0$) описывается дифференциальным уравнением конвективной диффузии. Решение уравнения для обтекания единичного шара имеет вид [69]

$$Nu = A^3 \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re}, \quad (3.10)$$

где A – численная константа, принимаемая в интервале от 0,8 до 0,95;

Nu – критерий Нуссельта;

Pr – критерий Прандтля.

В связи с тем, что точное решение для уравнений конвективной диффузии при обтекании зернистого слоя, составленного из ансамбля шаров, отсутствует, для зернистого слоя рядом исследовате-

лей рекомендуется критериальное уравнение (3.10) при некоторой корректировке значения константы A . При этом делается допущение о том, что на каждой сферической поверхности возникает диффузионный слой, одинаковый для всех поверхностей [69].

Тогда, распространив уравнение (3.10) на зернистый слой, принимая $Re = v'd/v_c$, $v' = v/n_k$, и подставив в уравнение выражения

$$Pr = v_c/D, \quad (3.11)$$

$$Nu = \beta \cdot d/D, \quad (3.12)$$

получим формулу для коэффициента массоотдачи β [4]

$$\beta = \frac{A_1 \cdot D^{2/3}}{v_c^{1/6}} \sqrt{\frac{v}{n_k \cdot d}}, \quad (3.13)$$

где A_1 – численная константа, принимаемая в интервале от 0,76 до 0,996 [4];

v_c – коэффициент кинематической вязкости жидкости;

v – средняя скорость фильтрации жидкости в зернистом слое;

n_k – текущая пористость.

Фильтрация растворов в грунтах при $n_k = n_0 = const$ в условиях их физико-химического взаимодействия описывается для радиального потока в виде объединенного уравнения движения и сохранения массы (в полярной системе координат) [88]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial (rvC)}{\partial r} - \rho_{oc} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (3.14)$$

Здесь v – средняя скорость фильтрации в радиальном сечении радиусом r при нагнетании раствора реагента снаружи контура гравийной обсыпки фильтра, направленная к оси скважины. В условиях квазиустановившегося режима фильтрации при равенстве расхода закачки Q_n и откачки Q_c ($Q = Q_n = Q_c$) скорость фильтрации равна

$$v = \frac{Q}{2\pi m r} = \frac{q}{r}, \quad (3.15)$$

где Q – расход раствора реагента, циркулирующий в системе;

$$q = \frac{Q}{2\pi m} - \text{удельный расход реагента.}$$

Схематизируем закольматированный грунт гравийной обсыпки в виде пористого кольцевого цилиндра с наружным радиусом r_1 и высотой m , равной длине фильтра, совершенной по степени вскрытия напорного пласта скважины [89]. Внутренний радиус цилиндра равен радиусу скважины r_c . Расчетная схема циркуляционной реагентной промывки гравийной обсыпки представлена на рисунке 3.3.

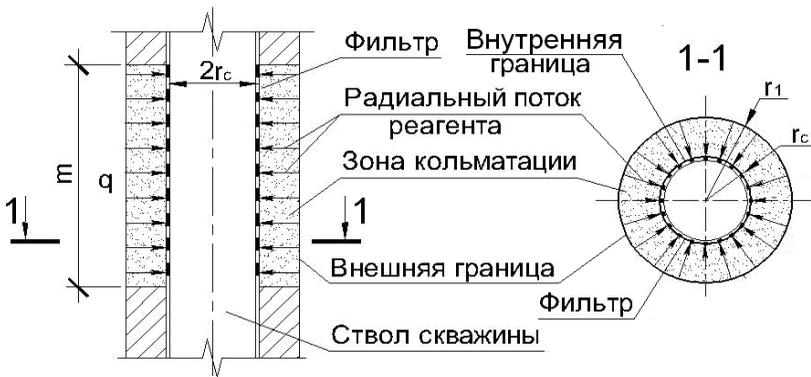


Рисунок 3.3 – Расчетная схема затрубной циркуляционной реагентной промывки гравийной обсыпки скважины в напорном водоносном пласте

Начальная насыщенность грунта кольматантом составляет $b=N_0$. Через наружную боковую поверхность кольцевого цилиндра равномерно по всей высоте подают реагент с расходом Q . Принимаем прифильтровую зону однородной, движение квазиустановившимся. Согласно Н.Н. Веригину [70] при больших значениях критерия Пекле $Pe = v_c \cdot d/D$, когда скорость фильтрации значительно больше скорости диффузии, в первом слагаемом уравнения (3.14) принимают $D=0$.

Уравнение движения и сохранения массы (3.14) и уравнение кинетики (1.5) дают следующую систему уравнений

$$\begin{cases} n_c \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{q}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \rho_{oc} \frac{\partial b}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi \cdot (C_m - C), \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\quad (3.17)$$

где $\Phi = \frac{B_i}{\rho_{oc}} \cdot f(b)$;

n_c – среднее значение пористости грунта.

Вначале используем только уравнение (3.17) для оценки времени T_o , за которое во входном сечении кольцевого цилиндра ($r = r_1$) кольматирующие отложения растворятся ($b = 0$), начиная с момента времени начала подачи реагента. Для нахождения T_o проинтегрируем уравнение (3.17) при $C(t, r_1) \equiv C_0$.

Преобразуем функцию $f(b)$

$$f(b) = \sqrt{\frac{1 + \alpha b}{n_0 - b}} = \sqrt{\frac{1 - (n_0 - b)}{(1 - n_0)(n_0 - b)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - n_0}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_0 - b} - 1}. \quad (3.18)$$

Подставляя (3.18) в (3.17) и получим

$$\int_{N_0}^0 \frac{db}{\sqrt{\frac{1}{n_0 - b} - 1}} = - \frac{B_i}{\rho_{oc} \sqrt{1 - n_0}} \cdot (C_m - C_0) \cdot T_0. \quad (3.19)$$

Вычислив интеграл в левой части (3.19) с помощью замены $\sqrt{\frac{1}{n_0 - b} - 1} = s$, $b = n_0 - \frac{1}{s^2 + 1}$, $db = \frac{2s ds}{(s^2 + 1)^2}$, находим продолжительность полной регенерации T_0 слоя зерен грунта во входном сечении кольцевого цилиндра

$$T_0 = \frac{\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1}{n_0 - N_0} - 1}\right) + (n_0 - N_0)\sqrt{\frac{1}{n_0 - N_0} - 1}}{\frac{B_i}{\rho_{oc}\sqrt{1 - n_0}} \cdot (C_m - C_0)}, \quad (3.20)$$

$$\text{где } B_i = A_1 \left(\frac{D^4}{v_c}\right)^{1/6} \cdot \omega_0 \sqrt{\frac{q}{r_1 \cdot d_0}}.$$

Формула (3.20) дает оценку времени начала уменьшения радиуса «кольматационного кольца».

Разобьем весь процесс регенерации пористого кольца на 2 периода времени. В течение первого периода времени ($t < T_0$) во всем объеме пористого кольца будет сохраняться остаточный кольматант. Во второй период ($t > T_0$) граница между зоной очищенного грунта и загрязненного будет постепенно перемещаться от внешнего контура кольца к внутреннему и в конечный момент времени $T_{\text{кон}}$ достигнет фильтра скважины.

Целесообразно разбить весь период регенерации на ряд фаз последовательного выноса солей из грунта. Продолжительность одной фазы T_{Φ} принимаем постоянной и равной времени прохождения

реагентом участка $(r_1 - r_c)$, т.е. $T_{\Phi} = \frac{r_1^2 - r_c^2}{2q_1}$, где $q_1 = \frac{q}{n_c}$. Будем

считать, что во входное сечение непрерывно подается свежий реагент с начальной концентрацией $C(t, r_1) = C_0$. Реагент по мере движения от внешнего контура насыщается солями и удаляется за пределы пористого кольца через выходное сечение. К концу первой фазы во входном сечении начальный удельный объем отложений N_0 уменьшится и составит $N_{01} = b(T_{\Phi})$, что потребует при последующем расчете 2-ой фазы изменения граничных условий на внешнем контуре пористого кольца и т.д.

Для упрощения расчетов функцию $f(b)$ будем определять при среднем удельном объеме отложений b_c , тогда система уравнений (3.16)-(3.17) для расчета реагентной циркуляционной промывки примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} n_c \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{q}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \Phi_c \rho_{oc} (C_m - C) = 0, \end{array} \right. \quad (3.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi_c (C_m - C), \end{array} \right. \quad (3.22)$$

где $\Phi_c = \frac{B_i}{\rho_{oc}} \cdot f(b_c)$. Начальные и граничные условия

$$b(0, r) = N_0; C(0, r) = C_0; C(t, r_1) = C_0, t > 0, r_c \leq r \leq r_1. \quad (3.23)$$

Положив $C_1(t, r) = C_m - C(t, r)$, $\alpha_1 = \frac{\Phi_c \rho_{oc}}{n_c}$, $q_1 = \frac{q}{n_c}$, получим

систему

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_1}{\partial t} - \frac{q_1}{r} \frac{\partial C_1}{\partial r} + \alpha_1 C_1 = 0, \end{array} \right. \quad (3.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi_c \cdot C_1. \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Граничные и начальные условия примут вид

$$b(0, r) = N_0; C_1(0, r) = C_1(t, r_1) = C_{01}, \quad (3.26)$$

где $C_{01} = C_m - C_0$.

Положим $C_1(t, r) = e^{-\alpha_1 t} \cdot u(t, r)$. Тогда уравнение (3.24) и граничные и начальные условия принимают вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{q_1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = 0, u(0, r) = C_{01}; u(t, r_1) = C_{01} \cdot e^{\alpha_1 t}. \quad (3.27)$$

Делая преобразование Лапласа в задаче (3.27), получаем задачу

для изображения $\bar{u}(s, r) = \int_0^{\infty} u(t, r) e^{-s \cdot t} dt$

$$s\bar{u} - C_{01} - \frac{q_1}{r} \frac{d\bar{u}}{dr} = 0; \bar{u}(s, r_1) = \frac{C_{01}}{s - \alpha_1}. \quad (3.28)$$

Решая (3.28), получаем $\bar{u} = \left(\frac{C_{01}}{s - \alpha_1} - \frac{C_{01}}{s} \right) \cdot e^{-T \cdot s} + \frac{C_{01}}{s}$, где

$T = \frac{r_1^2 - r^2}{2q_1}$. Возвращаясь к оригиналам, имеем

$$u(t, r) = C_{01}(1 - H(t - T)) + C_{01}e^{-\alpha_1(t - T)} \cdot H(t - T),$$

где $H(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}$ - функция Хэвисайда.

Окончательно получаем: при $t > 0$ и $r \in (r_c; r_1)$

$$C_1(t, r) = C_{01}(1 - H(t - T)) \cdot e^{-\alpha_1 t} + C_{01}e^{-\alpha_1 T} \cdot H(t - T).$$

Отметим, что параметр $T = T(r) = \frac{r_1^2 - r^2}{2q_1}$ имеет размерность времени и $T(r_c) = T_\Phi$. На временном участке $t \in (0; T)$

$$C_1(t, r) = C_{01} \cdot e^{-\alpha_1 t}, \quad (3.29)$$

т.е. на расстоянии r от оси скважины происходит активное растворение кольтманта, а величина $C_1(t, r) = C_m - C(t, r)$ экспоненциально уменьшается.

Теперь, используя уравнение (3.25) и соотношение (3.29), найдем изменившееся значение b_T за время $T = T(r)$ на расстоянии r от оси скважины

$$b_T = N_0 - \frac{n_c}{\rho_{oc}} \left(1 - e^{-\alpha_1 T} \right) \cdot C_{01}. \quad (3.30)$$

По формуле (3.30) можно определить удельный объем отложений $b(t)$ в любой точке гравийной обсыпки в любой момент времени в процессе только одной фазы закачки реагента. Каждая фаза должна рассчитываться отдельно, так как начальный удельный объем отложений N_0 изменяется после каждой фазы, что требует корректировки в условиях (3.26) и определения b_c и n_c в уравнениях (3.21) - (3.22).

Анализ зависимости (3.29) показывает, что перепад концентраций $C_{01} = C_m - C_0$ движущегося раствора, определяемый в соответствующей точке гравийной обсыпки, снижается по экспоненциальной зависимости с показателем степени $\alpha = \Phi_c \rho_{oc} / n_c$, что указывает на то, что интенсивность растворения отложений при прочих равных условиях возрастает с ростом скорости реагента ($\sqrt{v} = \sqrt{q/r}$) и удельной поверхности частиц незакольматированной гравийной обсыпки ω_0 . Причем, при движении реагента от внешнего кольца к внутреннему скорость фильтрации возрастает и благодаря этому фактору улучшается массообмен, но, в то же время, перепад концентраций на фронте раствора ($C_m - C$) уменьшается из-за наработки раствора продуктами реакции, поэтому эти процессы частично компенсируют друг друга.

Как было сказано выше, значение b в конце первой фазы промывки может не достигнуть планируемого в процессе обработки значения b_0 даже при больших значениях C_m и требуется непрерывная подача свежего раствора с последующими фазами обработки, чтобы обеспечить нужную степень декольматации. К концу первой фазы начальный удельный объем отложений N_0 уменьшится и составит N_{01} , к концу 2-ой фазы - N_{02} , и т.д. Разбив процесс выноса солей на ряд последовательных фаз, можно определить время полного растворения отложений, когда вся толща пористого кольца будет освобождена от кольматанта. Предложенная методика расчета реализована на ЭВМ.

На рисунке 3.4 представлены графики изменения удельного объема b кольматирующих отложений от времени t обработки скважины для нескольких характерных начальных диаметров частиц $d_0 = 1,0 \dots 4,0$ мм.

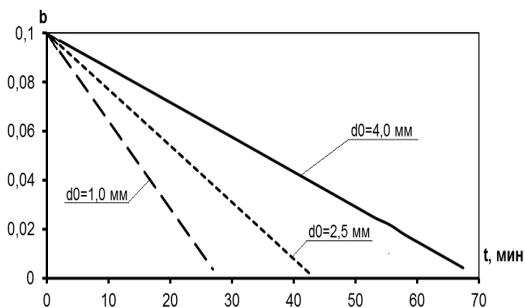


Рисунок 3.4 – Изменение удельного объема кольматирующих отложений от времени обработки скважины ($b(0)=N_0=0,1; n_0=0,4; D=10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}; C_m=40 \text{ кг/м}^3; C_0=0,4 \text{ кг/м}^3; \rho_{oc}=2250 \text{ кг/м}^3; r_l=0,16 \text{ м}; r_c=0,08 \text{ м}; m=6 \text{ м}; Q=1 \text{ л/с}; \zeta=0,9; \eta=1$) [89]

На рисунках 3.5а и 3.5б представлены графики изменения продолжительности растворения кольматирующих отложений на внутренней и внешней границах «кольматационного кольца» (см. рисунок 3.3) в зависимости от начального диаметра частиц гравийной обсыпки.

Анализ графика (рисунок 3.4) показывает, что удельный объем кольматирующих отложений уменьшается в процессе реагентной промывки по линейной зависимости, а интенсивность регенерации растет с уменьшением крупности частиц гравийной обсыпки, что обусловлено увеличением площади контакта реагента и кольматанта. Из анализа графиков (рисунок 3.5) следует, что с увеличением диаметра закольматированных частиц гравийной обсыпки продолжительность полной регенерации возрастает и для скважин с обсыпкой крупностью $d_0=0,5 \dots 4$ мм при $N_0=0,1$ и $m=6$ м она составляет от 30 до 70 минут.

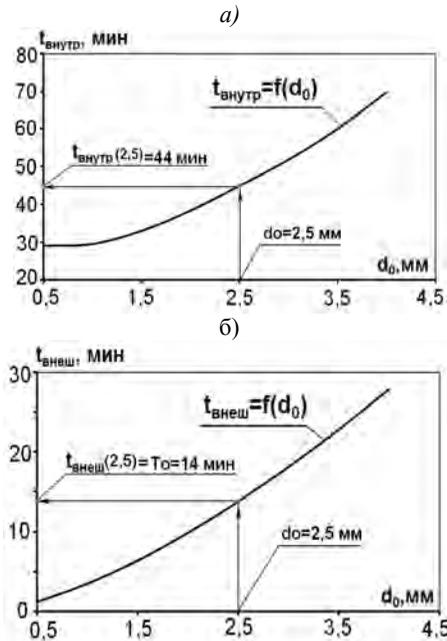


Рисунок 3.5 – Изменение продолжительности растворения кольматирующих отложений в зависимости от начального диаметра d_0 частиц при $b(0) = N_0 = 0,1$; $n_0 = 0,4$; $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $C_m = 40 \text{ кг}/\text{м}^3$; $C = 0,4 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{oc} = 2250 \text{ кг}/\text{м}^3$; $r_1 = 0,16 \text{ м}$; $r_c = 0,08 \text{ м}$; $m = 6 \text{ м}$; $Q = 1 \text{ л}/\text{с}$; $\zeta = 0,9$; $\eta = 1$ на границах кольматационного кольца: a – внутренней; b – внешней [89]

Предложенная методика поэтапного расчета продолжительности регенерации до достижения требуемой степени декольматации позволяет разработать технологию регенерации гравийных фильтров скважин способом затрубной циркуляционной реагентной регенерации в зависимости от параметров пласта, кольматажа и расхода закачки реагента.

3.3 Расчет количества реагента для восстановления дебита скважин

Количество соляной кислоты, заливаемой в скважину, оценивается по известной формуле [4, 41, 90]

$$M_{HCl} = f \cdot K_c \cdot M_k, \quad (3.31)$$

где M_{HCl} – масса соляной кислоты (в пересчете на хлористый водород 100%-ой концентрации);

f – коэффициент, принимаемый равным 1,2;

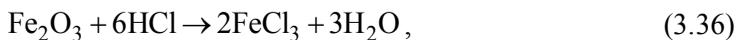
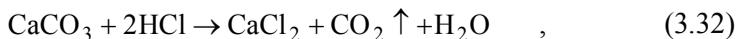
K_c – стехиометрический коэффициент;

M_k – масса кольматанта в скважине.

Стехиометрический коэффициент K_c характеризует собой удельные затраты реагента на растворение кольматанта единичной массы и представляет собой соотношение количеств, вступающих в реакцию кольматанта и реагента. Занижение величины K_c приводит к дефициту кислоты, что влечет к выпадению из раствора хлопьев хлорида железа $FeCl_3$ и вызывает вторичную кольматацию профильтровой зоны. Завышение величины K_c приводит к увеличению расхода кислоты, что ведет к увеличению затрат на восстановительные работы.

Ввиду сложного состава кольматанта, коэффициент K_c обычно определяют лабораторным путем по фактическому расходу реагента на растворение проб кольматирующих отложений. Однако, для предварительного расчета величины K_c на стадии планирования восстановительных работ при отсутствии лабораторных данных часто возникает необходимость в определении этого коэффициента по уже имеющимся данным о химическом составе отложений. Рассчитав значение K_c теоретически, можно вычислить по формуле (3.31) потребное количество соляной кислоты для очистки профильтровой зоны скважины.

Типичный кольматант представляет собой многокомпонентную систему, включающую в себя соли кальция, магния, марганца (карбонаты), соединения железа в виде гидроксида, оксида, сульфида, фосфата. В частности, содержание Fe_2O_3 в химическом анализе дает количественную характеристику суммы всех железосодержащих соединений: $Fe(OH)_3$, Fe_2O_3 , $FePO_4$, FeS , а процент CaO , MnO , MgO – карбонатов: $CaCO_3$, $MnCO_3$, $MgCO_3$. Эти соединения реагируют с соляной кислотой в соответствии со следующими уравнениями реакций



В работах [23, 91] приведена методика расчета коэффициента K_c по химическому составу кольматанта, представленному в виде оксидов: Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , P_2O_5 и др. (всего 12 наименований). Методика основана на вычислении балансов химических реакций всех без исключения компонентов кольматанта с соляной кислотой и требует проведения детальных лабораторных исследований проб кольматанта, извлеченных из скважины. Такие исследования сопряжены со значительными трудозатратами и финансовыми вложениями. Для вычисления значения K_c по известному детальному химическому составу кольматанта можно использовать компьютерную программу, разработанную авторами.

Для снижения затрат на химический анализ и упрощение вычислений представляет практический интерес разработка методики расчета стехиометрического коэффициента K_c , основанной на использовании данных о химическом составе кольматанта, представленных в виде нескольких основных оксидов. Анализ методики [23] показал, что аналитическая зависимость для расчета K_c имеет линейный вид

$$K_c = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_mx_m \quad . \quad (3.39)$$

Коэффициенты в формуле (3.39) определяли методом наименьших квадратов (МНК). Отметим, что оценка МНК является несмещенной [92, 1]. Следовательно, математическое ожидание остатков e_i (это разность между значением K_c , полученных по методике [23] и по формуле (3.39), их еще называют отклонениями) равно 0. Впрочем, это можно проверить непосредственно, вычислив

$\sum e_i = 0$. Далее, в [92] указывается, что статистика $s_e^2 = \sum s_i^2 / (n-m-1)$ является несмещенной оценкой дисперсии остатков, т.е. величина s_e оценивает среднеквадратическое отклонение остатков. Это дает нам основание для оценки адекватности выбранной модели регрессии использовать 2-е неравенство Чебышева, которое в данном случае дает: $P(|e_i| < 6s_e) > 0,96$, т.е. с вероятностью большей, чем 0,96, отклонения будут лежать в интервале $(-6s_e; 6s_e)$. Итак, чем меньше значение s_e , тем точнее работает формула (3.39).

В результате мы можем использовать следующую методику определения незначимых параметров x_i . Если мы методом МНК получили некоторую формулу вида (3.39), в которой коэффициент b_i мал по абсолютной величине, и максимально возможное значение x_i мало, то можно ожидать, что i -е слагаемое в формуле (3.39) можно отбросить, «не сильно ухудшая» формулу (3.39). Далее выполняем процедуру МНК для определения формулы (3.39), исключая при вычислениях параметр x_i . Далее находим оценку среднеквадратического отклонения s_e остатков для новой формулы. Если оно мало, то эту формулу можно считать адекватной, а параметр x_i - незначимым для определения величины K_c . И так далее. Реализация указанного алгоритма позволила получить формулу [93]

$$K_c = 0,031713 + 0,01103x_1 + 0,01259x_2 + 0,01334x_3, \quad (3.40)$$

где x_1 ; x_2 ; x_3 – массовые доли MnO, CaO и Fe₂O₃ соответственно, выраженные в процентах.

При выполнении расчетов по полученной формуле (3.40) среднее значение погрешности в сравнении с точным значением равно 0, а среднеквадратическое отклонение равно 0,00385. Для проверки адекватности полученной модели было произведено сравнение по 70-ти скважинам (данные из [4, 91]). При этом максимальная абсолютная погрешность составила 0,014, а максимальная относительная погрешность составила 3,17%. Незначительная величина полученных погрешностей свидетельствует о возможности использования предложенной зависимости (3.40) для практических расчетов. Это означает, что для расчета потребного количества реагента отсутствует необходимость в детальном анализе химического состава кольяманта, достаточно определить процентное содержание основ-

ных компонентов, представленных в виде оксидов MnO, CaO и Fe₂O₃.

Массу кольматанта M_K в скважине определяют по формуле [4, 41, 90]

$$M_K = a\rho_{oc}W_{пор} = a\rho_{oc}\pi(R_r^2 - r_c^2)l_\phi n_0, \quad (3.41)$$

где a – насыщенность порового пространства кольматантом;

ρ_{oc} – плотность кольматанта;

$W_{пор}$ – объем пор гравийной обсыпки;

R_r – радиус гравийной обсыпки;

r_c – радиус фильтра;

l_ϕ – длина фильтра.

Для скважин, оснащенных затрубными системами промывки, насыщенность порового пространства кольматантом можно определить с использованием экспериментальных данных по зависимости

$$a = 1 - \left(\frac{k_{1П}}{k_{0П}} \right)^{1/3}, \quad (3.42)$$

где $k_{0П}$, $k_{1П}$ – соответственно первоначальный коэффициент фильтрации пород в прифильтровой зоне скважины в момент пуска ее в работу и коэффициент фильтрации перед реагентной обработкой.

Значения коэффициентов $k_{0П}$, $k_{1П}$ определяют опытным путем, используя циркуляционные трубки затрубной системы промывки в качестве пьезометров. Для этого могут применяться полевые методы: метод откачки, метод опытных наливов или нагнетаний [94].

Схема к расчету коэффициента фильтрации прифильтровой зоны совершенной по степени вскрытия водоносного пласта скважины и количества кольматанта представлена на рисунке 3.6.

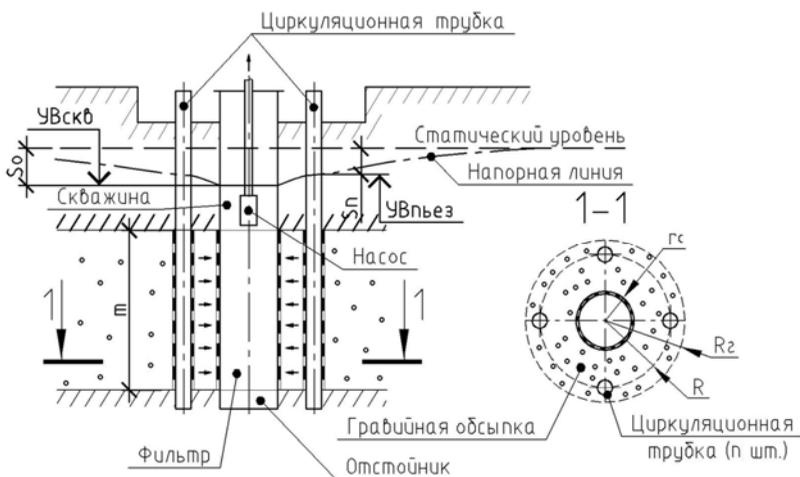


Рисунок 3.6 – Схема к расчету коэффициента фильтрации прифильтовой зоны скважины и объема кольматанта [93]

Коэффициент фильтрации определяют по формуле:

$$k_{1П} = \frac{Q \ln(R/r_c)}{2\pi m(S_0 - S_{1П})}, \quad (3.43)$$

где S_0 ; $S_{1П}$ – соответственно понижения уровней в скважине и циркуляционной трубке.

Имея параметры скважины и кольматанта, по формулам (3.31), (3.40) и (3.41) можно рассчитать количество соляной кислоты, необходимое для реагентной обработки скважинного фильтра. Для скважин, оборудованных затрубными системами промывки, реагентные обработки могут осуществлять способами поэтапных закачек и циркуляционной промывки. Наиболее простым является способ поэтапных закачек, когда раствор реагента самотеком подается по циркуляционным трубкам непосредственно в гравийную обсыпку. При такой регенерации для полного растворения отложений в обсыпке может потребоваться до 14 этапов обработки [86,95], что обусловлено не только кинетикой выщелачивания отложений, но и параметрами закольматированной гравийной обсыпки, характеризующейся малой пористостью.

Выводы по главе 3

1. Для описания процесса растворения отложений способом поэтапных закачек использована система двух уравнений: обобщенного уравнения кинетики и уравнения баланса вещества, которые используют для описания кинетики выщелачивания кольматанта в режиме «реагентной ванны». Установлено, что система уравнений имеет стационарное решение $b=b_{\text{крит}}$; $C=C_m$. Решение $(b(t), C(t))$ попадет в $(b_{\text{крит}}, C_m)$ за бесконечное время. Предложено ограничиться промежутком времени $T_{\text{фин}}$, за который будет достигнуто равенство $C/C_m=K$ (заданная величина $K = 0,995 - 0,999$, т.е. отклонение $\text{Cot}C_m$ составит от 0,5 до 0,1%) и будет выполнено $b(T_{\text{фин}}) = b_{\text{фин}}$. Расчеты показали, что одной порции реагента недостаточно для полного растворения кольматирующих отложений, осуществляемого в статических условиях. Для расчета продолжительности регенерации $T^p_{\text{фин}}$ предложена методика поэтапного расчета, реализованная на ЭВМ.

2. Для описания процесса растворения отложений способом затрубной циркуляционной реагентной промывки использована система уравнений: объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики. Путем интегрирования уравнения кинетики получена аналитическая зависимость для расчета продолжительности регенерации T_0 слоя зерен грунта на внешнем контуре гравийной обсыпки. Полученная формула позволяет рассчитать время, по истечении которого внешний радиус «кольматационного кольца» в процессе промывки начнет уменьшаться.

3. Для расчета продолжительности полной регенерации всей толщи обсыпки, предложено разбить период регенерации на ряд фаз последовательного выноса солей из грунта. Продолжительность одной фазы $T_{\text{ф}}$ принята равной времени прохождения реагентом участка от $r=r_1$ до $r=r_c$, т.е. $T_{\text{ф}} = (r_1^2 - r_c^2 / 2q_1)$, где $q_1 = q/n_c$. Каждая фаза рассчитывается отдельно, так как начальный удельный объем отложений N_0 во входном сечении изменяется после каждой фазы, что требует корректировки граничных условий. Полученное аналитическое решение системы известных уравнений позволяет расчи-

тать на временном участке $t \in (0; T)$ в процессе выщелачивания концентрацию солей в реагенте $C_1(t, r)$ и определить удельный объем отложений $b(t)$ в точке гравийной обсыпки в любой момент времени в процессе закачки реагента. Это позволило разработать методику поэтапного расчета продолжительности регенерации до достижения требуемой степени декольматации, реализованную на ЭВМ.

4. Установлено, что удельный расход соляной кислоты для реагентной регенерации скважин зависит преимущественно от содержания в кольматирующих отложениях химических соединений, включающих Fe, Mn и Ca. Для определения стехиометрического коэффициента K_c , позволяющего рассчитать необходимое количество соляной кислоты (по известной массе кольматанта в скважине), получена линейная регрессионная зависимость, основанная на использовании количественных данных о составе отложений, представленных в виде оксидов MnO, CaO и Fe₂O₃. Результаты выполненных расчетов показали, что максимальная абсолютная погрешность вычислений по сравнению с точным решением по детальному химическому составу кольматанта составила 0,014, а относительная погрешность вычислений не превысила 4 %.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОДИКИ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

4.1 Оборудование, методики и оценка точности измерений при исследовании параметров фильтрационного потока

Исследования параметров фильтрационного потока в лабораторных условиях выполнялись методом физического моделирования на однородном кварцевом фильтрующем песке (ТУРБ 100016844.241-2001). Такой песок выпускается ОАО «Нерудпром» и используется при сооружении гравийных обсыпок водозаборных скважин. Основные характеристики кварцевого песка приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Основные характеристики кварцевого песка

Наименование показателя	Значение
Содержание основной фракции, %	90
Минимальный размер основной фракции, мм	1,0
Максимальный размер основной фракции, мм	1,8
Размеры частиц, мм	0,5...5
Диаметр частиц D_{50} , мм	1,1
Пористость, %	38...44
Плотность насыпная, кг/м ³	1600
Коэффициент неоднородности	1,65

Коэффициент фильтрации k чистого песка определяли лабораторным методом на приборе Дарси, $k = 7$ мм/с [96].

Параметры напорного и безнапорного фильтрационного потоков в прифильтровой зоне модели скважины, оборудованной затрубной системой регенерации, исследовались путем определения напора h_n в водоносном пласте теоретическим и экспериментальными методами. При известном напоре h_n определялось понижение ($S < 0$) и повышение ($S > 0$) уровня воды в пьезометрах при откачке закачке соответственно. Величина S определялась по формуле

$$S = h_n - h_c, \quad (4.1)$$

где h_c – статический напор в пласте.

В экспериментальных исследованиях в качестве водоподъемного оборудования использовался электронасос типа «Ручеек-1» (БВ-0.12-40-У5, ГОСТ 26287-84).

Для определения расходов жидкости использовались секундомер СОС пр-26-2 «Агат» 4295А ГОСТ 5072-72, сосуд мерный МП 1 л по ГОСТ 8269.0-97, 8735-88, 9758-86 и счетчики воды СХВ-15, соответствующие ГОСТ Р 50601-93 и техническим условиям ВИАД 2.833.002 ТУ. Расходы также определяли объемным методом.

Для проведения экспериментальных исследований параметров фильтрационного потока жидкости необходимо соблюдение условия сохранения ламинарного режима фильтрации. Для этого скорость фильтрации воды в прифильтровой зоне скважины не должна превышать критических значений, при которых происходит нарушение закона Дарси.

Критическая скорость $v_{кр}$, при которой происходит нарушение закона Дарси, определялась по методике работы [97]. Для этого строили график зависимости средней скорости фильтрации v от градиента фильтрации I , т.е. $v=f(I)$ (рисунок 4.1) и по нему определялось критическое значение скорости фильтрации.

Критическая скорость $v_{кр}$ фильтрации для используемого в лабораторных экспериментах чистого кварцевого песка составила $v_{кр}=0,24$ см/с.

Экспериментальные исследования осуществляли после теоретических разработок по исследуемым вопросам. Основным требованием, предъявляемым к таким исследованиям, является обеспечение необходимой точности измерений [99].

Результат измерения физической величины x представляют как

$$x = x_{наил} \pm \Delta x , \quad (4.3)$$

где $x_{наил}$ – наилучшая оценка, которую с наибольшим основанием можно принять за приближенное значение x ;

Δx – абсолютная погрешность результата x , которая всегда положительна и имеет размерность измеряемой физической величины.

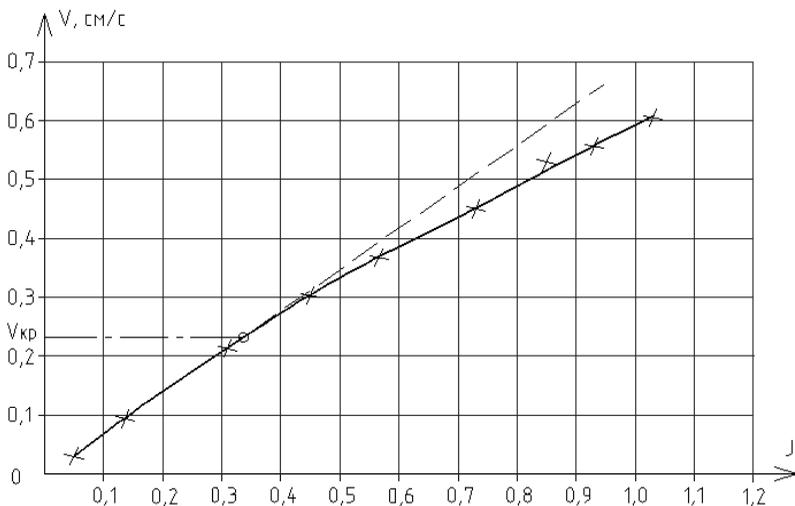


Рисунок 4.1 – График зависимости средней скорости фильтрации v от градиента фильтрации I песка при фильтровой зоне [98]

Объективной характеристикой точности опытов является относительная погрешность δx , т.е. отношение Δx к $x_{\text{наил}}$

$$\delta x = \frac{\Delta x}{|x_{\text{наил}}|} 100\%. \quad (4.4)$$

Обычно при инженерных экспериментальных исследованиях относительная погрешность не должна превышать значения 0,05 (5%).

Применение статистических методов для обработки величин позволяет определить наилучшую оценку $x_{\text{наил}}$ измеряемой величины, а также доверительную случайную погрешность $\epsilon(x)$ результата измерения для данного значения доверительной вероятности P . Наилучшей оценкой измеряемой физической величины x является среднее арифметическое \bar{x} повторенных n раз измерений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.5)$$

Отклонения $(x_i - \bar{x})$ показывают, насколько результат i -го измерения x_i отличается от среднего \bar{x} . По ним можно рассчитать стандартное отклонение σ_x

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}. \quad (4.6)$$

Для вычисления доверительных границ случайной погрешности результата измерений \bar{x} рассчитывают его среднее квадратическое отклонение $S(\bar{x})$

$$S(\bar{x}) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}. \quad (4.7)$$

Доверительные границы $\varepsilon(x)$ случайной погрешности результата прямых многократных измерений вычисляют по формуле [99-100]

$$\varepsilon(x) = t(P) \cdot S(x), \quad (4.8)$$

где $t(P)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P (для расчетов использовали $P = 0,95$) и числа результатов наблюдений.

Доверительные границы случайной погрешности для математического ожидания MX определяется исходя из выражения

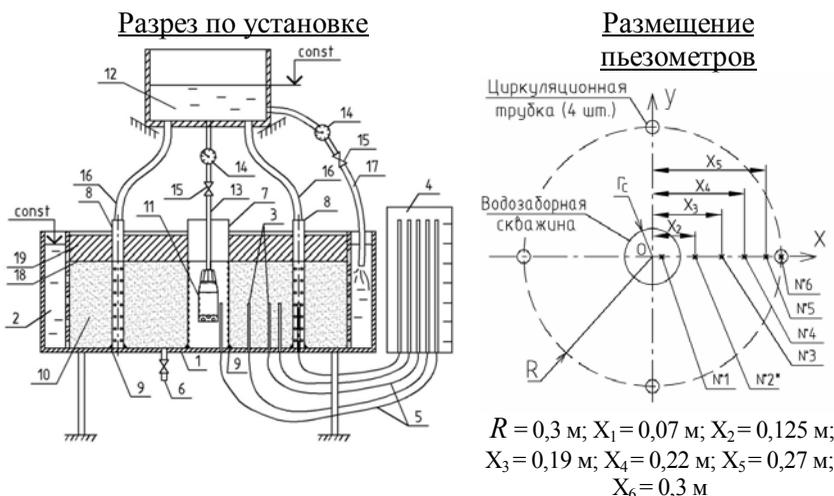
$$x - t(P) \cdot S(x) < MX < x + t(P) \cdot S(x). \quad (4.9)$$

4.2 Лабораторные исследования гидродинамики фильтрационного потока в напорном и безнапорном пластах

Для проверки применимости теоретических зависимостей, описывающих фильтрационное движение жидкости, возникающее в прифильтровой зоне водозаборных скважин в напорном и безна-

порном пластах, при их затрубной гидродинамической и циркуляционной реагентной промывке, выполнялись экспериментальные исследования на физической модели.

Физическое моделирование фильтрационного движения жидкости в напорном водоносном пласте проводили на специально разработанной экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 4.2.



- 1 – фильтрационный лоток; 2 – кольцевой бьеф; 3 – водоприемники пьезометров; 4 – щит пьезометров; 5 – шланги; 6 – сливной патрубков; 7 – модель скважины; 8 – циркуляционные трубки; 9 – уплотнение; 10 – водовмещающий грунт; 11 – насос; 12 – напорный бак; 13 – напорный шланг; 14 – расходомер; 15 – вентиль; 16 – сливные шланги; 17 – отводящий шланг; 18 – пленка; 19 – глиняный замок

Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки

Установка состояла из радиального фильтрационного лотка 1 диаметром 1,22 м и высотой 0,5 м с кольцевым бьефом 2, внутри которого устанавливалась модель фильтра совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины 7. В прифильтровой зоне водозаборной скважины 7 устанавливали четыре циркуляционных трубки 8, перфорированные напротив фильтра. Цилиндрический бак засыпали кварцевым песком 10. В днище бака встроены водо-

приемники пьезометров 3, которые соединяли с пьезометрическим щитом 4 гибкими шлангами 5. Пьезометры располагались вдоль главной линии тока.

Для опорожнения установки в баке предусматривался слив 6. Во избежание защемления воздуха, грунт закладывался в воду с полойной трамбовкой. Для обеспечения условий напорной фильтрации в грунте 10, на его поверхности была уложена полиэтиленовая пленка 18 толщиной 2 мм с глиняным замком 19, который был дополнительно пригружен. Водозаборная скважина и циркуляционные трубки имели нижние и верхние уплотнения 9 в местах их примыкания к днищу бака и на контакте с полиэтиленовой пленкой 18. В модель скважины помещали насос 11, который откачивал из нее воду в напорный бак 12. Из напорного бака в циркуляционные трубки были подведены сливные шланги 16. Дополнительно из напорного бака в кольцевой бьеф выведен отводящий шланг 17. На отводящем и напорном шланге установлены счетчики воды 16 и вентили 15 для регулировки расхода. Общий вид установки представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Общий вид экспериментальной установки

Фильтр скважины представлял собой трубчатый полиэтиленовый каркас внутренним диаметром 125 мм. Диаметр отверстий в каркасе составлял 12 мм. Отверстия располагались в шахматном

порядке. Снаружи каркас обматывали полиэтиленхолстом толщиной $\delta=7,5$ мм. Мощность напорного водоносного слоя, представленного кварцевым песком, при исследовании циркуляционного потока составляла 0,3 м. При исследованиях промывного фильтрационного потока при гидродинамической промывке мощность водоносного слоя составляла $m=0,35$ м.

Физическое моделирование фильтрационного движения жидкости в безнапорном пласте проводилось на той же экспериментальной установке (см. рисунок 4.2). При этом из состава установки исключалась полиэтиленовая пленка 18 и глиняный замок 19. Взамен помещался фильтрующий грунт 10 и увеличивалась высота перфорации скважины 7 и циркуляционных трубок 8. Перфорация выполнялась на всю толщу безнапорного водоносного пласта, мощность которого составляла 0,46 м.

Моделирование процесса циркуляционной реагентной обработки скважин. При выполнении физического моделирования циркуляционно-реагентной обработки водозаборной скважины с затрубной системой регенерации воду из скважины с расходом Q подавали насосом в напорный бак. Подачу насоса регулировали вентилем, установленным на напорном шланге насоса. Затем вода из напорного бака самотеком поступала по сливным шлангам в циркуляционные трубки. При этом вентиль, установленный на сливном шланге, был перекрыт, что предотвращало “холостой” сброс воды из напорного бака в кольцевой бьеф установки. Скважина работала в режиме откачки, а циркуляционные трубки - в режиме нагнетания (см. рисунки 4.2 и 4.3). Под действием перепада напоров в прифильтровой зоне скважины уже через 5-7 минут после включения насоса формировался установившееся фильтрационное движение воды, признаками которого являлась стабилизация отметок уровней воды в напорном баке и в пьезометрах. Расход Q измерялся по счетчику воды, а напоры по главной линии тока – по пьезометрам.

На рисунке 4.4 представлен теоретический график изменения напора по главной линии тока в профиле OX между водозаборной скважиной в напорном пласте и циркуляционной трубкой, построенный по выражению (2.21)

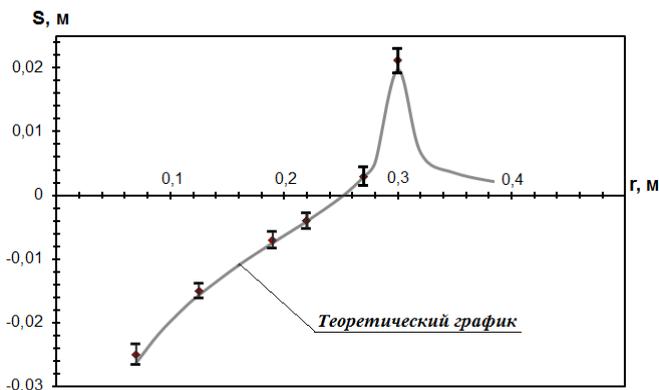


Рисунок 4.4 – Сопоставление экспериментальных данных и расчетов в профиле OX между скважиной в напорном пласте и циркуляционной трубкой ($n = 4$; $Q = 0,242$ л/с; $k_{\phi} = 7$ мм/с; $R = 0,3$ м; $t = 0,3$ м)

Теоретические графики изменения напора по главной линии тока между скважиной в безнапорном пласте и циркуляционной трубкой, построенные по выражению (2.26) для двух значений расхода жидкости Q при $n=4$; $k_{\phi}=7$ мм/с; $R=0,3$ м и $h_e=0,46$ м, представлены на рисунке 4.5.

Точками на рисунках 4.4 и 4.5 обозначены экспериментальные данные в виде среднеарифметических значений напоров с доверительными границами случайной погрешности ($P=0,95$). Анализ теоретических и экспериментальных данных показал их приемлемую сходимость. Наибольшее расхождение результатов в пределах доверительных границ случайной погрешности наблюдалось только в прифильтовой зоне циркуляционной трубки, где сказывалось сопротивление ее фильтра. Сходимость результатов расчетов и опытных данных свидетельствует о возможности использования полученных зависимостей (2.21) и (2.26) для практических расчетов.

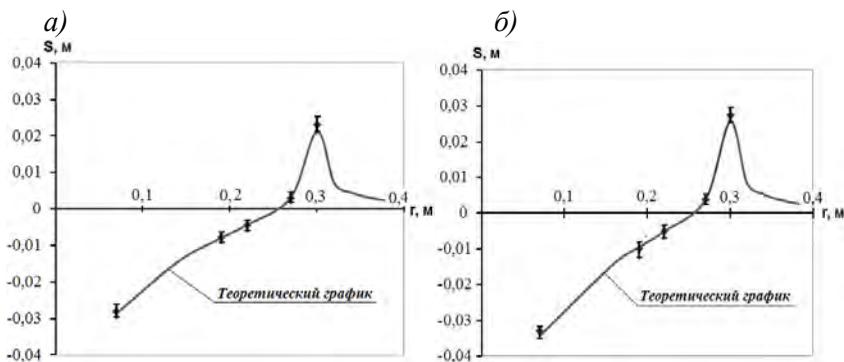


Рисунок 4.5 – Сопоставление экспериментальных данных и расчетов в профиле OX между скважиной в безнапорном пласте и циркуляционной трубкой в процессе циркуляции жидкости: а – $Q = 0,385$ л/с; б – $Q = 0,460$ л/с

Моделирование процесса гидродинамической промывки скважин. При выполнении физического моделирования гидродинамической регенерации гравийной обсыпки водозаборных скважин с затрубными системами промывки лабораторная установка (см. рисунок 4.2) работала следующим образом. Воду насосом 11 забирали из скважины 1 с расходом Q_c , который фиксировался водомером 14, и подавали в напорный бак 12. Расход $Q_{пл}$, подаваемый по отводящему шлангу 17 в кольцевой бьеф 2, также фиксировали водомером. Так как уровень в напорном баке 12 поддерживали постоянным, расход Q_n , подаваемый в циркуляционные трубки 8, определяли как разность $Q_n = Q_c - Q_{пл}$. Давление в пласте при фильтрации регистрировали с помощью пьезометров.

Водозаборная скважина в напорном пласте. Для проверки правомерности применения полученной зависимости (2.8) для описания поля пьезометрических напоров при безреагентной гидродинамической промывке совершенной по степени вскрытия водоносного пласта водозаборной скважины строили теоретический график изменения напора по главной линии тока при $Q_n = 0,235$ л/с; $Q_{пл} = 0,156$ л/с; $Q_c = 0,391$ л/с; $m = 0,35$ м; $R = 0,3$ м; $R_n = 0,6$ м; $\beta_Q = 0,664$; $k = k_{\phi} = 7$ мм/с (рисунок 4.6, а).

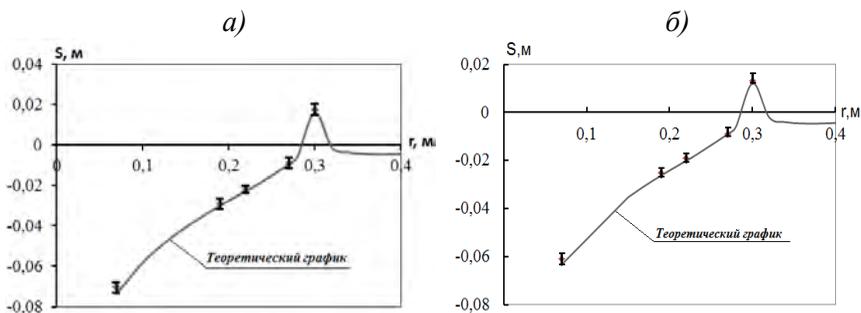


Рисунок 4.6 – Сопоставление экспериментальных данных и расчетов в профиле ОХ между скважиной и циркуляционной трубкой при гидродинамической промывке: *а* – скважина в напорном пласте; *б* – скважина в безнапорном пласте

Водозаборная скважина в безнапорном пласте. Для оценки возможности применения полученной зависимости (2.19) для описания поля напоров при безреагентной гидродинамической промывке скважины в безнапорном пласте строили теоретический графики при $Q_n = 0,235$ л/с; $Q_{пл} = 0,179$ л/с; $R = 0,3$ м; $Q_c = 0,414$ л/с; $h_e = 0,46$ м; $R_n = 0,6$ м; $\beta_Q = 0,762$; $k_\phi = k = 7$ мм/с (рисунок 4.6б).

Точками на рисунке 4.6 показаны экспериментальные данные в виде среднеарифметических значений пьезометрических напоров с доверительными границами случайной погрешности ($P=0,95$). Анализ теоретических и экспериментальных данных показывает их приемлемую сходимость, что свидетельствует о возможности использования полученных расчетных зависимостей (2.8) и (2.19) для практических расчетов и построения гидродинамических сеток фильтрации, возникающих в прифильтровой зоне скважин в напорных и безнапорных пластах при гидродинамической безреагентной промывке гравийных фильтров.

4.3 Лабораторные исследования суффозионных характеристик гравийной обсыпки

Для описания промывного фильтрационного потока, возникающего при гидродинамической регенерации гравийной обсыпки скважин, оборудованных затрубными системами промывки, были получены выражения (2.8) и (2.19), которые позволяют строить гидродинамические сетки фильтрации, необходимые для определения местной скорости фильтрации в любой точке прифильтровой зоны. По гидродинамической сетке можно также определить теоретическое значение градиента напора, а затем сравнить его с допускаемым средним градиентом напора фильтрационного потока $I_{\text{доп}}$, при превышении которого начинается перемещение кольматирующих частиц в порах скелета грунта и их вынос из затрубного пространства скважины.

Гравийную обсыпку, представляющую собой крупнозернистый песок, закольматированный глинистыми частицами и пастообразными железистыми соединениями, можно рассматривать как супесь. При кольматации гравийной обсыпки мелким песком, оставшимся в стволе скважины после бурения, и попавшим в гравийную обсыпку при ее засыпке, ее можно рассматривать как крупный песок. В справочной литературе приведены значения допускаемых средних градиентов фильтрационного потока для супеси в диапазоне: $I_{\text{доп}}=(0,55-0,85)$, а для крупного песка $I_{\text{доп}}=(0,9-1,1)$ [101].

Интенсивность суффозионного процесса, т.е. массовый расход транспортируемых потоком частиц заполнителя возрастает по мере увеличения градиента напора. Вследствие такой суффозии резко изменяется проницаемость грунтовой толщи. Необходимым условием возникновения объемной суффозии является возможность перемещения мелких «незашемленных» частиц в поровых каналах грунта. Данное условие может быть выражено неравенством [102]

$$d_m < d_k, \quad (4.10)$$

где d_m – размер мелких частиц (заполнителя грунта);
 d_k – расчетный поперечник поровых каналов в грунте.

Расчетный поперечник d_k поровых каналов примерно равен просвету в местах их сужений и может быть принят в качестве гидравлически эквивалентного диаметра поровых каналов. Если известны начальная пористость n_o и коэффициент ламинарной фильтрации k_L грунта, расчетный поперечник его поровых каналов можно вычислить по формуле [102]

$$d_k = 6,1 \sqrt{\frac{v_c}{\varphi \cdot n_o \cdot g} k_L} \quad (4.11)$$

Имея в виду, что в лабораторных условиях температура воды примерно равна 20°C (кинематический коэффициент вязкости $v_c = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$) формулу (4.11) можно упростить

$$d_k = 0,019 \sqrt{\frac{k_L}{\varphi \cdot n_o}} \quad (4.12)$$

Входящий в выражения (4.11) и (4.12) коэффициент формы сечений поровых каналов в грунте $\varphi = 0,45(1 + 0,306B)$, где B – балл окатанности по пятибалльной шкале А.В. Хабакова [103]. Согласно этой шкале зерна с режущими краями (щебнистый грунт) имеют нулевой балл окатанности. Зерна, сохранившие первоначальную форму со слегка окатанными ребрами и углами, имеют один балл, а со сглаженными ребрами, в очертании которых заметны прямолинейные отрезки, имеют два балла. Хорошо окатанные зерна, сохранившие лишь следы первоначальной огранки, имеют три балла. И лишь идеально окатанные зерна, а также зерна с равномерно и хорошо окатанной поверхностью - четыре балла.

Для визуального определения средней окатанности зерен грунта оценивают согласно шкале окатанность 50 - 100 его зерен. Затем умножают количество зерен данной группы m_i на их балл δ_i и сумму произведений делят на общее количество зерен N_3 , т.е. $B = (\sum \delta_i m_i) / N_3$.

После определения поперечного размера поровых каналов в грунте, выясняют возможность внутренней его суффозии путем оп-

ределения суммарного количества (по весу) мелких частиц, которые могут быть вымыты из грунта фильтрационным потоком (считая, что вымываются из грунта лишь те частицы, размер которых меньше d_k).

Второе гидромеханическое условие возникновения внутренней суффозии заключается в способности фильтрационного потока перемещать в порах грунта мелкие частицы. Это условие может быть записано в виде неравенства [102]

$$I > I_{\text{доп}}, \quad (4.13)$$

где I – градиент напора фильтрационного потока в грунте;

$I_{\text{доп}}$ – градиент напора, при котором возникает внутренняя суффозия.

Величина критического градиента напора $I_{\text{доп}}$ определяется экспериментальным путем. Для этого в лабораторных условиях воспроизводят те же условия фильтрации, которые должны быть во время безреагентной гидродинамической промывки гравийной обсыпки скважины.

Для экспериментального исследования процесса безреагентной гидродинамической промывки закольматированного грунта и определения необходимых параметров фильтрационного потока было проведено физическое моделирование на специально разработанном вертикальном фильтрационно-суффозионном приборе (рисунок 4.7).

Вертикальный фильтрационно-суффозионный прибор состоял из стальной рабочей камеры 1 цилиндрической формы, в нижней части которой размещалась опорная сетка, а в верхней части был предусмотрен фланец с крышкой и штуцером для загрузки грунта. Камера заполнялась фильтрующим грунтом. Для определения потерь напора при фильтрации использовались трубчатые пьезометры, выведенные на щит 2. Подводящий шланг 3 присоединялся к напорному баку (на рисунке не показан), в котором поддерживался постоянный уровень. Для регулирования напора и расхода применялись вентили 5, установленные на подводящем и отводящем шлангах прибора. Расходы определялись объемным способом, для чего применялись секундомер и мерный сосуд емкостью 1 л.

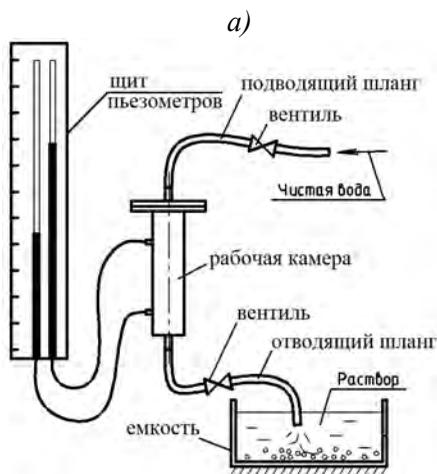


Рисунок 4.7 – Вертикальный фильтрационно-суффозионный прибор:
а – схема; б – общий вид

В качестве грунта применялся чистый и частично закольматированный крупнозернистый песок, соответствующий ТУ РБ 100016844.241-2001 «Песок кварцевый фильтрующий». Основные характеристики чистого песка представлены в таблице 4.1. В качестве кольматирующего заполнителя (мелкозема) в опытах использовался осадок скорых песчаных фильтров станции обезжелезивания «Острова», удаляемый из подземных вод водозаборов «Фелицианово» и «Острова», следующего химического состава (по массе): 28,55% – Fe_2O_3 , 16,2% – SiO_2 , 13,64% – CaO , 24,83 % – потери при прокаливании. Кольматант представлял собой мелкодисперсный порошок коричневого цвета.

При назначении размеров рабочей камеры фильтрационно-суффозионного прибора учитывалось, что на величину гидравлического сопротивления образца грунта могут ощутимо влиять стенки камеры, в которую помещен данный образец. Этот, так называемый «эффект пристенной фильтрации», обусловленный наличием вблизи стенок сравнительно крупных пор, становится пренебрежимо малым при отношении диаметра рабочей камеры D_k к размеру поровых каналов d_k разнозернистого грунта $D_k/d_k > 200$. При этом так-

же должно выполняться условие $D_{\kappa}/d_{\text{макс}} > 4$, где $d_{\text{макс}}$ – максимальный размер зерен грунта [78].

Вначале на обычном фильтрационном приборе Дарси определяли коэффициент фильтрации песка, который составил $k_{\text{г}} = 0,5$ см/с, а затем по формуле (4.12) определяли поперечник поровых каналов при пористости $n_o = 0,4$ и $\varphi = 0,75$ (частицы средней окатанности)

$$d_k = 0,019 \sqrt{\frac{0,5}{0,75 \cdot 0,4}} = 0,025 \text{ см.} \quad (4.14)$$

Диаметр рабочей камеры прибора был принят равным $D_{\kappa} = 54$ мм, что удовлетворяет приведенным выше условиям ($D_{\kappa}/d_k = 54/0,25 = 216 > 200$ и $D_{\kappa}/d_{\text{макс}} = 54/1,8 = 30 > 4$) как для чистого песка ($k_{\text{г}} = 0,5$ см/с), так и во всем диапазоне частично закольматированных песков, у которых коэффициент фильтрации меньше. Высота камеры была принята равной 0,5 м, а расстояние между пьезометрами $l_n = 0,085\text{--}0,33$ м (см. рисунок 4.7).

Методика эксперимента следующая. Осадок и кварцевый песок перемешивались в пропорции 1:4. Приготовленный грунт укладывался в прибор отдельными слоями с легким уплотнением путем трамбования. Далее грунт замачивался водой. Во время замачивания воздух из грунта выпускали через пьезометры. Затем определялась водопроницаемость грунта, для чего измеряли объемным способом стабильный расход воды Q , профильтровавшейся через грунт при некоторых потерях напора Δh , определенных как разность показаний пьезометров в данный момент времени t . Разделив этот расход на площадь сечения ω_c камеры прибора, определяли скорость фильтрации $v = Q/\omega_c$, и одновременно, по потерям напора Δh рассчитывали градиенты напора I_t на участке испытываемого образца. Т.к. режим движения отличался от ламинарного, текущий коэффициент фильтрации k_t в момент времени t определяли по формуле

$$k_t = v/I_t^{0,5}. \quad (4.15)$$

По полученным данным строили экспериментальный график изменения текущего коэффициента фильтрации грунта от времени промывки. На рисунке 4.8 представлен график при промывке грунта чистой водой с постоянной скоростью фильтрации $v=8,7$ мм/с.

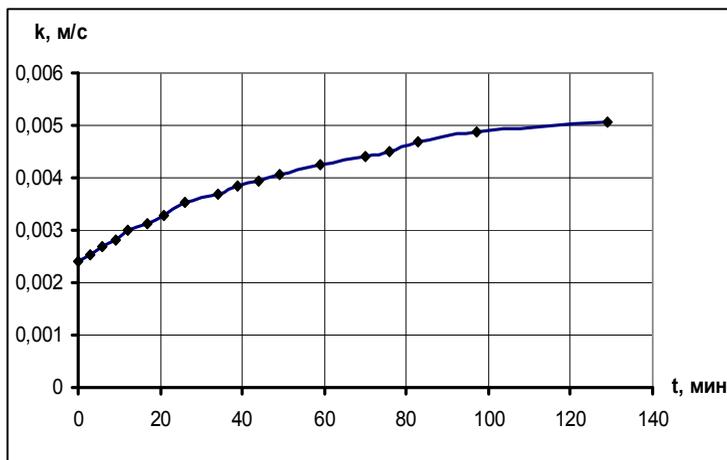


Рисунок 4.8 – Экспериментальный график изменения коэффициента фильтрации грунта k от времени промывки t при $v = 8,7$ мм/с

Из графика следует (см. рисунок 4.8), что в процессе промывки закольматированного грунта с постоянной скоростью фильтрации $v = 8,7$ мм/с, наблюдался постепенный суффозионный вынос рыхлого железистого осадка, причем интенсивность выноса в процессе промывки постепенно снижалась. Через $T=129$ минут после начала опыта был достигнут коэффициент фильтрации грунта, близкий к первоначальному ($k_{л}=0,5$ см/с), однако визуальный анализ качества промывки показал, что извлеченная из рабочей камеры проба содержит остаточный кольматант, т.е. степень отмывки грунта не достигла 100% (рисунок 4.9).

Учитывая, что продолжительность процесса промывки грунта чистой водой составила более двух часов, что недостаточно технологично в условиях промышленной промывки скважин, были проведены экспериментальные исследования с более высокими скоростями фильтрации, что способствовало скорейшему выносу осадка и сокращению времени регенерации.

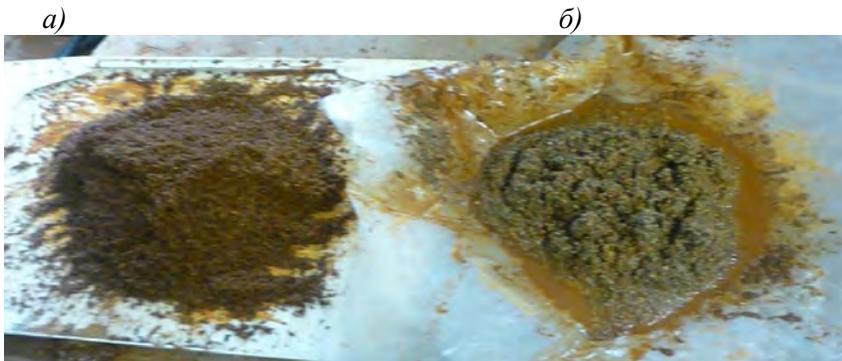


Рисунок 4.9 – Общий вид исследуемого грунта:
а – до промывки; б – после промывки

Дальнейшие исследования проводили с целью определения диапазона промывных скоростей, при которых продолжительность регенерации не превысит 40-80 минут (в зависимости от степени загрязненности грунта железистым осадком). Опыты производили по следующей методике. Железистый осадок и кварцевый песок перемешивали в объемных пропорциях 1:14, 1:10, 1:7, 1:6 и 1:5. Затем пробы грунта помещали в рабочую камеру прибора (рисунок 4.7). Определяли коэффициенты фильтрации k_f проб грунта и значения промывных скоростей v_n , при которых достигалась проницаемость грунта близкая к первоначальной ($k_f = 0,5$ см/с) за относительно короткий промежуток времени. Для этого скорость фильтрации постепенно увеличивали до тех пор, пока не прекращался вынос железистого мелкодисперсного осадка. Далее строили график зависимости промывной скорости v_n от начальной относительной проницаемости кварцевого песка k_i/k_n (рисунок 4.10).

Анализ результатов экспериментов показал, что величина промывной скорости фильтрации возрастает с увеличением загрязненности грунта по нелинейной зависимости. Установлено, что для эффективной затрубной промывки закольматированного рыхлым железистым осадком крупнозернистого кварцевого песка при снижении его проницаемости на 20-40% относительно первоначально, необходимы скорости промывки диапазоне от 11 до 20 мм/с.

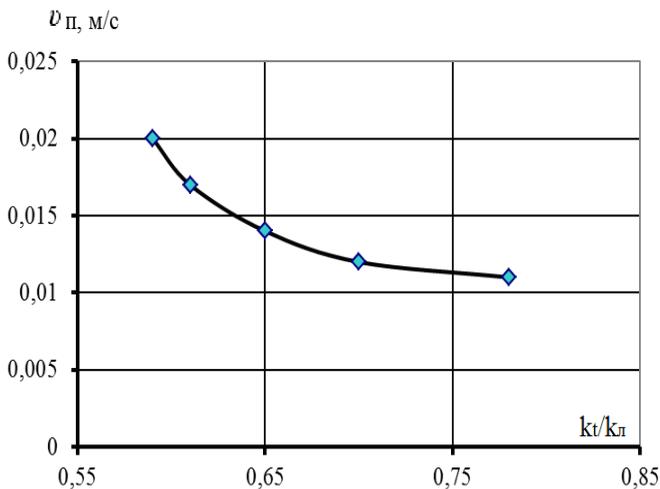


Рисунок 4.10 – Зависимость промывной скорости $v_{п}$ от начальной относительной проницаемости $k_t/k_{л}$ грунта

4.4 Лабораторные исследования процесса затрубной циркуляционной реагентной промывки

Экспериментальные исследования процесса обработки прифилтровой зоны скважины, оборудованной затрубной системой регенерации, способом циркуляционной реагентной промывки, проводили на физической модели водозаборной скважины. Схема и общий вид экспериментальной установки представлены на рисунках 4.2 и 4.3 [98].

Для растворения кольматирующих соединений в лабораторных экспериментах в качестве реагента использовали кислотное чистящее средство «Дескам» (ТУ РБ 37430824.001-97).

В процессе фильтрации раствора реагента через толщу грунта происходило выщелачивание кольматанта и вынос продуктов реакции из обсыпки. В результате увеличивалась проницаемость кольматационного кольца, которую контролировали по разности показаний пьезометров.

Циркуляцию раствора реагента обеспечивали насосом «Ручеек-1».

Необходимое количество реагента M_{HCl} определяли (с 20% избытком) в зависимости от количества кольматанта M_k , находящегося на фильтре и в прифильтровой зоне скважины, исходя из соотношения (3.31). Количество кольматанта M_k определяли по степени насыщенности порового пространства кольматирующими образованиями a в объеме пор гравийной обсыпки $W_{\text{пор}}$ с учетом плотности кольматирующего осадка ρ_{oc} по формуле (3.41). Насыщенность порового пространства кольматантом при известном начальном коэффициенте фильтрации прифильтровой зоны k_{oII} определяли из соотношения (3.42).

В лабораторных экспериментах использовали кольматант, извлеченный из фильтра скважины №36 водозабора «Северный» (г. Жодино) в процессе газоимпульсной регенерации. Согласно химическому анализу, кольматант содержал 72% Fe_2O_3 , 3% CaO . Для удержания кольматирующего осадка на наружной и внутренней поверхности фильтра, а также в прифильтровой зоне модели скважины к кольматанту применили добавку из портландцемента ПЦ 500-Д20 (ГОСТ 10178-85, ГОСТ 30515-97). Смесь предварительно затворили водой, высушили и раздробили на конгломератообразные структуры. Добавка цемента к кольматанту способствовала сцеплению и удержанию кольматирующего осадка на частицах песка, что имитировало естественную химическую кольматацию в прифильтровой зоне, которая образуется за период 5 и более лет эксплуатации скважины.

Массу кольматанта в лабораторных условиях определяли с помощью весов лабораторных ВЭ-3 с погрешностью взвешивания 0,0005кг по ГОСТ 24104-80 (класс точности средний по ГОСТ 29329).

Для определения эффективности регенерации вначале определяли гидравлические характеристики скважины с незакольматированной прифильтровой зоной, затем – с искусственно закольматированной, и в конце – характеристики модели скважины после ее регенерации.

Коэффициент фильтрации прифильтровой зоны k_{fII} при известных понижениях уровня в скважине и пьезометре определяли по формуле (3.43), при этом внутренний радиус фильтра принимался равным $r_c = 0,06\text{м}$, расстояние от оси водозаборной скважины до пьезометра $-r_n = 0,21\text{м}$, а мощность водоносного пласта $-m = 0,3\text{м}$.

Показатель обобщенного сопротивления ζ_f фильтра и прифильтровой зоны, в предположении, что проницаемость постоянна во всем рассматриваемом участке скважина-пьезометр, определяли по формуле [4]

$$\zeta_1 = \left(\frac{k_{0II}}{k_{1II}} - 1 \right) \ln \frac{r_n}{r_c}. \quad (4.16)$$

Прифильтровую зону искусственно кольматировали цементированным железосодержащим осадком и цементом. Для обеспечения равномерности зоны кольматации по высоте и толщине, смесь загружали в кольцевой зазор между фильтром с наружным диаметром 0,14 м и трубой диаметром 0,28 м, которая затем извлекалась. Таким образом, закольматированная кольцевая зона имела постоянную по высоте толщину $\delta=70$ мм и высоту $m = 0,3$ м, равную мощности напорного водоносного пласта. Заполненный водой при температуре 18°C фильтрационный лоток отстаивался трое суток.

В экспериментах в качестве реагента использовали кислотное чистящее средство «Дескам», содержащее 20% HCl. Количество реагента подбирали исходя из баланса веществ, вступающих в реакцию (3.36). Согласно уравнению реакции для полного растворения 160 г Fe_2O_3 требуется 216 г HCl, тогда соотношение масс исходных веществ, вступающих в реакцию, составит

$$\varphi = \frac{M_{\text{HCl}}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} = \frac{216}{160} = 1,35. \quad (4.17)$$

По данным химического анализа массовая доля Fe_2O_3 в составе кольматирующих отложений составляет $\alpha_2 = 0,72$.

По результатам растворения кольматанта в лабораторных условиях степень превращения железа составила 90%, т.е. степень использования кислоты составляет $\beta_1 = 0,9$. Тогда значение коэффициента стехиометрии K_c равна

$$K_c = \varphi \cdot \alpha_2 \cdot \beta_1 = 1,35 \cdot 0,72 \cdot 0,9 = 0,87. \quad (4.18)$$

Количество хлористого водорода вычислялось по выражению (3.31) для кольматанта массой $M_k = 5$ кг

$$M_{\text{HCL}} = 1,2 \cdot K_c \cdot M_k = 1,2 \cdot 0,87 \cdot 5 = 5,22 \text{ кг}. \quad (4.19)$$

Учитывая, что соляной кислоты в «Дескаме» содержится 20% ($f_1=0,2$), потребность средства «Дескам» M'_{HCL} составила

$$M'_{\text{HCL}} = \frac{M_{\text{HCL}}}{f_1} = \frac{5,22}{0,2} = 26 \text{ кг} . \quad (4.20)$$

Готовый раствор помещали в напорный бак 12, установленный выше статического уровня воды (рисунок 4.2). Затем его из бака 12 по шлангам 16 подавали в циркуляционные трубки 8. Отводящий шланг 17 был перекрыт. В это время включали насос «Ручеек-1», который откачивал жидкость из водозаборной скважины назад в бак, что обеспечивало циркуляцию реагента в прифилтровой зоне. Величину циркулирующего расхода определяли объемным методом и она составила $Q = 0,31$ л/с. Химическая реакция сопровождалась выделением углекислого газа в прифилтровой зоне при взаимодействии соляной кислоты с карбонатами, содержащимися в кольматанте, что ухудшало проницаемость прифилтровой зоны из-за кольматации пор пузырьками газа и приводило к дополнительному снижению уровня реагента в скважине.

Теоретическую продолжительность процесса выщелачивания кольматанта способом циркуляционной реагентной промывки определяли расчетным путем. Расчет производили согласно методике, описанной в главе 3.3, приняв следующие исходные данные: $N_0=0,2$; $d_0=1,1$ мм; $n_0=0,4$; $C_0=0,1$ кг/м³; $D=10^{-9}$ м²/с; $\zeta=0,9$; $\rho_{oc}=2250$ кг/м³; $r_l=0,14$ м; $r_c=0,06$ м; $m=0,3$ м; $v_c=1,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Q=0,31$ л/с; $\eta=0,9$. Максимальная концентрация солей в реагенте была принята $C_m=10$ кг/м³ с учетом химического состава кольматанта, выбранного способа регенерации и экспериментальных данные по кинетике растворения, приведенных в специальной литературе [4]. Согласно расчету необходимая продолжительность реагентной промывки составила 59 минут. Затем, полученное значение уточняли опытным путем. Во время эксперимента момент окончания циркуляционной реагентной промывки скважины принимали по стабилизации динамического уровня в откачной скважине, что указывало на стабилизацию коэффициента фильтрации прифилтровой зоны, при неизменных значениях статического уровня и производительности насоса. Фактическая продолжительность промыв-

ки составила 65 минут, что с допустимым отклонением подтвердило результаты расчета.

По окончании реагентной промывки производили откачку на выброс отработанных продуктов реакции до полного их удаления с замещением их водопроводной водой и гидравлические испытания скважины с целью определения после регенерации показателя обобщенного сопротивления ζ_1 фильтра и прифильтровой зоны, а также удельного дебита $q_{\text{скв}}$ скважины при постоянном расходе. Данные о результатах регенерации фильтра скважины представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Данные об эффективности циркуляционной реагентной промывки прифильтровой зоны скважины

Удельный дебит скважины, $\text{см}^2/\text{с}$			Показатель обобщенного сопротивления ζ_1	
До кольматации $q_{\text{скв}0}$	Перед регенерацией $q_{\text{скв}1}$	После регенерации $q_{\text{скв}2}$	Перед регенерацией	После регенерации
58	42	55	1,2	0,04

Анализ результатов эксперимента показал, что удельный дебит модели скважины в результате циркуляционной реагентной промывки увеличился в среднем в 1,3 раза и составил 95% от первоначального.

После проведения реагентной регенерации были выполнены вскрышные работы прифильтровой зоны, в результате которых на периферии секторов, расположенных между циркуляционными скважинами, были обнаружены лишь незначительные следы кольматирующих отложений. На рисунке 4.11 представлены фотографии прифильтровой зоны до и после циркуляционной регенерации.



Рисунок 4.11 – Прифильтровая зона модели водозаборной скважины [98]:
а – скважина до регенерации; б – скважина после регенерации

Полученные экспериментальные данные подтвердили высокой эффективностью способа затрубной циркуляционной реагентной промывки прифильтровой зоны скважины от цементированного колюматизирующего осадка.

4.5 Натурные испытания затрубной системы регенерации

Скважины, оборудованные затрубными системами регенерации, были пробурены в п. Ждановичи Минского района, в д. Узла Мядельского района и в котловане бетонных сооружений Полоцкой ГЭС в Витебской области. Конструкция, описание и параметры скважин приведены в главе 5.

Для проектирования затрубных систем регенерации и расчета параметров технологического оборудования, необходимого для проведения эффективных ремонтных работ на скважинах, большой практический интерес представляет определение гидравлических характеристик затрубной системы в натуральных условиях. Для решения данной задачи на водозаборной скважине №2/2011 в д. Узла Мядельского района были проведены комплексные гидравлические исследования с определением характеристик водопоглощения одной отдельно взятой циркуляционной трубки, а также всей системы, состоящей из четырех трубок, при закачке в них воды [104].

Методика испытаний была следующая. При отключенном глубинном насосе скважины из водопровода д. Узла по полиэтиленовой трубе поочередно в каждую из четырех циркуляционных трубок, а затем во все трубки одновременно подавали под давлением чистую воду. Давление в водопроводе в это время поддерживалось постоянным от резервной скважины №1. На подводящей полиэтиленовой трубе наружным диаметром $d = 25$ мм последовательно установили: вентиль для регулировки расхода, манометр (0-0,6) МПа и счетчик воды. Фотографии обвязки скважины при закачках воды в циркуляционные трубки представлены на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Обвязка скважины при закачке воды в затрубную систему:
а – подключение к одной трубке; *б* – подключение к четырем трубкам

При различных положениях вентиля определяли показания счетчика воды, манометра и время закачки. Напор нагнетаемой в трубку воды H определяли по формуле

$$H = h_{\text{ст}} + h_{\text{ман}}, \quad (4.21)$$

где $h_{\text{ст}}$ – расстояние от оси манометра до статического уровня воды в трубке, $h_{\text{ст}}=14,5$ м;

$h_{\text{ман}}$ – показание манометра в метрах водяного столба.

Расход закачки Q определяли как показание счетчика воды, деленное на продолжительность опыта. Полученные зависимости $Q = f(H)$ в испытуемом диапазоне расходов имели вид прямых линий и описывались линейными функциями вида

$$Q = a_j \cdot H, \quad (4.22)$$

где a_j – параметр уравнения, учитывающий проницаемость гравийной обсыпки и потери напора в циркуляционной трубке.

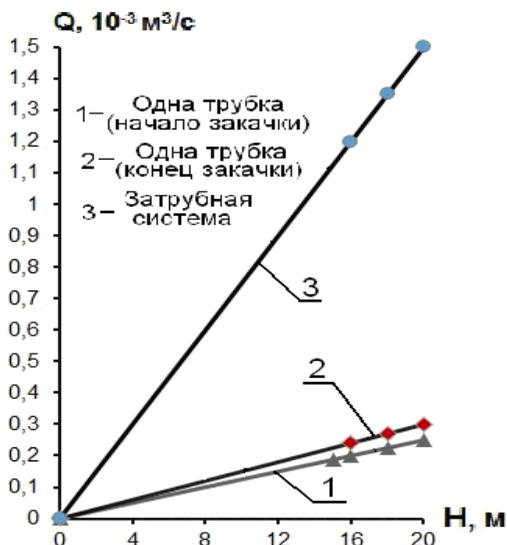


Рисунок 4.13 – Экспериментальные графики вида $Q = f(H)$

Полученные экспериментальные графики вида $Q = f(H)$ для затрубной системы водозаборной скважины №2/2011 д. Узла представлены на рисунке 4.13. Из полученных графиков видно, что при закачке воды в отдельно взятые циркуляционные трубки в начальный момент испытаний параметр составил $a_1 = 0,011$ л/(с·м). По окончании испытаний параметр a_j возрос и составил $a_2 = 0,015$ л/(с·м). Это указывает на то, что в

ходе натуральных исследований произошло некоторое уменьшение сопротивления затрубной системы в результате частичной промывки гравийного фильтра. При закачке воды во все четыре циркуляционные трубки затрубной системы регенерации одновременно параметр a составил $a_3 = 0,055$ л/(с·м).

Результаты натуральных исследований, представленные на рисунке 4.13, могут использоваться для оценки и обоснования производительности насосного оборудования, входящего в состав установки для регенерации скважин, а также при проектировании затрубных систем.

Выводы по главе 4

1. Выбраны методики и оборудование для проведения экспериментальных исследований параметров фильтрационного потока жидкости, возникающего в прифильтровой зоне водозаборных скважин, оборудованных затрубными системами регенерации, при гидродинамической и циркуляционной реагентной промывке гравийной обсыпки.

2. Проведены экспериментальные исследования изменения пьезометрических напоров вдоль главной линии тока, соединяющей ось скважины и одну из циркуляционных трубок, при установившемся движении в прифильтровой зоне моделей водозаборных скважин в напорном и безнапорном пластах при циркуляционной реагентной и гидродинамической промывке. Исследования показали удовлетворительную сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований для прифильтровой зоны с постоянной проницаемостью, что свидетельствует о возможности использования полученных выражений (2.8), (2.19), (2.21) и (2.26) для построения гидродинамических сеток фильтрации и определения технологических параметров регенерации скважин.

3. Установлено, что величина промывной скорости фильтрации возрастает с увеличением загрязненности грунта по нелинейной зависимости. При значениях скорости менее 8,7 мм/с процесс декольматации протекает недостаточно интенсивно. Для эффективного удаления мелкодисперсного железистого осадка рекомендованы промывные скорости фильтрационного потока в диапазоне от 11 до 20 мм/с.

4. На модели водозаборной скважины с искусственно закольматированным фильтром, оснащенной затрубной системой регенерации, проведены исследования по оценке эффективности способа циркуляционно-реагентной промывки. Проведенная регенерация обеспечила восстановление удельного дебита модели скважины до 95% от первоначального и высокое качество удаления отложений, что подтвердило эффективность работы затрубной системы. Продолжительность процесса регенерации составила 65 минут.

5. Определены гидравлические характеристики затрубной системы регенерации, установленной на водозаборной скважине в д. Узла. Полученные результаты исследований могут использоваться для обоснования производительности насосного оборудования, входящего в состав установки для регенерации скважин.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ И РЕАГЕНТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН С ЗАТРУБНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРОМЫВКИ

5.1 Основные способы затрубной регенерации скважин

Затрубная система регенерации обеспечивает доступ в их при-фильтровую зону и открывает возможности для диагностики технического состояния скважин и проведения эффективных ремонтных мероприятий. Для восстановления проницаемости фильтров таких скважин предложены три основных способа регенерации (рисунок 5.1), применимость которых взаимосвязана с этапами сооружения и эксплуатации скважин, степенью снижения проницаемости гравийной обсыпки, а также характером кольматирующих отложений.

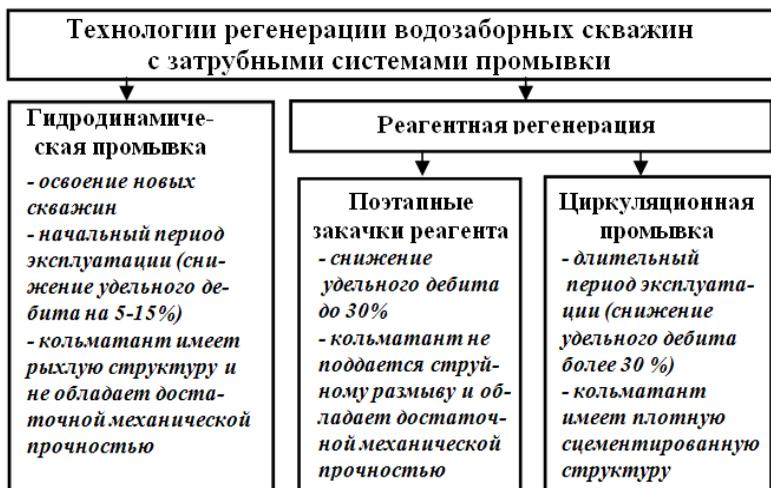


Рисунок 5.1 – Классификация технологий регенерации скважин с затрубными системами промывки и условия их применения

Гидродинамическая промывка может применяться: для удаления остатков бурового раствора при освоении новых скважин и для регенерации уже пробуренных скважин, когда кольматант еще не

приобрел прочную цементированную структуру и представлен рыхлыми, геле - или пастообразными отложениями, не обладающими достаточной механической прочностью. Этот способ не требует применения дорогостоящих реагентов и технологического оборудования специального исполнения и основывается на создании с помощью циркуляционных трубок в гравийной обсыпке фильтрационного потока чистой воды, который интенсифицирует процесс удаления отложений. В определенных условиях гидродинамическая промывка может выполняться с забором воды из водопровода или соседней скважины, что упрощает условия проведения текущего ремонта, т.к. при этом исключается необходимость применения дополнительного насосного оборудования и емкости с водой. Учитывая режим эксплуатации скважин и интенсивность процесса кольматантообразования, рациональный межремонтный период при таких обработках следует принимать в пределах от 6 до 12 месяцев.

Способ поэтапных закачек реагента может применяться при снижении удельного дебита скважин до 30 % относительно первоначального (ориентировочно через 3-6 лет после начала эксплуатации), когда кольматирующие отложения упрочнились, приобрели цементированную структуру и не поддаются струйному размыву. Этот способ характеризуется относительно низкой стоимостью и простотой и заключается в периодической подаче (в т. ч. самотечной) раствора реагента непосредственно в гравийную обсыпку по циркуляционным трубкам и периодической его откачке вместе с продуктами реакции из ствола скважины. При эксплуатации водоносных пластов с железосодержащими водами рациональный межремонтный период способа в установившейся практике принимается в пределах от 1 до 4 лет [29].

Циркуляционную реагентную промывку следует применять для длительно эксплуатирующихся скважин при снижении их удельного дебита относительно первоначального более чем на 30 %, когда кольматант приобрел прочную цементированную структуру и регенерация фильтров способами поэтапных закачек реагента и гидродинамической промывки неэффективна. Такой способ заключается в создании с помощью циркуляционных трубок в гравийной обсыпке скважин циркуляции раствора реагента, который интенсифицирует процесс растворения и удаления отложений. Для повышения эффективности растворения осадков при таких обра-

ботках возможно проведение предварительных импульсных воздействий на кольматант (электроразряд, пневмовзрыв, газовый взрыв и др.). Межремонтный период при затрубной циркуляционно-реагентной промывке следует принимать в пределах от 3 до 5 лет.

Из вышесказанного следует, что применимость предложенных способов регенерации зависит преимущественно от состава и структуры кольматирующих осадков. О природе и характере отложений можно судить по качеству подземных вод, определяющими параметрами которых являются: концентрация и формы железа, кальция, магния, алюминия, кремния, марганца, сульфатов, хлоридов, водорастворимого органического вещества, свободной углекислоты, а также щелочнокислотные и окислительно-восстановительные условия. Так, применительно к Республике Беларусь, при выборе способа регенерации для предварительной оценки параметров кольматирующих осадков можно использовать результаты районирования территории республики по условиям и характеру кольматажа, полученные Панасенко В.А. [105]. Вместе с тем, наиболее полное представление о кольматирующих осадках можно получить только путем проведения детального обследования скважины, снизившей свой дебит и планируемой к ремонту. Обследование необходимо для обоснования и выбора технологии ремонтно-восстановительных работ. Установление состава и структуры кольматанта сопряжено со сложностью отбора проб непосредственно из прифилтровых зон скважин. Исследование внутренней поверхности фильтра с помощью подводной видео- или фотосъемки, например фотоскопом или буроскопом, разработанными в институте Гидропроект (А. М. Викторов) [28], дает лишь общее визуальное представление о кольматанте и является недостаточно информативным. Поэтому, с достаточной для практики точностью, состав и структуру кольматирующих отложений можно идентифицировать по осадкам на водоподъемном оборудовании, надфилтровых трубах по рекомендациям ВНИИВОДГЕО (Гаврилко В.М., Алексеев В.С. и др.) [4].

Лабораторные и натурные исследования затрубной регенерации подтвердили эффективность предложенных способов декольматации скважин с гравийными фильтрами [98, 106].

5.2 Обоснование технологических схем затрубной регенерации

При разработке технологий затрубной регенерации скважин, основанных на создании промывного потока воды (реагента) в гравийной обсыпке, анализировались две основные схемы промывки (рисунок 5.2).

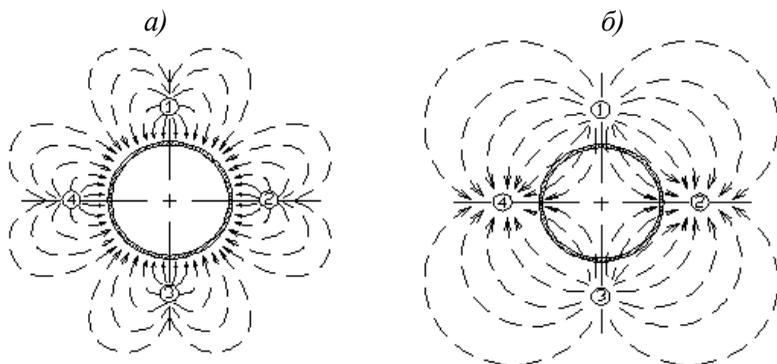
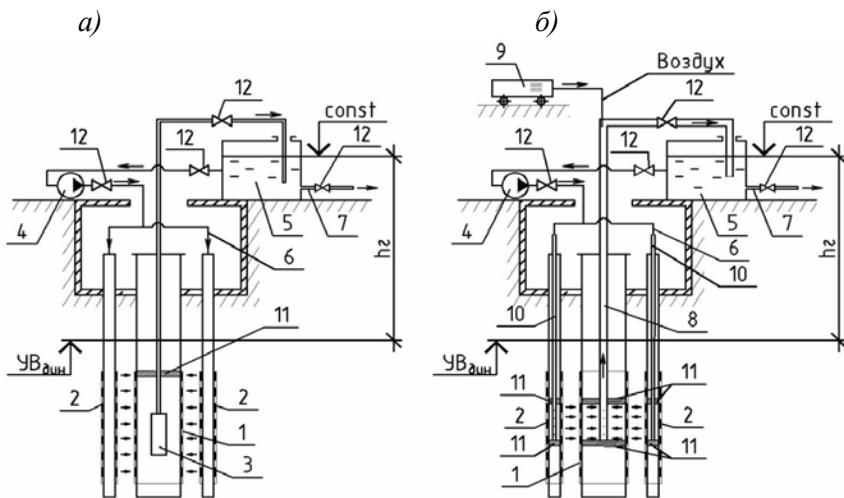


Рисунок 5.2 – Схемы движения фильтрационного потока:
а – при закачке жидкости в циркуляционные трубки;
б – при откачке жидкости из двух и закачке в две противоположные циркуляционные трубки

Согласно 1-ой схемы (рисунок 5.2а) в циркуляционные трубки непрерывно производят закачку промывной жидкости и одновременно производят откачку из ствола скважины. При 2-ой схеме (рисунок 5.2б) задействуют только циркуляционные трубки, когда раствор реагента либо чистую воду непрерывно подают в две диаметрально противоположные трубки 1 и 3, а откачку производят из трубок 2 и 4 [27]. Анализ схем показал, что область применения 2-ой схемы ограничена скважинами с высокими статическими уровнями. Это обусловлено сложностью откачки промывной жидкости из трубок малого диаметра при низких статических уровнях, превышающих допустимую высоту всасывания наземных насосов, составляющую 7-8 м. Поэтому в дальнейшем рассматривалась 1-ая схема, в которой трубки работают в режиме нагнетания.



- 1 – фильтр скважины; 2 – затрубная система регенерации; 3 – погружной насос;
 4 – насос системы промывки; 5 – емкость; 6 – распределительная система;
 7 – сливной патрубкок; 8 – эрлифт; 9 – компрессор; 10 – заливочная труба;
 11 – уплотнительная манжета (пакер); 12 – задвижка

Рисунок 5.3 – Технологические схемы затрубной промывки скважин:
 а – обработка по всей длине фильтра одновременно;
 б – обработка по интервалам

Затрубные гидродинамическая и циркуляционная реагентная промывки фильтров скважин могут осуществляться по всей длине фильтра одновременно или поинтервально. Для затрубной промывки фильтра по всей длине могут применяться погружной насос, эрлифт или гидроэлеватор, которые устанавливают в стволе скважины. Технологическая схема с применением погружного насоса представлена на рисунке 5.3а.

Затрубную промывку осуществляют следующим образом. В открытый ствол скважины устанавливают водоподъемное оборудование (погружной насосный агрегат 3). Между фильтровой и надфильтровой зонами скважины для разрыва их гидравлической связи устанавливают пакер 11. Затем на поверхности собирают установку для промывки скважины, включающую насос 4 системы промывки, емкость 5 и систему трубопроводов с арматурой 12. Насосом 4 из

емкости 5 непрерывно подают в циркуляционные трубки промывную жидкость. Одновременно откачивают ее из-под пакерного пространства насосом 3 назад в емкость 5. При равенстве расходов закачки и откачки используют раствор реагента и реализуют циркуляционную регенерацию. При гидродинамической промывке расход откачки из скважины должен превышать расход закачки промывной жидкости в затрубную систему, что предполагает холостой сброс дополнительного расхода, привлекаемого из водоносного пласта, через сливной патрубков 7.

Технологическая схема регенерации фильтра скважины по всей его длине имеет некоторые ограничения. При обработке фильтра значительной длины возрастает мощность оборудования промывки и возможна неравномерная декольматация фильтра по высоте, что обусловлено большей естественной закольматированностью верхней части фильтра по сравнению с нижней [4, 28, 107]. В этой связи, промывной фильтрационный поток будет устремляться к скважине по наиболее проницаемым участкам гравийного фильтра, поэтому наиболее интенсивной обработке будет подвергнута нижняя мало-закольматированная часть фильтра, которая в ней меньше всего нуждается. Следовательно, описанная технологическая схема рекомендуется в скважинах, незначительно снизивших свой дебит и имеющих относительно небольшую длину водоприемной части.

Для регенерации скважин, оборудованных фильтрами с длиной более 20м, а также для скважин, длительно находящихся в эксплуатации без ремонтных мероприятий, целесообразно применять технологическую схему поинтервальной обработки с использованием пакеров и заливочных трубок с уплотнительными манжетами [108]. Это позволяет применять менее энергоемкое технологическое оборудование и обеспечивает условия для более равномерной декольматации фильтра.

Поинтервальная гидродинамическая и циркуляционно-реагентная промывка (рисунок 5.3б) предполагает разделение фильтра скважины на отдельные участки, которые обрабатывают последовательно. Откачка воды или реагента при такой обработке осуществляется с помощью погружного насоса, эрлифта или гидроэлеватора, установленного в скважине. Процесс регенерации заключается в следующем. На водоподъемной колонне эрлифта 8 устанавливаются горизонтальные уплотнительные манжеты (пакеры) 11, которые

выделяют обрабатываемый интервал фильтра скважины 1. Подача реагента (чистой воды) из емкости 5 в затрубную систему регенерации 2 производится с помощью заливочных трубок 10, которые оснащены уплотнительными манжетами 11. Шаг уплотнительных манжет 11 на заливочных трубках 10 и на водоподъемной колонне эрлифта 8 одинаковый, что обеспечивает движение радиального фильтрационного потока только в заданном интервале гравийного фильтра. По завершению промывки интервала фильтра 1 производят перемещение заливочных трубок 10 и водоподъемной трубы эрлифта 8 на следующий интервал.

Чтобы избежать переупаковки частиц гравийной обсыпки, закачку промывной жидкости в циркуляционные трубки необходимо начинать с небольших расходов и затем постепенно их наращивать.

Последовательность выполнения технологических операций при затрубной реагентной (безреагентной) промывке скважины следующая:

- измеряют и анализируют основные параметры скважины, используя циркуляционные трубки в качестве пьезометров;
- отбирают пробы кольматирующего осадка с водоподъемного оборудования, уточняют параметры промывки;
- после выполнения подготовительных работ и монтажа установки для регенерации включают водоподъемное оборудование системы откачки «на выброс»;
- включают насос системы закачки, а затем путем плавного открытия запорных вентилей включают в работу циркуляционные трубки затрубной системы;
- выполняют промывку скважины с одновременным контролем показателей и регулировкой параметров регенерации;
- по завершению промывки плавно закрывают запорные вентили циркуляционных трубок;
- отключают насос системы закачки и выполняют прокачку скважины с визуальным и инструментальным контролем качества воды;
- измеряют и анализируют основные параметры скважины после регенерации, а затем выполняют демонтаж установки для регенерации, монтируют водоподъемное оборудование.

5.3 Технологические основы затрубной гидродинамической регенерации

Определяющим условием, влияющим на эффективность гидродинамической безреагентной промывки, является достижение промывающей скорости $v_{пр}$ фильтрационного потока и соответствующего ей градиента $J_{пр}$, при которых начинается интенсивный суффозионный вынос осадка с рыхлой, желе- или пастообразной структурой из кольматационного кольца.

Исходим из того, что толщина кольматационного кольца на начальных этапах эксплуатации скважин незначительна, и составляет 20-30 мм.

Анализ характера гидродинамических сеток (рисунок 2.7), построенных по уравнениям (2.8) и (2.19), показывает, что промывной поток в пределах кольматационного кольца имеет радиальное направление, поэтому средняя скорость фильтрационного потока по мере уменьшения расстояния до водоприемной поверхности фильтра будет возрастать пропорционально уменьшению площади живого сечения. Для равномерного и интенсивного выноса отложений из всего кольматационного кольца, на его внешнем контуре необходимо обеспечить промывающую скорость $v_{пр}$ фильтрационного потока, величина которой будет зависеть от типа и структуры кольматирующих образований, а также от гранулометрического состава гравийного фильтра.

Имея тип и гранулометрический состав гравийной обсыпки (определяется проектом и паспортом скважины), требуемую скорость фильтрации $v_{тр}$ и продолжительность промывки устанавливают опытным путем в лабораторных условиях, используя для этого извлеченные из скважины образцы кольматирующего осадка. При отсутствии опытных данных возможно использование справочных материалов, при этом необходимо оперировать градиентом напора фильтрационного потока. При гидродинамической промывке градиент напора в кольматационном кольце должен быть выше предельно допустимого, при котором начинается интенсивный вынос осадка. Гравийную обсыпку, представляющую собой крупнозернистый песок, закольматированный глинистыми частицами и пастообразными осадками, следует рассматривать как супесчаный грунт и

принимать $I_{\text{доп}} \geq 0,85$ [101], при кольматации гравийной обсыпки мелким песком ее следует рассматривать как крупнозернистый песок и принимать $I_{\text{доп}} \geq 1,1$ [101].

Используя циркуляционные трубки в качестве пьезометров, полевыми методами [94] или по методике, приведенной в разделе 3.3, определяют фактический средний коэффициент фильтрации прифилтровой зоны k_{1n} , а затем по формуле Дарси вычисляют значение требуемой скорости фильтрационного потока

$$v_{\text{тр}} = k_{1n} \cdot I_{\text{доп}} \quad . \quad (5.1)$$

Для удаления кольматанта, представленного мелкодисперсным железистым осадком, скорость $v_{\text{тр}}$ в зависимости от степени снижения проницаемости прифилтровой зоны следует принимать в интервале от 11 до 20 мм/с. Продолжительность промывки следует принимать равной 40...80 мин.

При безреагентной гидродинамической регенерации величину суммарного расхода Q_c , откачиваемого из ствола центральной скважины, определяют по формуле:

$$Q_c = v_{\text{тр}} \cdot \omega_k = v_{\text{тр}} \cdot 2\pi R_k l_{\text{ф}}, \quad (5.2)$$

где Q_c – расход откачки;

ω_k – площадь наружной поверхности «кольматационного кольца»;

R_k – внешний радиус «кольматационного кольца»;

$l_{\text{ф}}$ – длина фильтра.

Расход откачки Q_c определяют по выражению (2.1) как сумму расхода Q_n , подаваемого в циркуляционные трубки и дополнительного расхода $Q_{\text{пл}}$, забираемого из водоносного пласта.

Расход из пласта $Q_{\text{пл}}$ не должен превышать фактический дебит скважины $Q_{\text{ск}}$ (определяется паспортом), т.к. при увеличении забора воды возникает опасность развития суффозионных процессов в водовмещающих породах, что является недопустимым. С учетом того, что гидродинамическая промывка эффективна на начальных этапах эксплуатации водозабора, когда дебит скважины снижен не более чем на 5-15%, а кольматант представлен рыхлыми или пастообразными отложениями, расход $Q_{\text{пл}}$ следует принимать в диапазоне

$(0,5...1)Q_c$. Суммарный расход Q_n , подаваемый в циркуляционные трубы, определяет производительность оборудования системы за качки и определяется по формуле

$$Q_n = Q_c - Q_{пл} = 2v_{тр}\pi Rl_{ф} - Q_{пл}. \quad (5.3)$$

Имея расчетные расходы, параметры скважины и затрубной системы регенерации, по формуле (2.8) или (2.19) строят гидродинамическую сетку фильтрации, по которой уточняют градиенты фильтрационного потока в кольматационном кольце и уровни воды в откачной скважине и циркуляционных трубах. При необходимости корректируют принятые расходы Q_c , Q_n и расчет повторяют, добывая значения $I \geq I_{доп}$.

Напор водоподъемного оборудования H_c , устанавливаемого в стволе регенерируемой скважины, определяют как сумму геометрической высоты подъема h_r и потерь напора в водоподъемном трубопроводе $h_{тр}$

$$H_c = h_r + h_{тр}. \quad (5.4)$$

Потери напора в водоподъемном трубопроводе $h_{тр}$ зависят от его конструктивных особенностей и определяются как сумма потерь напора по длине и на местных сопротивлениях по обычным формулам гидравлики [109, 110]. Геометрическую высоту подъема h_r (см. рисунок 5.3) определяют как разность отметок уровня воды в напорной емкости, установленной на дневной поверхности, и динамического уровня воды в откачной скважине, определяемого по гидродинамической сетке. По известным значениям требуемого напора H_c и расхода Q_c определяют тип и марку погружного насоса [111-112] или водоподъемного оборудования другого типа.

Затрубная система регенерации, являясь важным элементом конструкции скважины, должна обеспечивать равномерное распределение промывной воды по всему контуру гравийной обсыпки. Установлено, что оптимальное количество циркуляционных труб составляет от 4 до 6 [98,113] со скважностью фильтровой части $\eta_o = 0,25...0,3\%$. Имея технические параметры затрубной системы и технологические расходы, расчетом определяют требуемый напор

насосного оборудования, работающего на закачку. Схема к гидравлическому расчету представлена на рисунке 5.4.

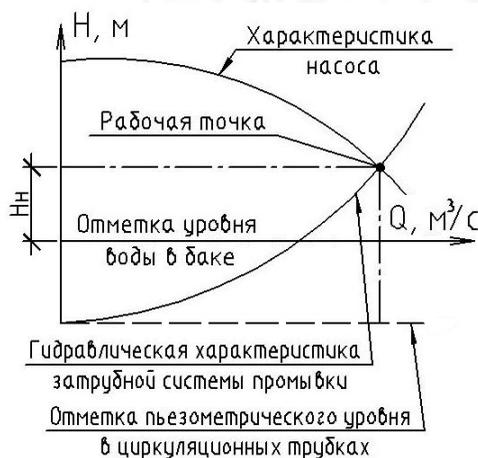
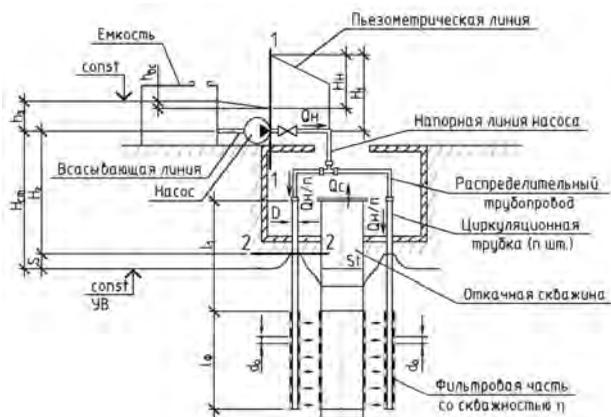


Рисунок 5.4 – Схема к расчету напора насосного оборудования системы закачки и график совместной работы насоса и затрубной системы промывки

Напор H_n насоса затрачивается на преодоление геометрического напора, гидравлических сопротивлений в его напорной и всасывающих линиях, распределительном трубопроводе и в циркуляционных трубках системы промывки:

$$H_n = h_{\text{вс}} + h_{\text{нл}} + h_{\text{рт}} + h_{\text{цт}} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} - H_{\Gamma} - h_3, \quad (5.5)$$

где $h_{\text{вс}}$, $h_{\text{нл}}$, $h_{\text{рт}}$, $h_{\text{цт}}$ – потери напора во всасывающей и напорной линиях, распределительном трубопроводе и циркуляционных трубах соответственно;

v_1 , v_2 – средние скорости движения воды в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно;

H_{Γ} – располагаемый геометрический напор;

h_3 – заглубление оси насоса под уровень воды в емкости.

Располагаемый геометрический напор H_{Γ} определяют по формуле

$$H_{\Gamma} = H_{\text{ст}} - S, \quad (5.6)$$

где $H_{\text{ст}}$ – статический напор, определяемый как разность отметок уровня воды в емкости и статического уровня в скважине;

S – повышение уровня воды в циркуляционных трубах, определяемое по гидродинамической сетке.

Потери напора определяют по формулам гидравлики для расчета трубопроводов как сумму потерь напора по длине и на местных сопротивлениях [96, 86].

Средние скорости движения воды в сечениях 1-1 и 2-2

$$v_1 = \frac{4Q_n}{\pi D_1^2}, \quad (5.7)$$

$$v_2 = \frac{4Q_n}{n \pi D_2^2}, \quad (5.8)$$

где D_1 – диаметр напорного трубопровода насоса системы закачки;

D_2 – диаметр циркуляционных трубок.

Потери напора в циркуляционных трубках $h_{\text{цт}}$ складываются из потерь напора на транзитном участке $h_{\text{цт.тр}}$, потерь напора на фильтровом участке $h_{\text{цт.ф}}$ и потерь напора на выходе из отверстий $h_{\text{цт.отв}}$. Циркуляционные трубки в гидравлическом отношении представляют собой параллельные трубопроводы, поэтому потери напора в них равны между собой. Их определяют по формуле

$$h_{\text{цт}} = h_{\text{цт.тр}} + h_{\text{цт.ф}} + h_{\text{цт.отв}} \quad (5.9)$$

Потери напора в транзитной части

$$h_{\text{цт.тр}} = \frac{\lambda \cdot l_1}{D_2} \frac{v_2^2}{2g} = \frac{8\lambda \cdot l_1}{n^2 D_2^5} \frac{Q_H^2}{\pi^2 g}, \quad (5.10)$$

где λ – коэффициент Дарси, который зависит от числа Рейнольдса и шероховатости стенок трубопровода;

l_1 – длина транзитного участка.

Потери напора на выходе из отверстий определяют из формулы истечения через отверстия [96, 114]

$$\frac{Q_H}{n} = \mu \omega_{\text{ф}} \sqrt{2gh_{\text{цт.от}}} \quad (5.11)$$

$$h_{\text{цт.отв}} = \frac{Q_H^2}{n^2 \mu^2 \omega_{\text{ф}}^2 2g}, \quad (5.12)$$

где $\omega_{\text{ф}}$ – суммарная площадь отверстий в фильтровой части;

μ – коэффициент расхода отверстий, принимаемый по справочным данным, $\mu = 0,6 \dots 0,64$ [114].

Площадь отверстий в фильтровой части циркуляционных трубок

$$\omega_{\text{ф}} = 0,01 \eta_o \pi D_2 l_{\text{ф}}, \quad (5.13)$$

где $\eta_o = 0,25 \dots 0,3\%$ – скважность.

С учетом (5.13) после упрощения выражение (5.12) принимает вид

$$h_{\text{цт.от}} = \frac{Q_H^2}{\left(n\mu\eta_o\pi D_2 l_\Phi\right)^2 2g}. \quad (5.14)$$

Потери напора на фильтровом участке $h_{\text{цт.ф}}$ определяются как потери напора в трубопроводе при равномерной раздаче по длине с отсутствием транзитного расхода [114]

$$h_{\text{цт.ф}} = \frac{1}{3} A_T l_\Phi \left(\frac{Q_H}{n}\right)^2, \quad (5.15)$$

где A_T – удельное сопротивление трубопровода.

Удельное сопротивление трубопровода [110]

$$A_T = \frac{8\lambda}{g\pi^2 D_2^5}. \quad (5.16)$$

Подставив (5.16) в выражение (5.15) получим

$$h_{\text{цт.ф}} = \frac{8\lambda}{3g\pi^2 D_2^5} l_\Phi \left(\frac{Q_H}{n}\right)^2. \quad (5.17)$$

Подставив выражения (5.10), (5.14) и (5.17) в формулу (5.9), получим

$$h_{\text{цт}} = \frac{Q_H^2}{\pi^2 n^2 g D_2^2} \left(\frac{8\lambda(3l_1 + l_\Phi)}{3D_2^3} + \frac{1}{2(0,01\mu\eta_o \cdot l_\Phi)^2} \right) \quad (5.18)$$

Подставляя найденные значения $v_1, v_2, H_\Gamma, h_{\text{вс}}, h_{\text{нл}}, h_{\text{рт}}, h_{\text{цт}}, h_3$ в формулу (5.5) получаем требуемый напор H_n насоса закачки. Далее по найденным значениям потребного напора H_n и расхода Q_n

определяется тип и марка оборудования. Схематичный график совместной работы насоса и затрубной системы промывки представлен на рисунке 5.4. Отрицательное значение напора H_n говорит о том, что подача воды из емкости в затрубную систему не требует применения насоса закачки и может осуществляться самотеком из бака.

Основными контролируруемыми показателями процесса гидродинамической безреагентной промывки является качество воды, откачиваемой из ствола скважины, и давление в напорной линии системы закачки. Прекращение выноса осадка из прифилтровой зоны и стабилизация давления в напорном патрубке насоса системы закачки указывают на завершение процесса регенерации.

Безреагентная гидродинамическая промывка может применяться: для удаления остатков бурового раствора при освоении новых скважин и для регенерации ранее пробуренных, пока кольматант еще не приобрел прочную цементированную структуру и представлен рыхлыми, геле - или пастообразными отложениями, не обладающими достаточной механической прочностью.

5.4 Технологические основы затрубной реагентной регенерации

Наиболее эффективные способы декольматации скважин от цементированного осадка основываются на применении реагентов. Технология такой регенерации состоит из выбора типа реагента и определения его потребного количества, приготовления раствора, подачи его в скважину, растворения кольматирующих образований фильтра и прифилтровой зоны, прокачки скважины после ее обработки. Применительно к скважине, оборудованной затрубной системой регенерации, декольматацию реализуют способами поэтапных закачек реагента и циркуляционно-реагентной промывки.

Выбор типа реагента для обработки скважины должен основываться преимущественно на данных о химическом составе кольматанта, взятого с водоподъемного оборудования при обследовании скважины, при этом необходимо учитывать также конструктивные особенности самой скважины. Наиболее эффективными и распространёнными реагентами, используемыми для химической обработки скважин, являются синтетическая соляная кислота и дитионит натрия [4, 58, 105]. Во ВНИИВОДГЕО Андреевым К.Н. установле-

но, что многократное воздействие данных реагентов на скважинные фильтры, изготовленные с применением стали 40Х или латуни, не вызывает существенного снижения их прочностных свойств [32]. Однако, учитывая относительно низкую эффективность дитионита натрия при растворении кольматирующих отложений с повышенным содержанием сульфида железа, к наиболее универсальным и перспективным реагентам в настоящее время следует отнести кислотное очищающее средство «Дескам» (ТУ РБ 37430824.001-97), содержащее 20% HCl и характеризующееся низкой коррозионной агрессивностью по отношению к металлам [98].

Для повышения эффективности растворения и удаления кольматанта перед реагентной регенерацией скважины можно применить импульсные обработки, которые способствуют разрушению отложений и появлению дополнительных фильтрационных каналов, увеличивающих площадь контакта реагента с цементирующими осадками. Для импульсных обработок может применяться газоимпульсный способ, основанный на использовании водородно-кислородной газовой смеси [5].

Количество соляной кислоты, необходимое для проведения ремонтных мероприятий, определяется по известному химическому составу и массе кольматирующих отложений в соответствии с методикой, приведенной в разделе 3.3. Учитывая сложности в точном установлении массы кольматанта, содержащегося в гравийной обсыпке, расход реагента следует уточнять в процессе химической обработки скважин.

После завершения реагентной обработки необходимо выполнять прокачку скважины с одновременным контролем качества воды. Прокачка выполняется до тех пор, пока откачиваемая вода не будет иметь естественный химический состав. В установившейся практике ориентировочную продолжительность откачки можно принять равной 8 - 12 ч, что соответствует одной рабочей смене [7].

При обработке скважин с использованием реагентов перспективным является использование электронасосных агрегатов, рабочие ступени и корпус которых изготовлены из химически стойких материалов. Такие насосы отличаются высокой износостойкостью и стабильностью работы, что соответствует условиям проведения регенерации скважинных фильтров.

5.4.1 Способ поэтапных закачек реагента

При регенерации скважин способом поэтапных закачек реагента по циркуляционным трубкам в ее зафильтровое пространство порционно подают раствор реагента, выдерживают его там заданное время, а затем удаляют, производя откачку. Схема установки и состав оборудования при таких обработках представлены на рисунке 5.3а. Для периодической подачи раствора реагента в циркуляционные трубки может использоваться геометрическая разность уровней воды в скважине и реагента в баке, что исключает необходимость применения насосного оборудования системы закачки.

Исследования кинетики выщелачивания колюматизирующих отложений в режиме “реагентной ванны” показали, что для достижения нужной степени деколюматации гравийной обсыпки требуется несколько этапов обработки, связанных с заливкой свежей порции реагента в прифильтровую зону. Поэтому определяющими технологическими параметрами затрубной регенерации скважин способом поэтапных закачек реагента являются продолжительность и количество этапов обработки.

Продолжительность регенерации скважины зависит преимущественно от диаметра частиц гравийной обсыпки d_o (определяется проектом и паспортом скважины) и параметров реагента, и ее определяют в соответствии с методикой, приведенной в разделе 3.1. Для обычных скважинных условий в случае применения реагента с максимальной концентрацией солей $C_m=50$ кг/м³ продолжительность одного этапа следует принимать равной 15 мин. при $d_o=1,5$ мм; 22 мин. при $d_o=2,0$ мм и 35 мин. при $d_o=2,5$ мм. Общее количество этапов по условиям растворения принимается равным $N_p=14$ [86].

Учитывая, что заколюматированная обсыпка скважины характеризуется сравнительно низкой пористостью, ограничение по количеству этапов заливки реагента накладывается не только по условиям растворения отложений, но и по остаточной пористости прифильтровой зоны.

Количество этапов обработки N_n , обусловленное параметрами заколюматированной гравийной обсыпки, определяется следующим образом. Имея коэффициенты фильтрации прифильтровой зоны новой скважины $k_{0П}$ и снизившей свой дебит $k_{1П}$ по формуле (3.42)

вычисляют начальную насыщенность порового пространства кольматантом α . По мере удаления кольматанта значение параметра α должно уменьшаться и приближаться к 0.

Принимая, что после заливки реагента в прифильтровую зону весь объем пор заполняется жидкостью и введя поправочный коэффициент $\eta = 0,9 \dots 1$, учитывающий степень экранизации зерен гравийной обсыпки пузырьками газа, по известной начальной пористости грунта n_o (определяется из документации по скважине) вычисляют средний объем одной порции реагента

$$W_{1n} = \eta n_o l_{\phi} (R_{\Gamma}^2 - r_c^2) (1 - \alpha/2), \quad (5.20)$$

где R_{Γ}, r_c – радиусы гравийной обсыпки и скважины соответственно (см. рисунок 3.6).

По известной массе соляной кислоты M_{HCL} (в пересчете на хлористый водород 100%-ой концентрации), вычисленной по формуле (3.31), определяют требуемое количество реагента W_{HCL} в единицах объема, при этом необходимо учитывать понижение концентрации кислоты, связанное с ее разбавлением водой, находящейся в интервале фильтра. Затем определяют минимальное технически возможное количество этапов заливки реагента $N_n = W_{HCL} / W_{1n}$.

При выполнении регенерации скважины способом поэтапных закачек реагента при назначении количества этапов обработки определяющим является условие полного растворения кольматанта. В случае если количество этапов обработки N_n , полученное по условиям остаточной пористости, превышает количество этапов N_p по условиям растворения, в целях снижения необоснованного расхода реагента следует уменьшить его расчетную концентрацию и повторить расчет величины N_n (см. раздел 3.1), добиваясь соблюдения условия $N_p \geq N_n$.

5.4.2 Способ циркуляционной промывки

При циркуляционно-реагентной регенерации в циркуляционные трубки из емкости, расположенной на поверхности, непрерывно подают раствор реагента с постоянной концентрацией и одновременно производят откачку из скважины, побуждая промывную жидкость

двигаться через закольцованную гравийную обсыпку от циркуляционных трубок к скважине. Откачиваемый реагент вместе с продуктами реакции возвращают назад в емкость, а затем снова подают в затрубную систему, производя циркуляцию [81, 113, 115]. Для минимизации потерь реагента и предотвращения разбавления его водой при обработке расход закачки Q_n должен быть равен расходу откачки Q_c . Оптимальную концентрацию реагента в системе необходимо поддерживать путем его дозирования в емкость. Схема установки и состав оборудования при обработке фильтра по всей длине и по интервалам представлены на рисунке 5.3.

Техническими параметрами установки для циркуляционно-реагентной промывки скважин на воду являются производительность (подача и напор) оборудования систем закачки и откачки реагента. Напор насосного оборудования следует определять с учетом гидродинамической сетки фильтрации (см. разделы 2.3 и 2.4) в соответствии с методикой, приведенной разделе 5.3, соблюдая баланс расходов $Q=Q_n=Q_c$.

Проведенные исследования показали, что одним из основных технологических параметров циркуляционно-реагентной обработки, определяющим продолжительность процесса растворения кольматирующих отложений, является скорость фильтрационного потока промывной жидкости, которая в свою очередь взаимосвязана с расходом, циркулирующим в системе [116, 117]. По известным параметрам кольматанта и реагента, задавшись величиной расхода Q (рекомендуется принимать в пределах 0,15...1 л/с на 1 м.п. фильтра), определяют продолжительность процесса регенерации по методике, приведенной в разделе 3.2. При этом необходимо учитывать конструктивные особенности самой скважины (гранулометрический состав, начальная пористость и радиус гравийной обсыпки, длина и диаметр фильтра), определяя их по паспортным данным. Циркуляционный расход Q не должен превышать максимальный расход Q_{max} при котором снижение уровня S в откачной скважине при циркуляции будет ниже допустимого значения $S_{доп}$, при котором обнажится фильтр, т. е. должно соблюдаться условие: $S < S_{доп}$.

Продолжительность процесса циркуляционно-реагентной регенерации следует принимать в пределах до 1,5 ч, что учитывает возможность проведения подготовительных и ремонтных работ в течение одной смены. Для обычных скважинных условий при расходе

раствора реагента $Q = 1$ л/с с максимальной концентрацией солей $C_m = 40$ кг/м³ теоретическая продолжительность процесса декольматации гравийной обсыпки радиусом $r_1 = 0,16$ м и длиной $l_\phi = 6$ м (радиус фильтра скважины $r_c = 0,08$ м) с учетом небольшого запаса составляет 30 мин при $d_o = 1,0$ мм; 45 мин при $d_o = 2,5$ мм и 70 мин при $d_o = 4,0$ мм [116].

Результатом регенерации скважины после затрубной циркуляционной реагентной промывки является повышение проницаемости прифилтровой зоны, в результате чего, в соответствии с напорной характеристикой насосного оборудования, происходит смещение рабочей точки в сторону увеличения расхода и уменьшения напора [118-119]. Благодаря увеличению промывного расхода повышаются фильтрационные скорости на контуре закольматированной зоны и улучшаются условия растворения и удаления отложений. Основными контролируемыми показателями регенерации являются показатель электрического сопротивления реагента и давление в напорной линии системы закачки. Стабилизация давления в системе закачки реагента и стабилизация электропроводности реагента в емкости указывают на завершение процесса затрубной регенерации фильтра (интервала обработки).

5.5 Опыт сооружения скважин с затрубными системами промывки и отработка технологий их текущего ремонта

5.5.1 Скважины в д. Узла Мядельского района и п. Ждановичи Минского района

Скважины с затрубными системами регенерации включены в действующий ТКП 17.04-21-2010(02120) «Правила проектирования, сооружения (строительства), ликвидации и консервации буровых скважин различного назначения», раздел 5.3. Применительно к системам коммунального водоснабжения водозаборные скважины с затрубной системой регенерации были пробурены в 2011 году на водозаборе п. Ждановичи Минского района и в д. Узла Мядельского района Минской области. Геолого-технический разрез водозаборной скважины в д. Узла и общий вид ее оголовка представлены на рисунке 5.5.

а)

Метр/фм № слоя	Геологический этаж	Литологическое описание пород (данные по бурению по устойчивости)	Глубина, м		Геологический разрез и конструкция скважины в Узле Мядельского района	Диаметр долота, мм	Диаметр колонны, мм	
			от	до				интервал бурения, м
2	1	Песок желтый слой (IV-II)	0	4		495 (0-9)м	426 (0-9)м	
4	2	Гравий серый (IV-II)	4	8				
6	3	Суглинок бураый с гравием и галечкой (III-II)	8	18				
8								
10	4	Песок желтый равномерный (II-II)	18	27				
12								
14								
16								
18	5	Супесь (II-II)	27	32				
22								
24								
26								
28	6	Суглинок с гравием (II-II)	32	34				119 (0-34) 168(34-43)
30								
32								
33								
34								
35								
36	7	Песок равномерный волнистый (II-II)	34	45				168,43
38								
40								
42								
44								
46								
48	8	Переслаивание суглинка, глин, песка (II-II)	45	60	168,52			
50								
52								
54								
56	9	Супесь (II-II)	60	70	151(0-70)			
58								
60								
62								
64								
66								
68								
70								



Рисунок 5.5 – Водозаборная скважина в д. Узла Мядельского района:
а – конструкция скважины; б – общий вид устья [106]

Согласно проектной документации в затрубном пространстве скважин установлены по 4 циркуляционные трубки с фильтровой частью из перфорированной полиэтиленовой трубы ($D_2=20$ мм) и выведены на поверхность.

Скважина в д. Узла сооружалась следующим образом. При вскрытии водоносного горизонта использовали трехшарошечное долото диаметром 394 мм, в которое буровым насосом непрерывно подавали сапропелевый раствор. Скважина была оборудована проволочным фильтром диаметром 168 мм длиной 9 м в интервале (34 – 43)м и затрубной системой регенерации. Нижняя часть циркуляционных трубок имеет сквозную двустороннюю перфорацию, выполненную сверлом $d_{отв}=1,0$ мм с шагом 0,1 м в интервале фильтра. Перфорированную часть трубок крепили хомутами и саморезами к деревянным прокладкам толщиной 60 мм, установленным между трубками и проволочной обмоткой фильтра с шагом 1,5 м.

Глухую часть трубок привязывали проволокой при спуске в ствол к эксплуатационной колонне через 3-5 м.

Фильтр и эксплуатационная колонна имели снаружи центраторы для создания равномерной гравийной обсыпки снаружи фильтра. В качестве материала обсыпки использовали крупнозернистый песок (1,0-1,8 мм), соответствующий ТУ РБ 100016844.241-2001 «Песок кварцевый фильтрующий». Обсыпку создавали гравитационным способом. Средняя ее толщина составила 0,12 м.

Аналогично производились работы по монтажу затрубной системы на водозаборной скважине в п. Ждановичи Минского района. Общий вид фильтра Ø219 мм в сборе с затрубной системой регенерации, перед спуском в скважину, представлен на рисунке 5.6, а.

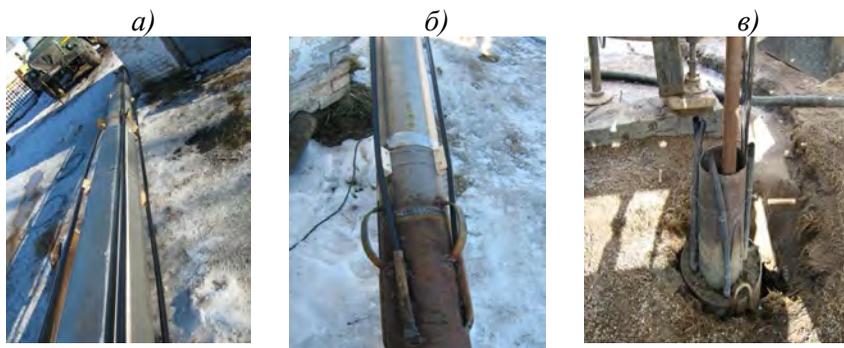


Рисунок 5.6 – Водозаборная скважина в п. Ждановичи [106]:

а – общий вид средней части фильтра; б – общий вид нижней части фильтра с отстойником; в – устье скважины

5.5.2 Скважина системы глубинного водопонижения Полоцкой ГЭС

Применительно к отрасли гидротехнического строительства в 2012 году была пробурена и оснащена затрубной системой регенерации одна из 119 скважин системы глубинного водопонижения Полоцкой ГЭС, состоящей из 4 рядов (ниток) скважин, пробуренных с шагом 10 м. Работа системы предусмотрена круглосуточной в течение всего периода строительства основных сооружений и на-

правлена на снижение пьезометрического уровня подземных вод. В состав системы глубинного водопонижения вошла скважина №2.10, оборудованная затрубной системой регенерации, которая включила в себя четыре симметрично размещенные полиэтиленовые трубки Ø20 мм, установленные в гравийной обсыпке в интервале фильтра. Абсолютная отметка устья скважины 117,5, отметка забоя 83,5. Фильтр имеет диаметр 168 мм, длину 4,5 м и установлен в интервале абсолютных отметок 90,0-85,5 на водоносные пески. Конструкция скважины и общий вид системы представлены на рисунках 5.7 и 5.8.

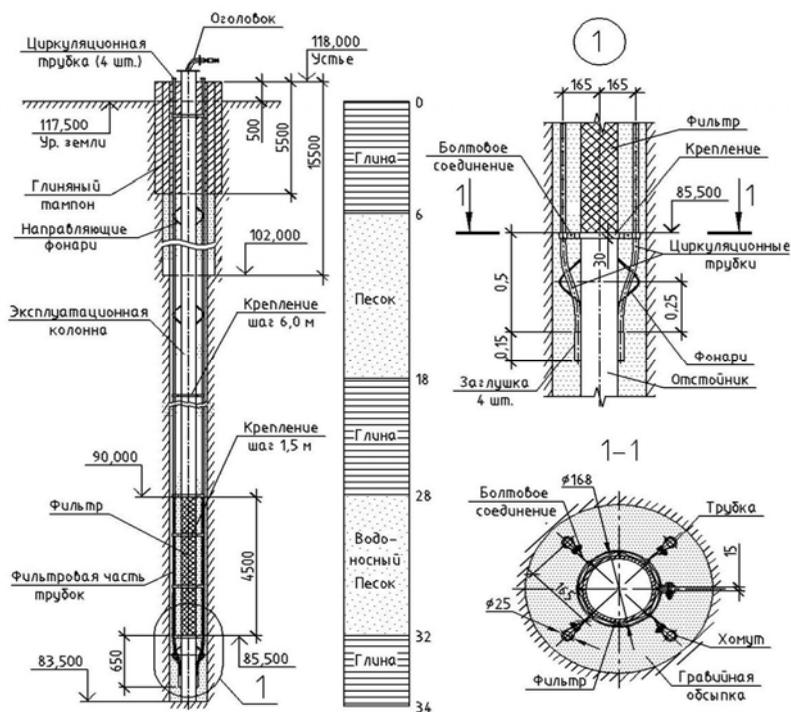


Рисунок 5.7 – Конструкция скважины №2.10 (проект РУП «Белнипиэнергопром»)



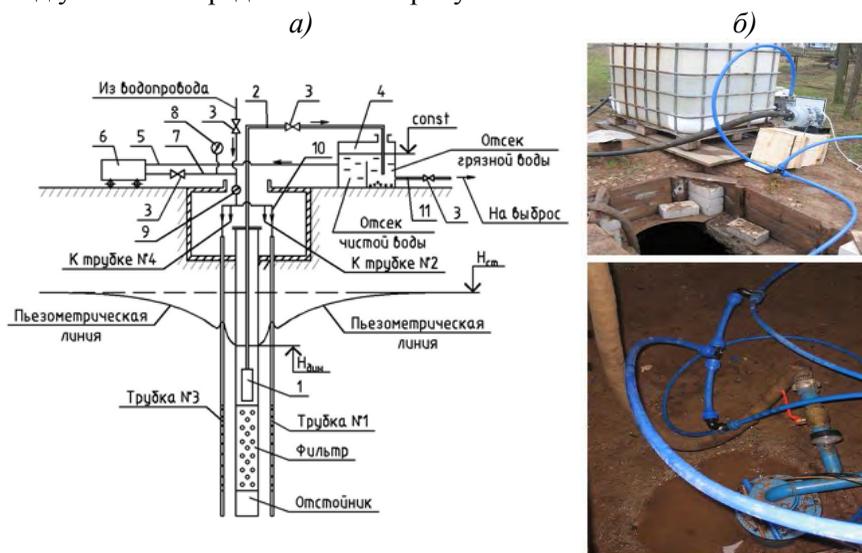
Рисунок 5.8 – Общий вид системы глубокого водопонижения Полоцкой ГЭС:
а – котлован; *б* – скважина №2.10

5.5.3 Отработка технологии гидродинамической промывки скважин в натуральных условиях

После бурения, опробования и пуска в эксплуатацию скважин, выполнялись испытания работоспособности и эффективности работы затрубной системы регенерации. Наиболее всесторонние исследования проводились на водозаборной скважине в д. Узла Мядельского района. В фильтре перед началом испытаний затрубной системы оставалась песчаная пробка, которая закрывала нижнюю половину фильтра высотой 4,5 м. Удельный дебит составлял всего $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$, что объяснялось также неполным удалением остатков бурового шлама и пластового песка из прифильтровой зоны. Учитывая характер кольтматации, а также незначительный срок эксплуатации скважины, исследования и промывка проводились с чистой водой (гидродинамическая промывка).

В результате откачки на выброс глубинным насосом, установленным в скважине, при одновременной закачке чистой воды в затрубную систему регенерации, удалось частично удалить остатки сапропеля и мелкий песок из гравийной обсыпки скважины, что несколько увеличило ее производительность. Однако, учитывая низкие расходы, забираемые из водопровода на промывку, недостаточные для обеспечения высоких градиентов и скоростей фильтрации в гравийной обсыпке, была проведена безреагентная гидродинамиче-

ская промывка открытой части фильтра с применением экспериментального образца установки для регенерации скважин. Установка была разработана в БНТУ в рамках ГНТП «Жилищно-коммунальное хозяйство» (2011–2013 гг.) и включала в себя погружной электронасосный агрегат марки ЭЦВ 6-10-50, насос системы закачки ХМ 32-20-125 К-5, емкость полиэтиленовую $V=1,0 \text{ м}^3$, счетчик воды, пульты управления насосами, запорную арматуру, шланги и фитинги. В скважину на полиэтиленовом шланге $d50 \text{ мм}$ опускался погружной электронасосный агрегат на глубину 34 м, а на дневной поверхности размещали емкость и насос системы промывки. Выход нагнетательной линии погружного насоса и всасывающая линия насоса системы промывки подключались к емкости. Схема и общий вид установки представлены на рисунке 5.9.



- 1 – погружной насос; 2 – водоподъемный трубопровод; 3 – вентиль;
 4 – полиэтиленовая емкость; 5 – всасывающая труба;
 б – насос системы промывки; 7 – нагнетательная линия; 8 – манометр;
 9 – счетчик воды; 10 – система распределения (гребенка); 11 – сливная линия

Рисунок 5.9 – Установка для регенерации скважины [106]:
 а – схема; б – общий вид

Нагнетательная линия насоса 6 подключалась к тройнику, установленному перед гребенкой. Гребенка имела 4-е выхода на 4-е нагнетательные трубки. Параллельно с нагнетательной линией циркуляционного насоса в тройник был подключен шланг Ø25 мм от соседней водозаборной скважины №1/2011. Это позволяло подавать в трубки расход от циркуляционного насоса $Q_{н1} = 3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и расход со скважины №1/2011 - $Q_{н2} = 2,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Всего суммарный расход, подаваемый в циркуляционные трубки составлял $Q_n = Q_{н1} + Q_{н2} = 3 + 2,7 = 5,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Этот расход плюс расход $Q_{пл} = 4,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ из пласта скважины № 2/2011 откачивали погружным электронасосным агрегатом ЭЦВ 6-10-50 назад в бак. Так как подача погружного насоса 1 была больше, чем суммарный расход, подаваемый насосом 6 и забираемый из водопровода, лишняя вода со шламом удалялась из емкости 4 за пределы санитарной зоны скважины. Для этого емкость 4 разделялась на 2 отсека. Вентильми 3 регулировалась производительность насосов 1 и 6 и поддерживался нужный уровень воды в емкости 4.

Гидродинамическую промывку скважины выполняли в следующей последовательности. Включали погружной насос 1 на откачку воды из скважины. После наполнения емкости 4 включали насос системы промывки 6 и открывали вентиль на подключении к сельскому водопроводу (от скважины №1/2011). Чистая вода через гребенку 10 под напором поступала одновременно в четыре циркуляционные трубки, а затем - в прифилтровую зону скважины. В пробах воды, откачиваемой в емкость насосом 1, присутствовали мелкие частицы грунта, что подтверждало эффективность данного способа регенерации. Процесс промывки осуществляли до полного окончания выноса осадка со скважины в течение двух часов. По завершению промывки оборудование отключали и объемным методом измеряли дебит скважины. Результаты гидродинамической промывки скважины с помощью экспериментального образца установки для регенерации скважин представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты регенерации фильтра скважины №2/2011 в д. Узла с помощью экспериментального образца установки для регенерации скважин

Дата замеров	Статический уровень, м	Динамический уровень, м	Понижение, м	Дебит, м ³ /ч	Удельный дебит, м ² /ч	Увеличение удельного дебита, раз
2011 г. (бурение)	14,5	34	19,5	2	0,1	-
2012 г. (регенерация)	14,5	34	19,5	7,5	0,39	3,9

В результате проведенных опытных испытаний технологии затрубной регенерации удалось повысить удельный дебит скважины с 0,1 м²/ч до 0,39 м²/ч. При одинаковом водопонижении 19,5 м, дебит скважины увеличился с 2 до 7,5 м³/ч.

Для увеличения площади водоприемной поверхности фильтра путем извлечения образовавшейся на этапе бурения песчаной пробки, на скважине также были проведены опытно-промышленные испытания гидроэлеваторной установки с регулируемым соплом и размывающим насадком [67; 68]. Результатом такого испытания стало увеличение дебита скважины с 7,5 м³/ч до 8,5 м³/ч.

На скважине №2.10 системы глубинного водопонижения Полоцкой ГЭС опытно-исследовательская работа по восстановлению проницаемости фильтра была проведена спустя 1,5 года после начала эксплуатации системы. Для регенерации применяли способ гидродинамической промывки по всей длине фильтра. Обязка устья скважины при регенерации представлена на рисунке 5.10.

В качестве источника чистой воды использовали соседнюю скважину №2.9. При этом ее напорную линию подключали к затрубной системе скважины №2.10. Откачку воды производили погружным насосным агрегатом ЭЦВ 4-1,5-65, установленным в стволе скважины, в емкость с последующим сбросом в р. Западная Двина.



Рисунок 5.10 – Устье скважины №2.10 при гидродинамической промывке

В течение 20 минут после начала промывки скважины наблюдался вынос мелких частиц грунта, что подтверждалось наличием осадка на дне емкости. Затем вынос прекратился. Расход, подаваемый в скважину, измеряли с помощью счетчика воды. Расход закачки составил $Q_{\text{и}}=1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расход откачки измеряли объемным методом и он составил $Q_{\text{с}}=2,77 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q_{\text{пл}}=1,27 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Результаты регенерации фильтра скважины №2.10 представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты регенерации скважины №2.10

Этап	Статический уровень (абс. отм), м	Динамический уровень, м	Понижение уровня, м	Дебит, $\text{м}^3/\text{ч}$	Удельный дебит, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$	Увеличение удельного дебита по сравнению с удельным дебитом до регенерации, %
До промывки	9,5 (108,0)	21,2	11,7	2,77	0,237	-
После промывки	9,5 (108,0)	20,5	11,0	2,77	0,252	6,3

Относительно небольшой прирост производительности скважины объясняется незначительным кольматажем фильтра и частичным нарушением работы затрубной системы регенерации, произошедшей в результате обрушения грунтовой перемычки и затопления котлована строящейся ГЭС в апреле 2011.

5.5.4 Скважины на водозаборах «Фелицианово» и «Вицковщина» г. Минска

Водозабор «Фелицианово». Является централизованным водозабором подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Минска. Отбор подземных вод здесь осуществляется из межморенного днепровско-сожского водоносного горизонта, залегающего на глубинах 30-70 м.

В 2015 г. был разработан проект бурения новых скважин №№1¹ и 3¹ в зонах строгого режима тампонируемых скважин №№1 и 3 и проведены работы по их тампонажу и перебурированию. Все тампонируемые скважины значительно снизили свой удельный дебит в результате кольматажа и песковали. Скважины были перебурены методом обратной промывки долотом диаметром 660 мм, в них были установлены проволочные фильтры $D=325$ мм с затрубными системами реагентной регенерации, представляющими собой 4 циркуляционные трубки из полиэтилена с наружным диаметром $D = 20$ мм и стенкой толщиной $\delta = 3$ мм, смонтированные на расстоянии 6см от наружной поверхности фильтра (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Крепление трубок к фильтровой колонне

Трубки имели перфорацию напротив фильтра: по два диаметрально размещенных отверстия диаметром 1мм с шагом 5см. Они были заглушены снизу и закреплялись проволочными хомутами к п-образным скобам высотой 6см, приваренным к глухим участкам фильтровой колонны (см. рисунок 5.11). К эксплуатационной колонне циркуляционные трубки привязывали проволочными хомутами и выводили на поверхность. Паспортный геолого-технический разрез скважины №3¹, представлен на рисунке 5.12.

М а с ш т а б	№	Описание пород	Геологический разрез и конструкция скважины	Мощность слоёв, м			Крепление скважины		Уровень воды		Диаметр, глубина	
				от	до	всего	Диаметр, м	Глубина, м	Стат., м	Динам., м		
10 20 30 40 50 60	1	Суглинок		0	3.8	3.8	720	11.5	4.9	14.9	925	
	2	Песок влажный гравелистый		3.8	8.7	4.9					6	
	3	Супесь		8.7	14.8	6.1					762	
	4	Песок		14.8	28.2	13.4					11.5	
	5	Песок глинистый		28.2	30.9	2.7						
	6	Песок гравелистый водонасыщенный		30.9	53.7	22.8					325	39.5
	7	Песок глинистый		53.7	55.0	1.3					325	53
	8	Песок гравелистый водонасыщенный		55.0	62.1	7.1					325	56
	9	Суглинок		62.1	6.6	3.9					325	60.5
										66.0		
										63.5		
										151		
										65		

Рисунок 5.12 – Паспортный разрез скважины №3¹ с затрубной системой регенерации на водозаборе «Фелицианово»

Определение водопоглощающей способности циркуляционных труб

Гидравлические испытания затрубных систем регенерации скважин №№ 1¹, 3¹ были проведены после сдачи скважин в эксплуатацию. Воду в трубки подавалась по шлангу, подключенному к нагнетательной линии скважинного насоса через кран для забора проб воды. На шланге был установлен манометр (0-0,6) МПа и счетчик воды. Определяли характеристики водопоглощения каждой циркуляционной трубки. В скважинах были смонтированы погружные насосы ЭЦВ 10-120-90, При замерах по скважине № 1¹: дебит

$Q_1 = 130 \text{ м}^3/\text{ч}$; удельный дебит $q_1 = 12,9 \text{ м}^2/\text{ч}$; по скважине №3¹:
 $Q_3 = 130 \text{ м}^3/\text{ч}$; удельный дебит $q_3 = 12 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Напор H нагнетаемой в трубку воды определяли по выражению $H = h_{\text{ст}} + h_{\text{ман}}$, где $h_{\text{ст}}$ – расстояние от оси манометра, размещенного на перекрытии павильона, до статического уровня воды в скважине (трубке), $h_{\text{ст}1} = 11 \text{ м}$, $h_{\text{ст}3} = 7,9 \text{ м}$; $h_{\text{ман}}$ – показание манометра в метрах водяного столба.

Расход закачки Q определяли по показанию счетчика воды, разделив его на время опыта. Полученные зависимости $Q = f(H)$ в испытуемом диапазоне расходов (0-0,3 л/с) имели вид прямых линий и были описаны линейными функциями вида $Q = aH$.

Осредненные значения параметра a уравнения для трубок скважин №№ 1¹, 3¹ при закачке в них воды представлены в таблице.

Таблица 5.3 – Значения параметра a уравнения $Q = aH$

Номер скважины	Значение параметра a при закачке в одну трубку, л/(с·м)	Значение параметра a при закачке во все трубки, л/(с·м)
№ 1 ¹	0,0075	0,031
№ 3 ¹	0,0092	0,038

Анализ величины параметра a показывает его близкие значения для трубок скважин № 1¹ и №3¹. Зная a можно по уравнению (4.21) рассчитать напор насоса H в системе регенерации, необходимый для закачки воды или реагента с расходом Q .

Прочностной расчет циркуляционных трубок

Подбор поперечных размеров полиэтиленовых трубок осуществлялся на основе их расчета на прочность от воздействия грунта по СП 40-102-2000 «Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов» [120], в котором изложены основные принципы расчета труб, уложенных в горизонтальные траншеи, на вертикальное давление грунта. Методику расчета пришлось корректировать, так как циркуляционные трубки имеют вертикальное расположение и нагрузку от грунта определяют как боковое давление грунта в состоянии покоя (т.е. когда горизонтальное перемещение конструкции невозможно).

В проекте на бурение скважин рассматривалось 2 варианта трубок: газовая полиэтиленовая труба ПЭ 100, *SDR* 9 диаметром $D = 20$ мм с толщиной стенки $s = 3$ мм, соответствующая стандарту СТБ ГОСТ Р50838 и труба ПЭ100, *PN16*, *SDR11* диаметром $D = 25$ мм с толщиной стенки $s = 2,3$ мм для наружного водопровода и транспортировки холодной воды под давлением (соответствует ГОСТ 18599-2001), поставляемые в бухтах по 100 м.

Схема к расчету прочности трубок, выполненная по проектному геолого-техническому разрезу, представлена на рисунке 5.13.

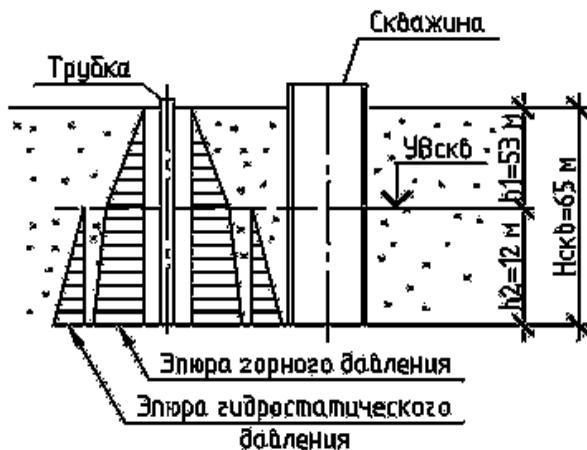


Рисунок 5.13 – Расчетная схема

Наиболее неблагоприятный случай воздействия грунта на трубки будет иметь место при минимальном уровне воды в стволе скважины, т.е. если погружной насос будет установлен на глубине $h_1 = 53$ м на верхней отметке нижней секции фильтра (см. рисунок 5.12) и выхватит всю воду. Тогда гравийная обсыпка на участке (0-53)м будет осушенной, а на участке (53-65)м будет водонасыщенной.

При допущении о треугольной эпюре распределения горизонтальных напряжений по глубине от горного давления, нагрузка от давления грунта на нижней отметке трубки будет наибольшей

$$q_{гр} = K_{01} \cdot \gamma_1 \cdot h_1 + K_{02} \cdot \gamma_2 \cdot h_2, \quad (5.21)$$

где K_{o1} – коэффициент давления слоя осушенного грунта h_1 и удельным весом γ_1 в состоянии покоя;

K_{o2} , γ_2 – то же самое у водонасыщенного грунта напротив фильтра длиной h_2 .

Коэффициент давления грунта в состоянии покоя K_o определяли в соответствии с п. 6.3.11 ТКП 45-5.01-237-2011 [121] по формуле Яки

$$K_{oi}=1 - \sin\varphi_i, \quad (5.22)$$

где φ_i – угол внутреннего трения грунта.

Удельный вес γ_n осушенного грунта определяется по формуле

$$\gamma_1 = g\rho_n, \quad (5.23)$$

где ρ_n – плотность грунта пористостью n ; $\rho_n = \rho_c(1 - n)$;

ρ_c – объемная масса скелета грунта.

Удельный вес γ_n водонасыщенного грунта определялся с учетом взвешивающего влияния воды по формуле

$$\gamma_2 = g\rho_c(\rho_n - 1000) / \rho_n. \quad (5.24)$$

Принимаем, что вокруг скважины находится однородный грунт с постоянными характеристиками: плотность скелета грунта $\rho_c = 2660 \text{ кг/м}^3$; угол внутреннего трения грунта естественной влажности $\varphi_1 = 40^\circ$; угол внутреннего трения грунта насыщенного водой $\varphi_2 = 36^\circ$ [122, таблица П1]; g – ускорение свободного падения.

Определяем ρ_n

$$\rho_n = \rho_c(1 - n) = 2660(1 - 0,3) = 1860 \text{ кг/м}^3. \quad (5.25)$$

Согласно (5.23) удельный вес γ_n осушенного грунта равен

$$\gamma_1 = g\rho_n = 9,81 \cdot 1860 = 18,3 \text{ кН/м}^3. \quad (5.26)$$

Согласно (5.24) удельный вес γ_2 водонасыщенного грунта

$$\begin{aligned}\gamma_2 &= g\rho_c(\rho_n - 1000)/\rho_n = \\ &= 9,81 \cdot 2660(1830 - 1000)/1830 = 11,8 \text{ кН/м}^3.\end{aligned}\quad (5.27)$$

По выражению (5.21) определяем горизонтальную грунтовую нагрузку

$$\begin{aligned}q_{\text{гр}} &= K_o \cdot \gamma_1 \cdot h_1 + K_o \cdot \gamma_2 \cdot h_2 = \\ &= 18,3(1 - \sin 40^\circ)53 + 11,8(1 - \sin 36^\circ)12 = 0,4 \text{ МПа.}\end{aligned}\quad (5.28)$$

Определяем кратковременную кольцевую жесткость оболочки трубки G_0 , МПа [120]

$$G_0 = \frac{53,7 \cdot E_0 \cdot I}{(1 - \mu^2)(D - s)^3} = \frac{53,7 \cdot 800 \cdot 0,003^3}{12(1 - 0,32^2) \cdot (0,02 - 0,003)^3} = 21,9 \text{ МПа}, \quad (5.29)$$

где $E_0 = 800$ МПа – кратковременный модуль упругости при растяжении материала трубы [120, таблица А1];

$\mu = 0,32$ – коэффициент Пуассона материала трубы;

$s = 0,003$ мм;

$D = 0,02$ м;

I – момент инерции сечения трубы на единицу длины, определяемый по формуле $I = s^3/12$.

Определяем относительное укорочение диаметра трубы $\Psi_{\text{гр}}$ под действием грунтовой нагрузки [120]

$$\Psi_{\text{гр}} = K_{\text{ок}} \frac{K_\tau \cdot K_w \cdot q_{\text{гр}}}{K_{\text{ж}} \cdot G_0 + K_{\text{гр}} E_{\text{гр}}} = \frac{1 \cdot 1,25 \cdot 0,13 \cdot 0,4}{0,15 \cdot 21,9 + 0,06 \cdot 26} = 0,013, \quad (5.30)$$

где $K_{\text{ок}}$ – коэффициент, учитывающий процесс округления овалованной трубы под действием внутреннего давления p в трубопроводе,

$K_{\text{ок}} = \frac{1}{1 + 2P/q_c \Psi}$, принимаем $p=0$, тогда $K_{\text{ок}} = 1$; $K_\tau = 1,25$ –

коэффициент, учитывающий запаздывание овальности поперечного

сечения трубы во времени и зависящий от типа грунта, степени его уплотнения, гидрогеологических условий, геометрии траншеи; K_w – коэффициент прогиба, учитывающий качество подготовки ложа и уплотнения, принимается при бесконтрольном ведении работ $K_w = 0,13$; $K_{гр} = 0,06$ – коэффициент, учитывающий влияние грунта засыпки на овальность поперечного сечения трубопровода; $E_{гр} = 26$ МПа – модуль деформации грунта в пазухах затрубного пространства; $K_{ж} = 0,15$ – коэффициент, учитывающий влияние кольцевой жесткости оболочки трубы на овальность поперечного сечения трубопровода.

Определяем относительное укорочение Ψ диаметра трубы в грунте, как предельно допустимое значение [120]

$$\Psi = \Psi_{гр} + \Psi_{т} + \Psi_{м} = 0,013 + 0 + 0,01 = 0,023, \quad (5.31)$$

где $\Psi_{т}$ – относительное укорочение диаметра трубы под действием транспортных нагрузок, принимаем $\Psi_{т} = 0$ – транспортная нагрузка отсутствует;

$\Psi_{м}$ – относительное укорочение диаметра трубы, образовавшееся в процессе складирования, транспортировки и монтажа, принимаем $\Psi_{м} = 0,01$ [120, табл. 1] при степени уплотнения грунта $> 0,95$ и кольцевой жесткости $G_0 = 21,9$ МПа.

Определяем ε_p – максимальное значение степени растяжения материала в стенке трубы из-за овальности поперечного сечения трубопровода под действием нагрузок

$$\varepsilon_p = 4,27 \cdot K_{\sigma} \cdot \frac{s}{D} \cdot \Psi \cdot K_{3\Psi} = 4,27 \cdot 1,5 \cdot \frac{3}{20} \cdot 0,023 \cdot 1 = 0,022, \quad (5.32)$$

где K_{σ} – коэффициент постели грунта для изгибающих напряжений, учитывающий качество уплотнения, принимается $K_{\sigma} = 1$;

$K_{3\Psi}$ – коэффициент запаса на овальность поперечного сечения трубы, принимается равным 1,0 для самотечных трубопроводов, $K_{3\Psi} = 1$.

Определяем ε_c – степень сжатия материала стенки трубы от воздействия внешних нагрузок на трубопровод

$$\varepsilon_c = \frac{q_c}{2E_0} \cdot \frac{D}{s} = \frac{0,4}{2 \cdot 800} \cdot \frac{20}{3} = 0,0016, \quad (5.33)$$

где q_c – суммарная внешняя нагрузка на трубку, МПа;

$q_c = q_{гр} + q_T$; $q_T = 0$ – транспортная нагрузка отсутствует, тогда $q_c = q_{гр} + q_T = 0,4$ МПа.

Определяем ε_{pp} – предельно допустимое значение деформации растяжения материала в стенке трубки, происходящей в условиях релаксации напряжений

$$\varepsilon_{pp} = \frac{\sigma_0}{E_\tau \cdot K_3} = \frac{20}{200 \cdot 3} = 0,033, \quad (5.34)$$

где σ_0 – кратковременная расчетная прочность при растяжении материала трубы, $\sigma_0 = 20$ МПа;

$E_\tau = 200$ МПа долговременный модуль упругости при растяжении материала трубы на конец срока службы эксплуатации трубопровода;

$K_3 = 3$ – коэффициент запаса.

Определяем ε_{pn} – предельно допустимую деформацию растяжения материала в стенке трубы в условиях ползучести

$$\varepsilon_{pn} = \frac{\sigma_0}{E_0 \cdot K_3} = \frac{20}{800 \cdot 3} = 0,0083, \quad (5.35)$$

Прочностной расчет трубопроводов из полимерных материалов, уложенных в земле, рекомендуется сводить к соблюдению следующего неравенства (для самотечных трубопроводов) [120]

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{pp}} + \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{pn}} \leq 1,0; \quad \frac{0,022}{0,033} + \frac{0,0016}{0,0083} = 0,85 < 1,0. \quad (5.36)$$

Условие прочности выполняется – полиэтиленовая трубка 20х3 подходит для выбранных условий. Аналогичный расчет для трубки 25х2,3 показал, что ее прочность в этих условиях не обеспечивается.

Водозабор «Вицковщина». Является централизованным водозабором подземных вод для хоз.-питьевого водоснабжения г. Минска. Находится в Дзержинском районе Минской области. Отбор подземных вод здесь осуществляется из межморенного днепровско-сожского водоносного горизонта, залегающего на глубинах 40-70 м.

В 2015 г. был разработан проект бурения новых скважин №5в ($Q = 72 \text{ м}^3/\text{ч}$), №18в ($Q = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$), №21в ($Q = 90 \text{ м}^3/\text{ч}$) и №25в ($Q = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$) в зонах строгого режима тампонируемых скважин и в 2016 г. проведены работы по их тампонажу и перебуриванию. Скважины были перебурены методом обратной промывки долотом диаметром 660 мм. В них были устанавливаемы каркасно-стержневые фильтры диаметром 325 мм с затрубными системами регенерации, состоящими из трех симметрично установленных трубок $D = 20 \text{ мм}$ из нержавеющей стали, смонтированных на расстоянии 6 см от наружной поверхности фильтра (рисунок 5.14).



Рисунок 5.14 – Общий вид циркуляционных трубок из нержавеющей стали и спуск фильтровой колонны в ствол скважины

Выводы по главе 5

1. Разработаны технологии затрубной гидродинамической промывки и реагентной регенерации гравийных фильтров способами поэтапных закачек и циркуляционной промывки, обеспечивающие эффективное удаление кольматанта из прифильтровой зоны скважин. Применимость разработанных способов регенерации зависит от состава и структуры кольматирующих осадков, которые можно идентифицировать по образцам, отобраным с поверхности насосного оборудования скважины или в процессе импульсных обработок фильтров.

Разработана методика определения производительности насосного оборудования, входящего в состав установки для регенерации скважин. Для реагентных обработок предложено использование чистящего средства «Дескам», содержащего 20% HCl и характеризующегося низкой коррозионной агрессивностью по отношению к металлам.

2. Разработаны и внедрены в производство скважины новой конструкции с затрубными системами регенерации, состоящими из симметрично расположенных циркуляционных трубок, перфорированных в интервале фильтра и помещенных на внешний контур гравийной обсыпки (д. Узла Мядельского района, п. Ждановичи, котлован Полоцкой ГЭС, водозаборы «Фелицианово» и «Вицковщина» г. Минска). Конструкция новой скважины включена в ТКП 17.04-21-2010(02120) «Правила проектирования, сооружения (строительства), ликвидации и консервации буровых скважин различного назначения».

3. Изготовлен и испытан в полевых условиях на водозаборной скважине в д. Узла и на скважине №2.10 системы глубинного водопонижения котлована Полоцкой ГЭС опытный образец установки для затрубной регенерации скважин. В результате проведенных опытно-промышленных испытаний технологии безреагентной гидродинамической промывки по всей длине фильтра удельный дебит скважины в д. Узла увеличился в 3,9 раз, а скважины №2.10 на 6,3%, что подтвердило техническую и экономическую эффективность разработанной технологии. Относительно небольшой прирост производительности скважины №2.10 после обработки объясняется незначительной степенью кольматажа гравийной обсыпки и частичным нарушением работы затрубной системы регенерации, произошедшей в результате аварийного затопления в 2011 г. котлована строящейся ГЭС.

4. Разработаны усовершенствованные конструкции высокодебитных водозаборных скважин повышенной ремонтпригодности, которые пробурены на водозаборах «Фелицианово» и «Вицковщина» г. Минска. Выполнен расчет прочности циркуляционных трубок затрубных систем регенерации скважин на примере скважины № 3¹ водозабора «Фелицианово» от воздействия давления грунта при самом неблагоприятном случае эксплуатации скважины, когда динамический уровень в ней минимален. Проведены гидравлические испытания поглощающей способности трубок в натуральных условиях, которые подтвердили их работоспособность и устойчивость в грунте.

ГЛАВА 6. ОБСЛЕДОВАНИЕ И РЕМОНТ ПЕСКУЮЩИХ СКВАЖИН

Необходимость в проведении ремонтных работ в скважинах возникает в связи с появлением процесса пескования, приводящего к заилению скважины и выходу из строя водоподъемного оборудования [123].

Скважина может заноситься песком, проникшим через негерметичные сальниковые устройства в скважинах с фильтрами, установленными «впотай», свищи в обсадных трубах и непосредственно через фильтр. При разрушении фильтра в результате коррозии, импульсных и химических обработок увеличиваются размеры его отверстий, нарушается сплошность гравийной обсыпки, выносятся частицы обсыпки и пластового песка в ствол. Песок частично или полностью перекрывает фильтр, образуя так называемую песчаную пробку. Работы по ликвидации пескования в скважинах состоят из трех этапов: удаления песчаной пробки, определения причин пескования скважины и их устранение [124-126]. Чтобы извлечь песчаную пробку, применяют желонирование, промывку и эрлифтную прокачку [127-129]. Желонирование скважины требует значительных трудозатрат, кроме этого, при сбрасывании желонки на песчаную пробку, в фильтре возникают растягивающие напряжения, которые при ослаблении коррозией водоприемной поверхности, могут привести к ее разрушению. Применение эрлифтов сопряжено с использованием мощных передвижных компрессоров с дизельными двигателями и кранового оборудования для монтажа-демонтажа эрлифта, что не всегда экономично при прокачках неглубоких скважин малых диаметров.

6.1 Гидроэлеваторная установка для удаления песчаных пробок

6.1.1 Методика расчета

Представляется перспективным использовать для удаления песчаных пробок насосы - гидроэлеваторы, способные перекачивать пульпу и загрязненные жидкости [130, 67, 131]. Теоретические основы работы струйных насосов разработаны П. Н. Каменевым [132], Е. А. Соколовым [133], Л. Г. Подвидзом [134], Г.Н. Сизовым

[135], Б.Ф. Лямаевым [136]. Для эффективного удаления песчаных пробок гидроэлеваторная установка, помимо рабочего насоса со струйным насосом-гидроэлеватором, должна дополнительно содержать гидромониторный трубопровод с насадком, обеспечивающим размыв пробок. Отсутствие в литературе методик расчета параметров подобных гидроэлеваторных установок для скважинных условий, характеризующихся широким диапазоном глубин (10-50 м) и диаметров скважин (100-400 мм), сдерживает их применение на практике.

Поэтому целью работы являлась разработка методики расчета параметров гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок.

Расчетная схема гидроэлеваторной установки представлена на рисунке 6.1.

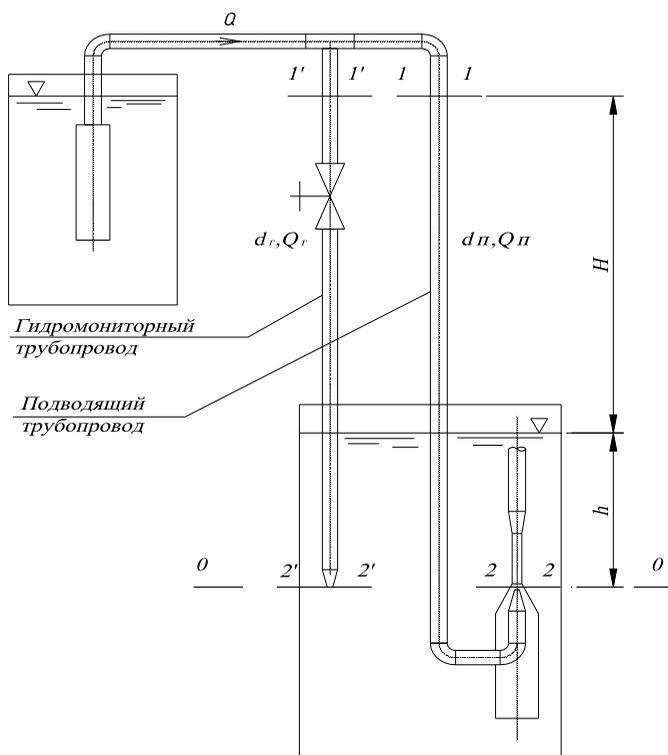


Рисунок 6.1 – Расчетная схема гидроэлеваторной установки

Вода подается погружным насосом из напорного резервуара в гидромониторный трубопровод с пробковый краном и размывающим коническим насадком и в подводящий трубопровод с активным соплом гидроэлеватора. Составим уравнения движения жидкости по подводящему и гидромониторному трубопроводам.

Соединим уравнением Д. Бернулли сечения 1-1 и 2-2, плоскость сравнения 0-0 возьмем на выходе из активного сопла в скважине:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_{ж}g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_{ж}g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h_{\text{ТП}}, \quad (6.1)$$

где z_i, p_i, v_i – геометрическая высота, пьезометрическое давление и скорость движения жидкости в i -ом сечении, соответственно;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

$\sum h_{\text{ТП}}$ – потери напора в подводящем трубопроводе.

Согласно схемы (см. рисунок 6.1):

$$z_1 = H + h; z_2 = 0; p_1 = p_{\text{п.треб}}; v_2 = v_c = \frac{Q_{\text{п}}}{\omega_c}; v_1 = v_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{\omega_{\text{п}}}, \quad (6.2)$$

где $p_{\text{п.треб}}$ – потребное давление в подводящем трубопроводе;

v_c – скорость в выходном сечении сопла площадью ω_c ;

$v_{\text{п}}, Q_{\text{п}}, \omega_{\text{п}}$ – скорость, расход, площадь сечения в подводящем трубопроводе.

Пьезометрическое давление в сечении 2-2 равно

$$p_2 = \rho_{ж}g(h - h_{\text{п.д}}), \quad (6.3)$$

где $h_{\text{п.д}}$ – понижение давления во всасывающей патрубке гидроэлеватора при его работе.

После ввода обозначения $\frac{p_{\text{п.треб}}}{\rho_{ж}g} = H_{\text{п.треб}}$ и подстановки (6.2) и

(6.3) в (6.1) получим выражение для характеристики подводящего трубопровода

$$H_{п.треб} = \frac{\alpha v_C^2}{2g} - \frac{\alpha v_{п}^2}{2g} - H - h_{пд} + \sum h_{ВП} . \quad (6.4)$$

Потери напора $\sum h_{ВП}$ в подводящем трубопроводе равны

$$\begin{aligned} \sum h_{ВП} &= h_{ВП.м} + h_{ВП.дл} = (2h_{пов} + h_{п.суж} + h_{соп}) + h_{ВП.дл} = \\ &= \frac{v_{п}^2}{2g} (2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_{п}^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_{п}^2}{\omega_{с}^2}) + i_t \cdot l_{п} = \sum \zeta_{пм} \frac{v_{п}^2}{2g} + i_t \cdot l_{п}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

где $h_{ВП.м}$, $h_{ВП.дл}$ – потери напора на местных сопротивлениях и по длине;

$h_{пов}$, $h_{п.суж}$, $h_{соп}$ и $\zeta_{пов}$, $\zeta_{п.суж}$, $\zeta_{соп}$ – местные потери напора и коэффициенты сопротивлений при повороте трубопровода на 90° , при постепенном сужении трубопровода на подходе к соплу, при выходе потока из сопла, соответственно;

$v_{сж}$ – скорость движения потока во входном сечении сопла;

i_t – удельные потери напора при температуре воды t , $^\circ\text{C}$, м/м;

l_n – длина подводящего трубопровода, м.

Соединим уравнением Д. Бернулли вида (6.1) сечения 1'-1' и 2'-2'.

Относительно плоскости сравнения 0-0 (см. рисунок 6.1) имеем:

$$z_1' = H + h; z_2' = 0; p_1' = p_{г.треб}; v_2' = v_{нас} = \frac{Q_{г}}{\omega_{нас}}; v_1' = v_{г} = \frac{Q_{г}}{\omega_{г}}, \quad (6.6)$$

где $p_{г.треб}$ – потребное давление в начальном сечении гидромониторного трубопровода;

$v_{нас}$ – скорость в выходном сечении размывающего насадка площадью $\omega_{нас}$;

$v_{г}$, $Q_{г}$, $\omega_{г}$ – скорость, расход, площадь сечения в гидромониторном трубопроводе.

Пьезометрическое давление в сечении 2' - 2' принимаем $p_2' = \rho_{ж}gh$. Подставив параметры в уравнение Д. Бернулли, и введя обозначение $p_{г.треб}/\rho_{ж}g = H_{г.треб}$, получим необходимый напор в сечении 1'-1' и выражение для характеристики подводящего трубопровода:

$$H_{г.треб} = \frac{\alpha v_{нас}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{г}^2}{2g} - H + \sum h_{вт} . \quad (6.7)$$

Потери напора $\sum h_{w\Gamma}$ в гидромониторном трубопроводе равны

$$\begin{aligned} \sum h_{w\Gamma} &= h_{w\Gamma.м} + h_{w\Gamma.дл} = (h_з + h_{нас}) + h_{w\Gamma.дл} = \\ &= \frac{v_{\Gamma}^2}{2g} \left(\zeta_з + \zeta_{нас} \frac{\omega_{\Gamma}^2}{\omega_{нас}^2} \right) + i_t \cdot l_{\Gamma} = \sum \zeta_{\Gamma м} \frac{v_{\Gamma}^2}{2g} + i_t \cdot l_{\Gamma}, \end{aligned} \quad (6.8)$$

где $h_{w\Gamma.м}$, $h_{w\Gamma.дл}$ – потери напора в местных сопротивлениях и по длине;

$h_з$, $h_{нас}$, $\zeta_з$, $\zeta_{нас}$ – потери напора и коэффициенты сопротивления в пробковом кране и при выходе из насадка;

l_{Γ} – длина гидромониторного трубопровода.

Рассмотрим схему струйного насоса - гидроэлеватора (рисунок 6.2) [129]

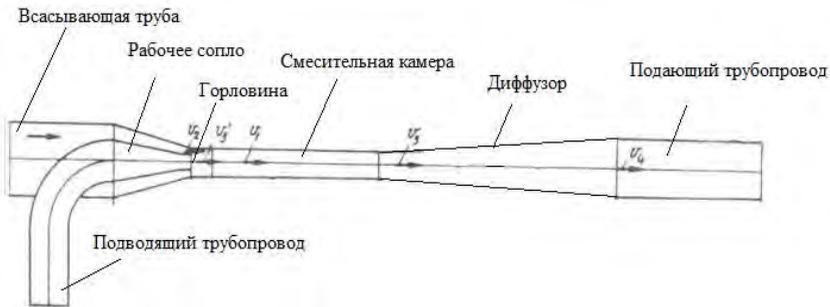


Рисунок 6.2 – Схема струйного насоса - гидроэлеватора

В случае минимальных потерь энергии при смешивании потоков, постоянство количества движения до и после смешивания потоков выражается уравнением [132]:

$$G_1 v_1 \cos \alpha_1 + G_2 v_2 \cos \alpha_2 = G_3 v_3, \quad (6.9)$$

где G_1 , G_2 , G_3 – вес подаваемой, инжектируемой жидкостей и вес жидкости в смесительной камере, соответственно;

v_1 , v_2 , v_3 – осредненные скорости (по количеству движения): на срезе сопла, инжектируемого потока и потока в смесительной камере;

α_1, α_2 – углы между векторами скорости подаваемого, инжектируемого потоков и направлением основного потока.

Весовой коэффициент инжекции - отношение веса инжектируемой жидкости к весу жидкости, подаваемой из сопла, равен:

$$\beta = \frac{G_2}{G_1} = \frac{\rho_{г.с} V_2}{\rho_{ж} V_1} = \frac{\rho_{г.с}}{\rho_{ж}} \cdot \beta', \quad (6.10)$$

где $\rho_{г.с}$ – плотность инжектируемой жидкости;

V_1, V_2 – объемы подаваемой и инжектируемой жидкостей;

β' – объемный коэффициент инжекции.

Разделив выражение (9) на G_1 и выразив v_3 , получим

$$v_3 = \frac{v_1 + \beta v_2}{1 + \beta}. \quad (6.11)$$

Понижение давления в камере смешения: $h_{п.д} = \frac{v_2^2}{2g} (1 + \zeta_2)$, где

ζ_2 – коэффициент местного сопротивления при входе подсасываемого потока в смесительную камеру. Откуда скорость инжектируемого потока равна

$$v_2 = \sqrt{\frac{h_{п.д} \cdot 2g}{1 + \zeta_2}}, \quad (6.12)$$

Суммарный расход гидроэлеватора:

$$Q_3 = Q_1 + \beta' Q_1, \quad (6.13)$$

где Q_1 – расход рабочей жидкости.

$$\text{Диаметр смесительной камеры: } d_3 = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q_1}{\pi v_3}}.$$

Скорость в подающем трубопроводе $v_4 = Q_3 / \omega_4$, где ω_4 – площадь поперечного сечения подающего трубопровода.

Полезная высота подъема воды [132]:

$$H_{\text{под}} = p - \sum h_{W4} = (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{\text{ПД}} - \sum h_{W4}, \quad (6.14)$$

где p – давление, создаваемое гидроэлеватором;

$\sum h_{W4}$ – потери напора в подающем трубопроводе;

ζ_3 – коэффициент, учитывающий потери энергии в смесительной камере и диффузоре, $\zeta_3 = 0,3$ [132].

Соотношения геометрических размеров гидроэлеватора [132]: длина смесительной камеры – $l_k = 8d_3$; расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры – $l' = 1,5d_1$, где $d_1 = d_c$ – диаметр сопла; длина диффузора – $l_d = 7(d_4 - d_3)$, где d_4 – диаметр подающего трубопровода.

Пример расчета параметров гидроэлеваторной установки

Рассчитаем гидроэлеваторную установку для удаления песчаной пробки из водозаборной скважины глубиной 41 м в д. Узла Мядельского района Минской области (рисунок 6.3). Глубина динамического уровня в скважине при работе гидроэлеватора $Z_0 = -34,0$ м. Внутренний диаметр фильтра $d_{\text{ф}} = 0,15$ м.

Рабочий насос – погружной, смонтирован в емкости, установленной на насыпи павильона. Принимаем: подводящий трубопровод – труба ПЭ 80 SDR 11- 32×2,4 ($d_n = 0,027$ м) длиной $l_n = 43$ м с активным соплом $d_c = 7$ мм; гидромониторный трубопровод – труба ПЭ 80 SDR 11- 20×2,0 ($d_r = 0,016$ м) длиной $l_r = 42$ м с размывающим насадком $d_{\text{нас}} = 7$ мм; подающий трубопровод – труба ПЭ 80 SDR 17- 50×3 ($d_4 = 0,044$ м).

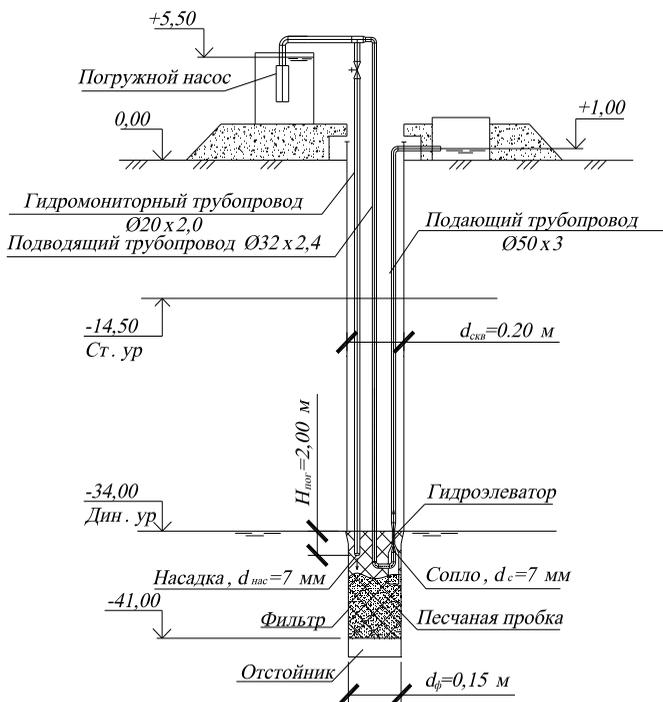


Рисунок 6.3 – Схема размещения элементов установки на скважине

Построение характеристики подводящего трубопровода

Коэффициент сопротивления плавного сужения равен [110]:

$$\zeta_{п.суж} = k \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = 0,25 \left(\frac{1}{0,615} - 1 \right)^2 = 0,098$$

где ε – коэффициент сжатия струи при постепенном сужении подводящего трубопровода при подходе к соплу,

$\varepsilon \approx 0,615$ при $d_n = 0,027$ м, $d_{суж} = 0,010$ м;

k – коэффициент смягчения при постепенном сужении, $k = 0,25$ при угле конусности 20° .

Для сопла, выполненного в виде конически-сходящегося насадка при углах конусности $12-15^\circ$, принимали $\zeta_{соп} = 0,1$. Принимаем $\zeta_{пов} = 0,28$ для плавного поворота на 90° для отношения радиуса

закругления к диаметру $R/d=2$ шероховатого трубопровода [110]. Тогда суммарный коэффициент сопротивления равен

$$\begin{aligned} \sum \zeta_{\text{ГМ}} &= (2\zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{п.суж}} \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{сж}}^2} + \zeta_{\text{соп}} \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{с}}^2}) = \\ &= 2 \cdot 0,28 + 0,098 \frac{0,027^4}{0,010^4} + 0,09 \frac{0,027^4}{0,007^4} = 24,8. \end{aligned}$$

Для определения i_t при $t=10^\circ\text{C}$ использовали таблицы Шевелева [134]. Требуемый напор вычисляли по формуле (6.4) и, пренебрегая значением $h_{\text{п.д.}}$, строили характеристику подводящего трубопровода (рисунок 6.4, кривая 2).

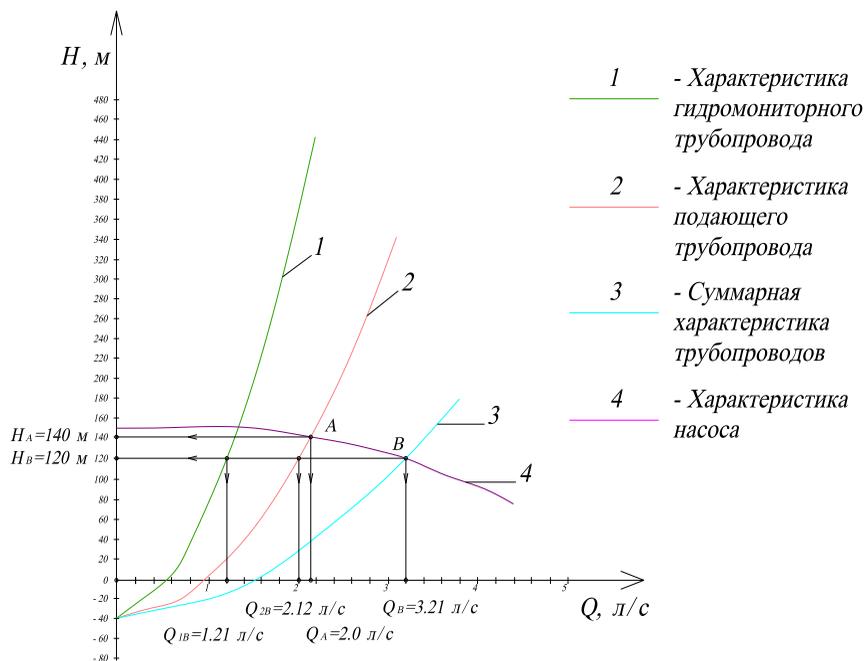


Рисунок 6.4 – Характеристики совместной работы погружного насоса и трубопроводов

Построение характеристики гидромониторного трубопровода

Принимаем $\zeta_{\kappa} = 0,05$ – для полностью открытого пробкового крана [1109], $\zeta_{нас.} = 0,09$ – для конически-сходящегося насадка при углах конусности $\beta = 12-15^\circ$, тогда

$$\sum \zeta_{ГМ} = (\zeta_3 + \zeta_{нас} \frac{\omega_{Г}^2}{\omega_{нас}^2}) = 0,05 + 0,09 \frac{(0,2 \cdot 10^{-3})^2}{(0,038 \cdot 10^{-3})^2} = 2,5.$$

Требуемый напор вычисляем по формуле (6.7) и строим характеристику гидромониторного трубопровода (рисунок 6.4, кривая 2), получаем суммарную характеристику 2-х трубопроводов (кривая 3).

Подбираем погружной насос ЭЦВ 6-10-120 с характеристикой (кривая 4) и находим рабочие точки: A – при работе насоса на один подводящий трубопровод ($H_A = 140$ м, $Q_A = 2,12$ л/с); B – при работе насоса на два трубопровода $H_B = 120$ м, $Q_B = 3,21$ л/с, $Q_{1B} = 1,21$ л/с, $Q_{2B} = 2,00$ л/с.

Расчет геометрических размеров гидроэлеватора

Рассмотрим самый неблагоприятный расчетный случай (рисунок 6.5): насос подает воду в подводящий и гидромониторный трубопроводы при полностью открытой задвижке (рабочая точка B).

Согласно рисунка 6.4 расход в подводящем трубопроводе: $Q_1 = Q_{2B} = 2$ л/с.

Определяем по (6.2) скорость инжектируемого потока v_2 , принимая ориентировочно $h_{п.д} \approx 2,0$ м и $\zeta_2 = 0,1$ [132]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{h_{п.д} \cdot 2g}{1 + \zeta_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 9,81}{1 + 0,1}} = 6 \text{ м/с.}$$

Определяем весовой коэффициент инжекции β по формуле (6.10), приняв объемный коэффициент инжекции $\beta' = 0,6$:

$$\beta = \frac{\rho_{Г.с.}}{\rho_{ж}} \cdot \beta' = \frac{1040}{1000} \cdot 0,6 = 0,62.$$

Средняя скорость смешивающихся потоков в начале смесительной камеры на основании выражения (6.11) равна:

$$v_3 = \frac{v_1 + \beta v_2}{1 + \beta} = \frac{52 + 0,62 \cdot 6}{1 + 0,62} = 34,4 \text{ м/с,}$$

$$\text{где } v_1 = v_c = \frac{Q_1}{\omega_c} = \frac{0,002}{0,785 \cdot 0,007^2} = 52 \text{ м/с.}$$

Подача гидроэлеватора равна:

$$Q_3 = Q_1 + \beta' Q_1 = 2 + 0,6 \cdot 2 = 3,2 \text{ л/с.}$$

Диаметр смесительной камеры:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi v_3}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0032}{3,14 \cdot 34,4}} \approx 0,012 \text{ м}$$

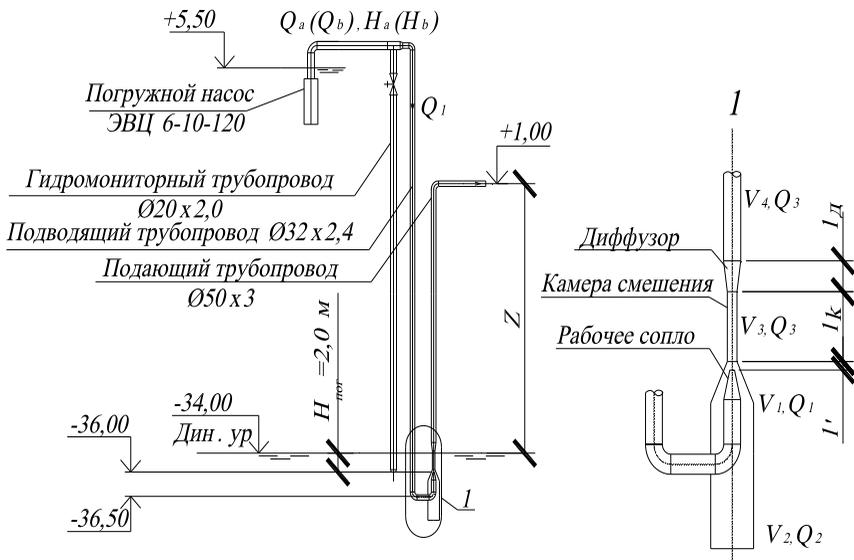


Рисунок 6.5 – Расчетная схема гидроэлеваторной установки

Скорость гидросмеси в подающем трубопроводе ($d_4=0,044 \text{ м}$)

$$v_4 = \frac{Q_3}{\omega_4} = \frac{Q_3}{0,785 \cdot d_4^2} = \frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,044^2} = 2,1 \text{ м/с.}$$

Потери напора в подающем трубопроводе:

$$\sum h_{W4} = h_{W4M} + h_{W4дл} = \zeta_{пов} \frac{v_4^2}{2g} + i_t \cdot l_\Gamma = 0,55 \frac{2,1^2}{2 \cdot 9,81} + 0,12 \cdot 35 = 4,3 \text{ м.}$$

где h_{W4M} , $h_{W4дл}$ – потери напора на местных сопротивлениях и по длине подающего трубопровода; $\zeta_{пов} = 0,55$ [110]; $i_t = 0,12$ при $v_4 = 2,1$ м/с [137].

Полезная высота подъема воды согласно (6.14) равна:

$$\begin{aligned} H_{под} &= p - \sum h_{W4} = (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{пд} - \sum h_{W4} = \\ &= (1 - 0,3) \frac{34,4^2}{2 \cdot 9,81} - 2 - 4,3 = 35,9 \text{ м.} \end{aligned}$$

Так как $H_{под} = 35,9 \text{ м} > \Delta Z = 35 \text{ м}$, то гидроэлеватор, работая в самом неблагоприятном режиме, способен поднять песок на поверхность.

Расчетные размеры гидроэлеватора: длина смесительной камеры – $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 0,012 \approx 0,1$ м; расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры – $l' = 1,5d_1 = 1,5d_c = 1,5 \cdot 0,007 = 0,011$ м; длина диффузора $l_d = 7(d_4 - d_3) = 7(0,044 - 0,012) = 0,23$ м.

Теоретический КПД гидроэлеватора – отношение полезной работы, создаваемой гидроэлеватором, к работе, затрачиваемой рабочим насосом [132]:

$$\eta = \frac{Q_2 \cdot p}{Q_1 \cdot p_1} = \frac{Q_2 \cdot [(1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{пд}]}{Q_1 (\frac{v_1^2}{2g} - h_{пд})} = \frac{1,2 \left[(1 - 0,3) \frac{34,4^2}{2 \cdot 9,81} - 2 \right]}{2 \cdot \left(\frac{52^2}{2 \cdot 9,81} - 2 \right)} = 0,18,$$

где p_1 – давление в плоскости выходного сечения насадки.

Для оценки производительности гидроэлеватора определим продолжительность удаления песчаной пробки толщиной $h_n = 5$ м в фильтре диаметром $d_\phi = 150$ мм.

Объем извлекаемого песка –

$$V_{пес} = 0,785 d_\phi^2 \cdot h_{пес} = 0,785 \cdot 0,15^2 \cdot 5 = 0,09 \text{ м}^3.$$

Масса песка в песчаной пробке –

$$M_{пес} = \rho_{пес} \cdot V_{пес} = 1600 \cdot 0,09 = 144 \text{ кг.}$$

Доля песка в инжектируемой пульпе –

$$A = \frac{\rho_{г.с} - \rho_{ж}}{\rho_{тв} - \rho_{ж}} = \frac{1,04 - 1}{2,65 - 1} = 0,024,$$

где $\rho_{г.с}$ – плотность гидросмеси, $\rho_{г.с} = 1,04 \text{ т/м}^3$.

Масса инжектируемого песка в 1 м^3 пульпы:

$$m_{и.пес} = \rho_{тв} \cdot A = 2650 \cdot 0,0242 = 64 \text{ кг / м}^3.$$

Теоретическая продолжительность удаления песчаной пробки:

$$t_p = \frac{M_{п}}{m_{и.пес} \cdot Q_2} = \frac{144}{64 \cdot 0,0012 \cdot 60} = 32 \text{ мин.}$$

В результате, по полученным размерам был сконструирован и изготовлен гидроэлеватор, конструкция которого позволяет регулировать расстояние от выходного сечения активного сопла до входного сечения камеры смешения.

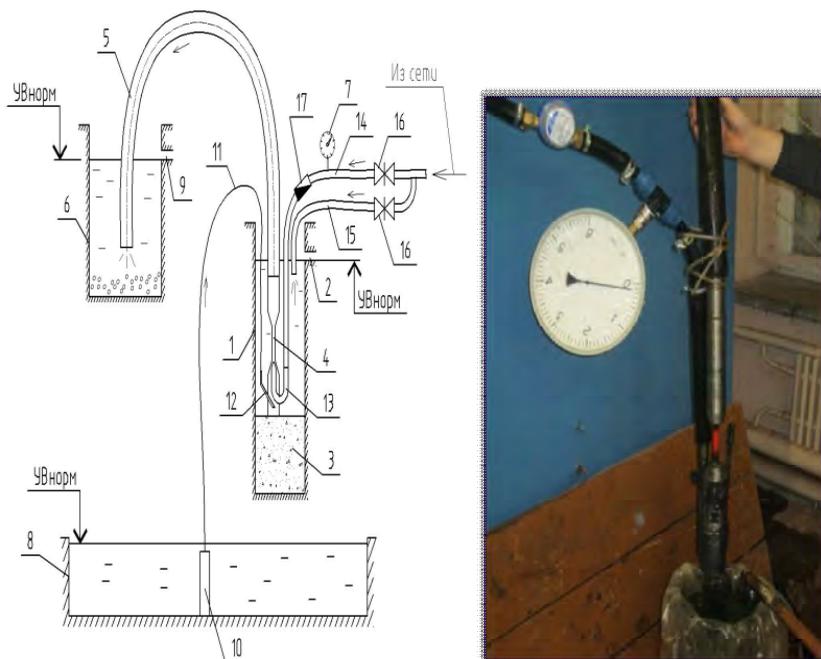
6.1.2 Лабораторные испытания гидроэлеватора

Гидравлические исследования экспериментального образца гидроэлеватора проводили в лаборатории кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство» [67]. Цель лабораторных исследований заключалась в построении напорной характеристики и зависимости КПД гидроэлеватора от расхода.

Для испытаний гидроэлеватора была изготовлена лабораторная установка, состоящая из модели скважины диаметром $0,2 \text{ м}$ с песчаной пробкой на дне. Внутри скважины помещали гидроэлеватор (рисунок 6.6).

Установка работала следующим образом. Воду подавали из сети в гидроэлеватор по подводящему шлангу, на котором были последовательно установлены: вентиль для регулирования расхода, подаваемого в рабочее сопло, счетчик воды СХВ 15 (ГОСТ Р50601-93), манометр (0 - 6,0) бар с ценой деления $0,1 \text{ бар}$. В размывающий насадок воду подавали по гидромониторному шлангу от насоса «Ручеек -1». Для поддержания уровня в модели скважины на постоянной отметке применяли холостой слив, а из сети подводили шланг добавочной воды с вентилем для регулирования расхода. Постоян-

ный уровень в приемной емкости поддерживали холостым сливом. Геометрический напор (H) определяли как расстояние между уровнями воды в модели скважины и в приемном резервуаре.



- 1 – модель скважины; 2 – патрубок холостого слива из модели скважины; 3 – песчаная пробка; 4 – гидроэлеватор; 5 – подающий трубопровод; 6 – приемный резервуар; 7 – манометр; 8 – бассейн; 9 – патрубок холостого слива; 10 – насос; 11 – гидромониторный шланг; 12 – размывающий насадок; 13 – активное сопло; 14 – подводный шланг; 15 – шланг подвода добавочной воды; 16 – вентиль; 17 – счетчик воды

Рисунок 6.6 – Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки

Подаваемый в рабочее сопло расход из сети Q_1 фиксировали счетчиком воды. Подачу гидроэлеватора Q_3 определяли объемным методом на выходе из холостого слива приемной емкости 6. Расход инжектируемой (подсасываемой) жидкости равен:

$$Q_2 = Q_3 - Q_1.$$

Лабораторные исследования гидроэлеватора выполняли в диапазоне геометрических напоров $H = (1,87 \dots 2,5)$ м, при этом расходы, подаваемые в рабочее сопло, составляли $Q_1 = (0,37 \dots 0,58)$ л/с при напорах в подводящем шланге в точке подключения манометра $H_{\text{ман}} = (6,5 \dots 14)$ м.

Полезная мощность:

$$N_{\text{пол}} = \rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot H.$$

Затраченная мощность:

$$N_{\text{затр}} = \rho \cdot g \cdot Q_1 \cdot H_{\text{ман}}.$$

КПД гидроэлеватора:

$$\eta = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{затр}}} \cdot 100\% = \frac{Q_2 \cdot H}{Q_1 \cdot H_{\text{ман}}} \cdot 100\%.$$

Построены кривые зависимостей $H = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$ гидроэлеватора (рисунок 6.7).

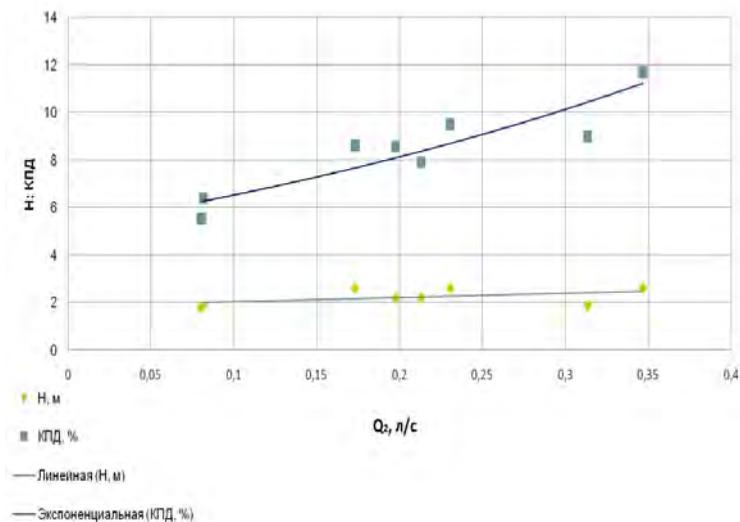


Рисунок 6.7 – Характеристики гидроэлеватора: $H = f(Q_2)$ и $\eta = f(Q_2)$

Из анализа графика $\eta = f(Q_2)$ следует, что КПД гидроэлеватора с увеличением расхода в рассмотренном диапазоне напоров перед

соплом $H_{\text{ман}} = (6,5 \dots 14)\text{м}$ возрастает от 6 до 12 % . Причем расход инжектируемой жидкости Q_2 непрерывно возрастает с ростом напора перед соплом $H_{\text{ман}}$ и подаваемого в сопло расхода Q_1 .

Объемный коэффициент инъекции, соответствующий максимальному в данном случае КПД гидроэлеватора:

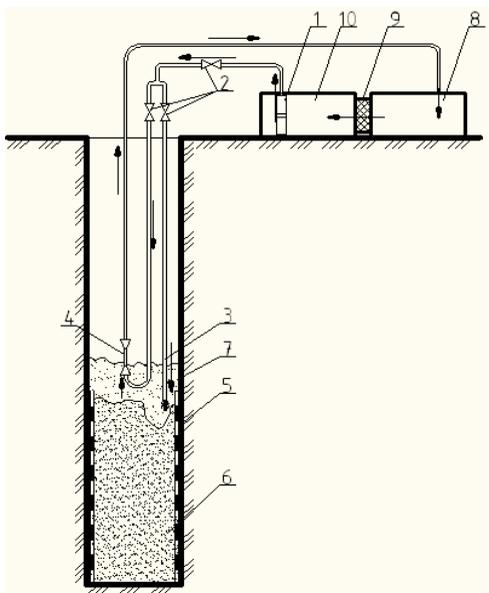
$$\beta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{0,35}{0,55} = 0,63.$$

В ходе лабораторных исследований создавали на дне модели скважины песчаную пробку и в процессе работы гидроэлеватора подавали расход из сети в гидромониторный шланг. Наблюдался активный размыв песчаной пробки струей из размывающего насадка и удаление песчаных отложений из ствола модели скважины в приемную емкость. Это подтвердило возможность использования предложенного типа гидроэлеваторов для текущего и капитального ремонтов скважин.

6.1.3 Полевые испытания гидроэлеваторной установки

Проведены полевые испытания [68] гидроэлеватора в составе гидроэлеваторной установки на скважине в д. Узла Мядельского района, которые подтвердили ее эффективность.

Принципиальная схема гидроэлеваторной установки представлена на рисунке 6.8.



1 – погружной насос; 2 – вентили; 3 – гидромониторный трубопровод;
 4 – гидроэлеватор; 5 – фильтр скважины; 6 – песчаная пробка; 7 – пульпа;
 8 – отстойник; 9 – сетка; 10 – резервуар

Рисунок 6.8 – Принципиальная схема гидроэлеваторной установки для удаления песчаной пробки

Гидроэлеваторный метод основан на том, что в фильтр скважины на трубах опускают гидроэлеватор 4, который устанавливают на поверхность песчаной пробки (см. рисунок 6.8). В активный насадок (сопло) гидроэлеватора подают под давлением от погружного насоса 1 чистую воду из резервуара 10. Одновременно по гидромониторному трубопроводу 3 подают воду в размывающий насадок, направленный в сторону песчаной пробки. Образующаяся при этом пульпа засасывается гидроэлеватором и подается по подающему трубопроводу в отстойник 8. Песок отделяется в отстойнике от воды, которая через сетку поступает в резервуар 10 на вход насоса 1.

Гидроэлеваторная установка была специально изготовлена для удаления песка из фильтров скважин глубиной до 50 м с внутренним диаметром не менее 150 мм. Установка включала в себя высоконапорный насос ЭЦВ 6-10-120 с пультом управления, гидроэле-

ватор, полиэтиленовые трубы: подающий трубопровод $d = 50$ мм; подводящий трубопровод $d = 32$ мм и гидромониторный трубопровод $d = 25$ мм, 2 кубовых емкости – резервуар и отстойник, шаровые краны для регулировки расхода, грузоподъемную ручную тросовую лебедку со скважинным блоком.

7 июня 2013 г. на скважине №2/2011 в д. Узла Мядельского района были проведены испытания гидроэлеваторной установки и выполнены работы по удалению песчаной пробки.

Методика работ. Демонтаж глубинного насоса из скважины. Сборка у павильона скважины оборудования гидроэлеваторной установки (рисунок 6.9), спуск гидроэлеватора на полиэтиленовых трубах и тросе ручной лебедкой на дно скважины (отметка 38,5 м).



Рисунок 6.9 – Наземное оборудование гидроэлеваторной установки на скважине №2/2011 в д. Узла Мядельского района

Насос ЭЦВ 6-10-120 включали и, регулируя шаровыми кранами подачу воды на размыв и в гидроэлеватор, откачивали пульпу в отстойник, который был установлен на опорах выше резервуара для самотечного слива воды из отстойника в резервуар. По мере удаления песка производили спуск гидроэлеватора (рисунок 6.10) на забой.

После частичного удаления песчаной пробки с помощью гидроэлеватора обнаружилось перебой в его работе, которые были вызваны появлением частиц щебня в составе песчаной пробки.



Рисунок 6.10 – Общий вид гидроэлеватора с подсоединенными шлангами перед спуском в скважину

Выяснилось, что при бурении скважины щебень засыпался в полость фильтра, чтобы перекрыть промывные отверстия в отстойнике, используемые для удаления сапропеля из зафильтрованного пространства. Чтобы частицы щебня не засорили узкую часть гидроэлеватора, было принято решение поднять гидроэлеватор на поверхность и дальнейшее извлечение песчано-щебеночной пробки продолжить с помощью желонки. Результаты восстановительных работ на скважине представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты восстановительных работ

Дата замеров	Статический уровень $h_{ст}$, м	Динамический уровень $h_{дин}$, м	Понижение уровня $S=h_{дин}-h_{ст}$, м	Дебит Q , м ³ /ч	Удельный дебит $q=Q/S$, м ² /ч	Увеличение уд. дебита, раз
2012 г., (затрубная промывка)	14,5	34	19,5	7,5	0,39	-
2013 г. (удаление песчаной пробки)	14,5	34	19,5	10	0,5	1,25

В результате удаления песчаной пробки удельный дебит скважины возрос в 1,25 раза.

6.2 Совершенствование методов обследования и ремонта дефектов пескующих скважин

Для определения характера дефекта (разрушен сальник или фильтр) в литературе предлагается отбор образца породы желонкой из песчаной пробки и изучение его состава. Если в образце песок разнотельный (диаметр частиц превышает размер проходных отверстий сетчатых или щелевых фильтров), то причина заноса – нарушение целостности водопримной поверхности фильтра; если разнотельный, с гравием, галькой и фильтр полностью занесен, то вероятная причина – неисправность сальника и подача породы по кольцевому зазору между надфильтровой и обсадной трубами. Однако, понятно, что этот способ не позволяет точно найти зону поступления песка и определить ее размеры. В работе [8] предлагается определять местоположение дефекта фильтра поинтервальной откачкой воды из скважины с герметизацией части фильтра. Этот метод требует применения погружного насосного агрегата с пакерами и является достаточно трудоемким и поэтому может быть реализован только одновременно с проведением ремонтных работ. В работе [41] предложена конструкция специального пробоотборника, который опускают в скважину и при работающем водоподъемном оборудовании, сбросив специальный груз, захватывают пробу воды с нужной глубины. По содержанию песка в пробе определяют место его притока. Следует отметить значительную трудоемкость и сложность этой технологии. Для выявления дефектов обсадных труб применяют специальную телевизионную установку, выпускаемую в ФРГ [8]. К недостаткам установки следует отнести невозможность дефектации водопримной поверхности фильтров, так как она находится за трубчатым каркасом и ее практически не видно изнутри фильтра.

К способам восстановления герметичности обсадных колонн и прорывов в фильтрах, связанных с некоторым уменьшением их внутреннего диаметра, относятся: закачка цементного раствора к месту повреждения по трубам; установка металлических накладок; установка гофрированных патрубков [138].

Несмотря на многочисленность существующих методов определения мест повреждений фильтров и способов их ремонта, большинство из них не нашли применения на водозаборах по причине необходимости в специальном сложном оборудовании и привлече-

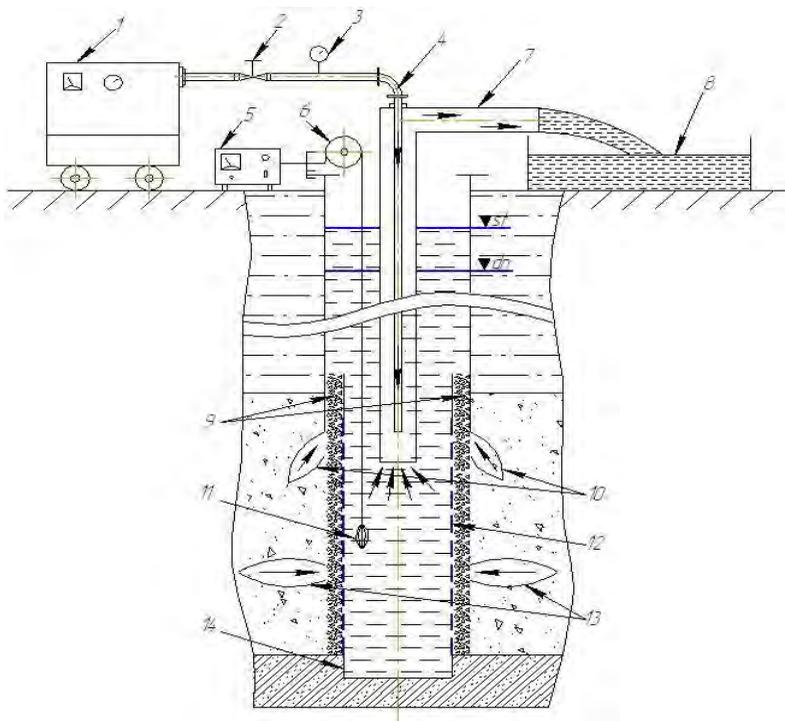
нии для этих работ специализированных ремонтных организаций, поэтому исследования в этой области являются актуальными.

Целью исследований являлось совершенствование методов дефектации, а также ремонта фильтров и обсадных труб пескующих скважин.

В БНТУ разработан и изготовлен прибор для обнаружения мест пескования скважин, который содержит пульт управления и индикатор мутности воды, перемещаемый вдоль фильтра в процессе откачки воды из скважины [64]. Индикатор мутности содержит источник света и фоторезистор, установленные напротив друг друга в проточном для воды корпусе. При замутнении потока воды частицами песка, освещенность фоторезистора падает и уменьшается ток в цепи, фиксируемый миллиамперметром в пульте управления. Это позволяет определить место притока песка в скважину.

На пескующей скважине (рисунок 6.11) предварительно монтируют эрлифт, состоящий из компрессора 1 с воздухопроводной трубой 4 для подачи сжатого воздуха, водоподъемной трубы 7.

Откачка воды осуществляется в бак 8 или на выброс. Если необходимо, производят откачку песчаной пробки, при этом конец водоподъемной трубы поддерживают на уровне песчаной пробки до полного удаления. После этого на скважине устанавливают прибор для обнаружения мест пескования скважин, состоящий из пульта управления 5, скважинного блока со счётчиком глубины 6 и индикатора мутности воды 11. Индикатор опускают на кабеле в скважину и перемещают вдоль её ствола при работающем эрлифте.



1 – компрессор; 2 – кран компрессора; 3 – манометр; 4 – воздухопроводная труба;
 5 – пульт управления; 6 – скважинный блок со счётчиком глубины;
 7 – водоподъемная труба; 8 – бак; 9 – гравийный сальник; 10 – возможные места
 пескования; 11 – индикатор мутности воды; 12 – фильтр с гравийной обсыпкой;
 13 – песчаная каверна; 14 – отстойник

Рисунок 6.11 – Схема обследования пескующей скважины

При этом регистрируются показания миллиамперметра, находящегося в пульте управления (рисунок 6.12). Индикатор мутности оформлен в виде проволочного каркаса, пронизываемого для воды при его движении по стволу скважины. Внутри каркаса напротив друг друга смонтированы источник света и фоторезистор. В качестве источника света применяется светодиод. Такая конструкция, с прямым прохождением светового луча через воду обеспечивает высокую чувствительность при нахождении небольшого количества песка в воде.

Если поток воды не содержит частиц песка – ток максимальный. Если индикатор попадает в зону поступления песка через фильтр или трубы, то освещённость фоторезистора уменьшается, ток падает, что фиксируется миллиамперметром.

Вес прибора с кабелем составляет 7 кг. Длина кабеля - 80 м. Диаметр индикатора мутности составляет 40 мм, длина – 120 мм.

В процессе работы строится диаграмма изменения силы тока по глубине скважины.



Рисунок 6.12 – Общий вид прибора для обнаружения мест пескования скважин

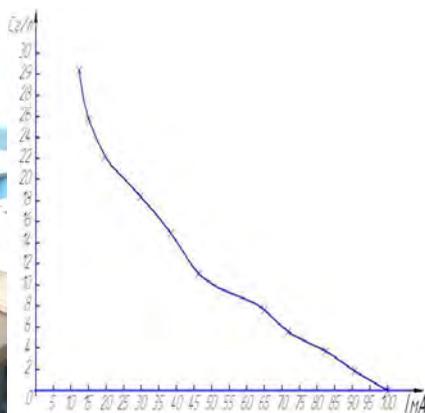


Рисунок 6.13 – График зависимости силы тока I от концентрации песка C

Градуировка прибора производилась в лабораторных условиях. С помощью электронных весов были приготовлены навески с песком массой 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 грамм. Для моделирования полости скважины использовалась цилиндрическая ёмкость, внутренняя поверхность которой была покрашена в тёмный матовый цвет для устранения дополнительного отражения света от стенок. Объём ёмкости составил $0,54 \text{ дм}^3$. Индикатор мутности был помещён в эту ёмкость и жёстко закреплён. Опыты производились с каждой навеской песка. Ёмкость заполняли чистой водой, высыпали песок и герметизировали крышкой. Затем включали измерительный пульт, банку вручную встряхивали до тех пор, пока показание миллиамперметра I не стабилизировалось. Расчёт концентрации

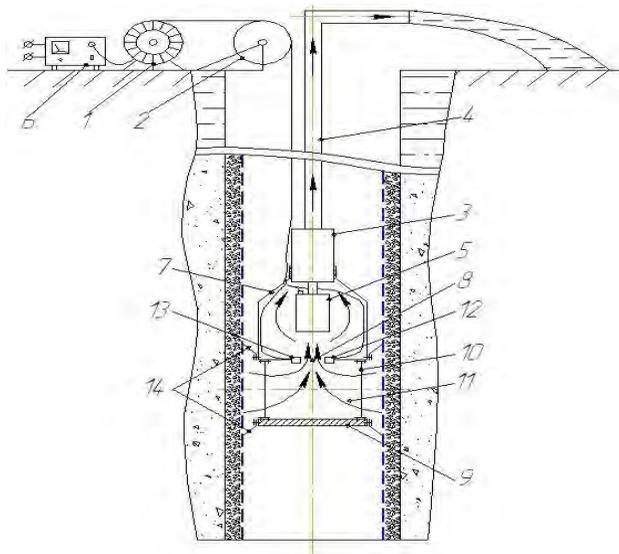
песка производился по формуле $C=m/V$, где m – масса, измеряемого песка, грамм; V – объём сосуда с водой.

Полученный график $I=f(C)$ (см. рисунок 6.13) был использован в полевых условиях при обследовании прибором пескующих скважин №2 глубиной 60 м водозабора «Водопой» УП «Минскводоканал» и №22 глубиной 86 м водозабора «Северный» г. Жодино УП «Жодинский водоканал» для определения мест пескования фильтров.

В первой скважине индикатор мутности перемещали снаружи водоподъемной трубы эрлифта, во второй – внутри при откачке на выброс. В обоих случаях пескование было обнаружено в нижней четверти фильтров. Пескование скважин было предотвращено путем засыпки нижних частей фильтров мелким щебнем. Выработаны наиболее благоприятные условия применения прибора: 1) при перемещении индикатора мутности снаружи труб эрлифта, они должны иметь не фланцевые, а муфтовые соединения; 2) оголовок скважины должен быть закрыт от поступления света, чтобы увеличить качество измерений.

Для упрощения работ по обследованию пескующих скважин было разработано специальное устройство, оснащенное погружным насосным агрегатом и прибором для обнаружения мест пескования (рисунок 6.14) [64].

Погружной насосный агрегат, состоящий из насоса 3 с электродвигателем 5, опускают в нижнюю часть фильтра водозаборной скважины, включают источник электропитания 6 и с помощью барабана 1 и скважинного блока 2 начинают перемещать вверх. При включении электродвигателя погружной насос создает разрежение в зоне фильтра, ограниченного уплотнительными манжетами 14, закрепленными на диске 9 и охлаждающем кожухе 7 насоса. Вода проходит через ограниченный манжетами участок фильтра, последовательно поступает через цилиндрическое 11 и круглое 8 отверстия в полость охлаждающего кожуха и далее попадает в насос, который подает ее по напорному трубопроводу 4 на выброс.



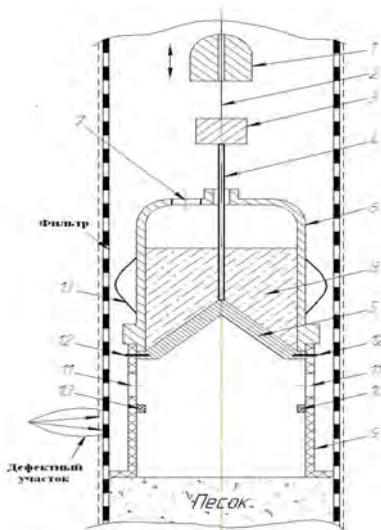
1 – барабан с кабелем; 2 – скважинный блок; 3 – насос; 4 – напорный трубопровод; 5 – электродвигатель; 6 – пульт управления; 7 – охлаждающий кожух; 8 – отверстие; 9 – диск; 10 – стержни; 11 – цилиндрического отверстия; 12 – фоторезистор; 13 – источник света; 14 – уплотнительные манжеты

Рисунок 6.14 – Схема устройства для обследования пескующих скважин, оснащенного погружным насосным агрегатом

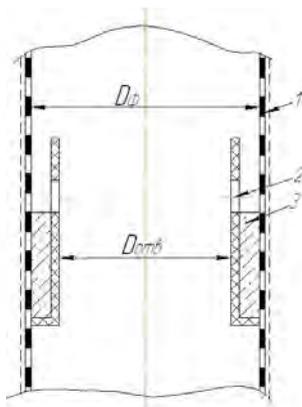
По пути в насос поток воды проходит между источником света 13 и фоторезистором 12, которые подключены к пульту управления 6, содержащему миллиамперметр. Сила тока на миллиамперметре зависит от содержания песка в потоке воды. Перемещая погружной насосный агрегат вдоль ствола скважины и фиксируя показания миллиамперметра, можно с высокой точностью определить место притока песка и произвести его ремонт.

Предложена также конструкция устройства для тампонирования поврежденного участка обсадной трубы или фильтра водозаборной скважины (рисунок 6.15) [62].

Устройство состоит из желонки 6 с коническим клапаном 5 в нижней части и цилиндрической опалубки 9 с упорами 10 и башмаком в нижней части. Клапан желонки жестко закреплен к металлическому стержню 4, имеющему в верхней части диск 3 с тросом 2.



- 1 – посыльный груз; 2 – трос; 3 – диск;
 4 – стержень; 5 – клапан; 6 – желонка;
 7 – пробка; 8 – цементный раствор; 9 –
 пластиковая труба; 10 – стопор; 11 – окна для
 цементации; 12 – срезаемые стопора;
 13 – искусственная песчаная пробка;
 14 – песчаная каверна; 15 – фильтр



- 1 – фильтр;
 2 – опалубка;
 3 – цементное кольцо

Рисунок 6.16 – Схема
 отремонтированного участка
 фильтра

Рисунок 6.15 – Схема прибора для цементации
 места пескования фильтра

Ремонт места пескования осуществляется следующим образом. Скважину заполняют песком до места дефекта обсадной трубы или фильтра. На земле предварительно собирают устройство для локальной цементации. Желонку с упорами ставят на опалубку, затем клапан желонки поднимают вверх до упора в нижний срез желонки и плотно скрепляют с опалубкой с помощью срезаемых стопоров. После этого через пробку заливают цементный раствор в полость желонки. Затем собранную конструкцию опускают в скважину, пока она не достигнет искусственной песчаной пробки (см. рисунок 6.15). Затем по тросу как по направляющей сбрасывают в скважину посыльный груз, который производит удар по диску. При этом срезаются стопора. Клапан желонки движется вниз до упоров

опалубки. Цементный раствор вытекает через окна, заполняет и цементирует кольцевое пространство между фильтром и опалубкой. Затем производят подъём желонки 6. Через определённый промежуток времени, зависящий от состава цементного раствора и скорости его затвердевания, удаляют искусственную песчаную пробку эрлифтом.

Участок отремонтированного фильтра скважины имеет местное сужение (см. рисунок 6.16). Диаметр фильтра $D_{\text{ф}}$ в месте произведённого ремонта уменьшается на 50 – 60 мм и становится равным $D_{\text{отв}}$. После окончания всех ремонтных работ на скважине, её вводят в эксплуатацию.

Преимуществом данного метода является низкая стоимость и невысокая сложность выполнения ремонтных работ. К недостаткам можно отнести то, что незначительно уменьшается пропускная способность фильтра и дебит скважины.

Выводы по главе 6

1. Разработана методика расчета гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из водозаборных скважин, содержащей струйный насос-гидроэлеватор и гидромониторный трубопровод с насадком, обеспечивающим размыв песчаной пробки. Приведен пример расчета параметров установки. Методика позволяет при заданной глубине и диаметре скважины графическим методом подобрать рабочий насос, диаметры подводящего и гидромониторного трубопроводов, а затем рассчитать размеры струйного насоса-гидроэлеватора и подающего трубопровода, произвести анализ эффективности работы установки. На водозаборной скважине 2/2011 в д.Узла глубиной 41м и диаметром 150мм проведены успешные натурные испытания гидроэлеваторной установки с регулируемым соплом и размывающим насадком, разработанной в БНТУ. В результате размыва и извлечения песчаной пробки дебит скважины увеличился с 7,5 м³/ч до 8,5 м³/ч, что подтвердило техническую и экономическую эффективность предложенной технологии текущего ремонта пескующих скважин.

2. Разработан и изготовлен прибор для обнаружения мест пескования скважин, который содержит пульт управления и индикатор мутности воды, перемещаемый в процессе обследования вдоль

фильтра в процессе откачки воды из скважины. Прибор прошел лабораторные и полевые испытания на скважинах и показал свою работоспособность.

3. Разработана конструкция специального устройства для обследования фильтров скважин, включающего погружной насосный агрегат и прибор для обнаружения мест пескования. Устройство позволяет выполнять работы без привлечения эрлифта и компрессора. Для ремонта обнаруженного дефектного участка предложено устройство для тампонирования поврежденного участка обсадной трубы или фильтра водозаборной скважины, содержащее контейнер для цементного раствора с принудительно открываемым клапаном и несъемную опалубку. Предложенные устройства защищены патентами Республики Беларусь и позволяют выполнять работы на скважинах силами эксплуатационного персонала без привлечения специализированных организаций.

ГЛАВА 7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН И МЕТОДОВ ИХ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА

Одной из главных причин выхода водозаборных скважин из строя в процессе эксплуатации является пескование, которое может быть вызвано: суффозией пластового песка через фильтр при неправильном подборе гравийной обсыпки; выносом песка при выходе из строя сальника (фильтр установлен «впотай»); коррозионным и абразивным износом водоприемной поверхности, а также ее разрушением в результате импульсной декольматации [126].

В практике можно выделить три основных метода капремонта: 1) устройство защитной гравийной пробки в нижней пескующей части фильтра; 2) установка ремонтного фильтра меньшего диаметра внутрь пескующего фильтра; 3) извлечение вышедшего из строя фильтра и замена новым [11].

Первый метод является самым простым и не требует применения спецтехники, однако здесь необходима точная информация о том, что приток песка в скважину происходит только через нижнюю часть фильтра. Капитальный ремонт скважины сводится к засыпке пескующей нижней части фильтра щебенкой или крупным гравием. Реализация второго метода возможна при наличии специальной техники, оборудования, хорошо подготовленной опытной бригады. Третий метод капремонта, заключающийся в извлечении вышедшего из строя фильтра и замены новым, практически невыполним в скважинах типовых конструкций. Его успешная реализация возможна в скважинах ремонтнопригодных конструкций, разработка которых является актуальной задачей.

7.1 Опыт капитального ремонт скважины с установкой ремонтного фильтра внутрь вышедшего из строя

Метод установки нового фильтра внутрь применяют, если старый фильтр разрушен или вышел из строя сальник, а фильтр имеет сравнительно большой диаметр (≥ 200 мм). Ремонтный фильтр меньшего диаметра с центраторами опускают на штангах внутрь существующего, обсыпают гравием, штанги удаляют. Недостаток данной технологии заключается в отсутствии операции предвари-

тельной декольматации ремонтируемого фильтра. Поэтому быстро растет кольматаж, снижается дебит и срок службы скважины.

Отработка технологии капитального ремонта скважин путем установки нового фильтра внутрь вышедшего из строя с его предварительной декольматацией производилась на артезианской скважине №3Б (128290/96) водозабора «Северный» г. Жодино глубиной 94 м. Скважина пробурена 01.06.96 г., оснащена проволочным фильтром диаметром 325 мм (12") в интервале от 73 до 93 м. Обследование показало, что с 1996г. по 2002г. скважина существенно (в 2,3 раза) снизила удельный дебит с 7 до 3,1 м²/ч. Данные замеров представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Гидравлические характеристики скважины №3Б

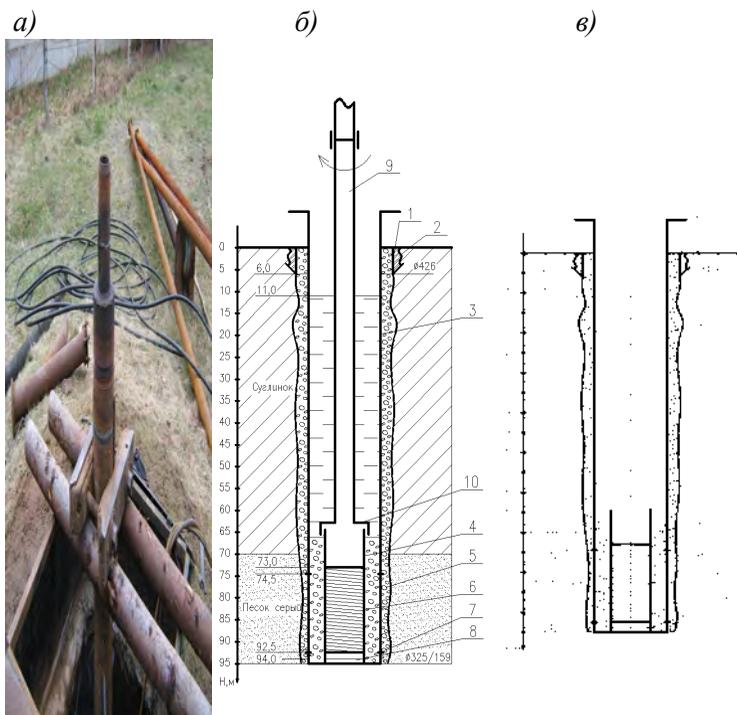
Дата замеров	Статический уровень, м	Понижение уровня, м	Дебит, м ³ /ч	Удельный дебит, м ² /ч
после бурения (01.06.96)	11	10	70	7
до декольматажа (19.09.02)	11	13	40	3,1
после декольматажа (20.09.02)	11	3	40	13,3

20 сентября 2002 г. При участии автора произведен текущий ремонт скважины, который представлял собой работы по декольматации фильтра газоимпульсным методом на основе взрыва газовой смеси 2Н₂ + О₂ в полости фильтра и эрлифтные прокачки до и после обработки. Взрывы осуществлялись в полузамкнутой камере с запасаемой энергией 56-60 кДж. Всего было произведена одна серия импульсов по всему фильтру с интервалом 0,15м. Данные по результатам обработки приведены в таблице 7.1.

В результате декольматации фильтра достигнуто увеличение удельного дебита в 4,3 раза по отношению к удельному дебиту до обработки, что соответствует 190% от начального при бурении и

указывает на плохое освоение скважины при сдаче ее в эксплуатацию буровой организацией.

12 мая 2010г. Скважина №3Б запесковала. Произведен ее капитальный ремонт (рисунок 7.1).



1 – кондуктор; 2 – цементация; 3 – эксплуатационная колонна; 4 – надфильровая труба; 5 – наружный фильтр; 6 – внутренний фильтр; 7 – гравийная обсыпка; 8 – отстойник; 9 – буровые штанги; 10 – муфта с левой резьбой

Рисунок 7.1 – Капитальный ремонт скважины №3«Б»:

а – общий вид ремонтной фильтровой колонны с левым переводником перед спуском в скважину №3; *б* – установка ремонтного фильтра на буровых штангах; *в* – конструкция скважины после извлечения буровых штанг

Состав работ: повторная обработка фильтра подводными взрывами смеси $2H_2 + O_2$ с целью удаления отложений; откачка скважины эрлифтом; установка внутрь скважины новой фильтровой ко-

лонны диаметром 159 мм, имеющей отстойник длиной 1,5 м, проволочный фильтр длиной 18 м с обмоткой из нержавеющей стальной проволоки трапецидального сечения высотой 2 мм с шагом 1 мм на трубчатый каркас, надфильтровую трубу длиной 10 м; засыпка гравия в межтрубное пространство (рисунок 7.1).

Спуск новой фильтровой колонны осуществляли автокраном на буровых штангах, закрепленных к ее верхней части с помощью левого переводника (рисунок 7.1б). После установки фильтровой колонны на дно скважины ее обсыпали гравием и, вращая буровые штанги вправо, откручивали муфту с левой резьбой и поднимали штанги на поверхность.

Результаты испытаний скважины представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Результаты гидравлических испытаний скважины №3«Б»

Вид откачки	Динамический уровень, м	Понижение уровня, м	Дебит, м ³ /ч	Удельный дебит, м ² /ч
До газоимпульсной обработки	25	4	24	6
После обработки	12,3	1,3	16	12
После капремонта	12,2	1,2	14	11,5

Испытания показали, что посредством газоимпульсной обработки удельный дебит скважины перед капитальным ремонтом удалось увеличить в 2 раза (с 6 до 12 м²/ч), что позволило частично удалить кольматирующие отложения из фильтра и гравийной обсыпки. Эта операция необходима, так как после установки ремонтного фильтра она неэффективна. В последнее время скважина №3«Б» использовалась периодически для розлива воды.

Отсюда следует, что капремонту скважины должна предшествовать импульсная или реагентная обработки. Капремонт путем установки ремонтного фильтра внутрь существующего снижает дебит и срок службы скважины из-за интенсивного кольматажа двойного фильтра.

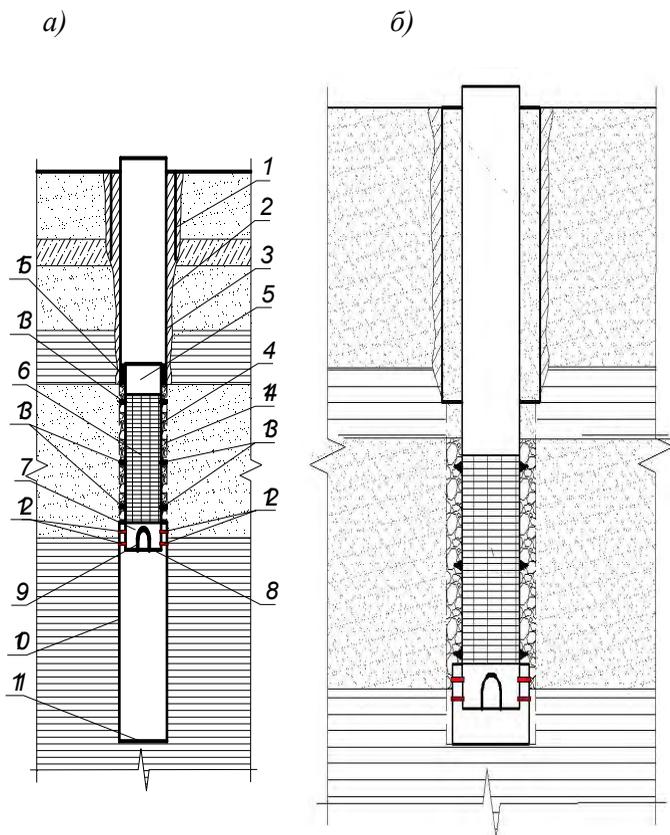
7.2 Скважина со смещаемым вниз фильтром

Третий способ капремонта заключается в подъеме фильтра на поверхность и замене новым. На практике извлечь фильтр удается не всегда из-за больших сил сцепления фильтра с породой и разрыва секций по сварным швам, работающим на растяжение. Это обусловлено тем, что в прилегающем к фильтру слое гравия образуется природный цемент обрастания, прочность которого может достигать 2 МПа.

Установка фильтра «впотай» обеспечивает возможность его подъема на поверхность и замену новым при капитальном ремонте скважины. Однако успешная замена фильтра возможна только в малодобитных скважинах, имеющих фильтры сравнительно небольшой длины (до 6 м). Извлечь и заменить фильтр большой длины (9-20 м) с надфильтровой трубой, имеющей длину обычно 7-12 м, на практике не представляется возможным. Это связано со значительными силами трения, возникающими между надфильтровой трубой и гравийной обсыпкой, фильтром и цементированной кольчатантом обсыпкой при подъеме. Сила трения прямо пропорциональна длине фильтра. При захвате фильтра в верхней части и подъеме его домкратами или лебедками, вся фильтровая колонна начинает работать на растяжение. Возникающие растягивающие усилия, из-за высоких сопротивлений трения между надфильтровой трубой и гравийной обсыпкой, фильтром и цементированным грунтом, значительно превышают прочность сварных швов на растяжение. В результате при длинном фильтре происходит разрыв надфильтровой трубы и секций фильтра по сварным швам. Эксплуатация подобной скважины в дальнейшем не представляется возможной, ее тампонируют и перебуривают, что является весьма дорогостоящим мероприятием.

Для повышения ремонтпригодности скважины в части выполнения капитального ремонта предложено оснащать ее смещаемым вниз фильтром (рисунок 7.2)[139].

В предлагаемой скважине (рис. 7.2а) под фильтром искусственно создана полость, в которую перед извлечением можно посредством удара или статического нагружения сместить фильтр, а затем, с меньшими подъемными усилиями извлечь его на поверхность. Конструктивно роль полости играет гильза 10, внутри которой с помощью срезаемых шпилек 12 закреплен отстойник 7 фильтровой колонны 4, снабженный захватной скобой 9.



1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3 – эксплуатационная колонна;
 4 – фильтровая колонна; 5 – надфильтровая труба; 6 – фильтр; 7 – отстойник;
 8 – днище; 9 – захватная скоба; 10 – гильза; 11 – днище; 12 – шпильки; 13 – зубья;
 14 – обсыпка; 15 – сальник

Рисунок 7.2 – Конструкции водозаборных скважин со смешаемыми вниз фильтрами, установленными: *а* – «впотай» с длинной гильзой; *б* – на «основной колонне» с короткой гильзой

При капремонте в ствол скважины с помощью лебедки бурового ударно-канатного станка (УКС) опускают буровые штанги до упора в торец надфильтровой трубы 5. Верхний конец буровых штанг выводят на устье скважины, так, чтобы он возвышался над оголовком, снабжают ударником и сбрасывают на него с помощью лебедки

бурового станка груз значительной массы. Ударное усилие через буровые штанги передается на фильтровую колонну 4. Если масса груза подобрана правильно, под действием ударной нагрузки происходит срез материала шпилек 12 и перемещение вниз фильтровой колонны 4 внутри гильзы 10. Фильтровая колонна 4 смещается вниз, преодолевая силы трения и сцепления с гравийной обсыпкой. Материал фильтровой колонны и сварных швов работает на сжатие, что исключает его разрушение. По мере смещения вдоль грунта зубья 13, выполненные из твердосплавного материала, разрыхляют гравийную обсыпку, что облегчает последующее извлечение фильтровой колонны наверх. Затем буровые штанги достают, в скважину опускают грузовой крюк, который вводят в зацепление с захватной скобой 9 и посредством лебедки бурового станка извлекают фильтровую колонну 4 наверх.

При невозможности извлечения фильтровой колонны 4 ее оставляют внутри «длинной» гильзы 10, соизмеримой с длиной фильтровой колонны 4 (см. рисунок 7.2б). Гравийную обсыпку выбуривают долотом, устанавливают новую фильтровую колонну и обсыпают ее новой гравийной обсыпкой.

Если надфильтровая колонна 4 выведена на устье скважины (скважина с фильтром на «основной колонне»), то удары грузом значительной массы наносят по надфильтровой трубе, снабдив ее специальным наголовником, чтобы предотвратить смятие края трубы (см. рисунок 7.2б). Скважина этой конструкции для экономии средств должна быть снабжена «короткой» гильзой.

Наличие гильзы в нижней части скважины обеспечивает возможность движения фильтровой колонны вниз при работе материала сварных швов на сжатие, что обеспечивает надежный срез цементирующих связей на контакте колонны и гравийной обсыпки и сохранение целостности колонны.

Проверим, возможен ли разрыв шва при подъеме, для чего определим для него допустимую величину растягивающей силы $P_{ш}$ и сравним ее с подъемным усилием $P_{п}$, необходимым для извлечения эксплуатационной колонны с фильтром только статической силой.

Условие прочности сварного шва встык на растяжение при извлечении колонны можно определить по формуле [140]

$$\sigma_p = \frac{P}{F} \leq [\sigma_p^{\text{э}}] \quad , \quad (7.1)$$

где F – площадь поперечного сечения трубы наружным диаметром $d_{\text{кол}}$ и толщиной δ в месте сварки, $F = \pi d_{\text{кол}} \cdot \delta$;

$P_{\text{ш}}$ – растягивающее усилие;

$[\sigma_p^{\text{э}}]$ – допустимое напряжение для электросварных швов.

Тогда допустимая нагрузка на шов равна

$$P_{\text{ш}} \leq \pi d_{\text{кол}} \delta \cdot [\sigma_p^{\text{э}}]. \quad (7.2)$$

Допустимые напряжения для электросварочных швов, выполненных вручную толстопокрытыми электродами $[\sigma_p^{\text{э}}] = 0,8[\sigma_p]$, где $[\sigma_p]$ – допускаемое напряжение основного металла. Если металл шва – Ст 3, то $[\sigma_p] = 160 \text{ МПа}$ [140].

Находим по формуле (7.2) допустимую силу для шва при извлечении трубы $d_{\text{кол}} = 0,273 \text{ м}$, $\delta = 7 \text{ мм} = 0,007 \text{ м}$, металл шва - Ст 3, $[\sigma_p] = 160 \text{ МПа}$:

$$P = 0,8\pi d_{\text{кол}} \delta \cdot [\sigma_p] = 0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,273 \cdot 0,007 \cdot 160 \cdot 10^6 = 770 \text{ кН}. \quad (7.3)$$

Расчет сделан для шва встык, выполненного равномерно по всей площади торца трубы. Однако на практике такой шов не обеспечивается, так как трубы имеют фаски под углом 45° , их сваривают в вертикальном положении, поставив одну трубу на другую. В этом случае шов разрушается по плоскости, имеющей площадь $F' = \pi d_{\text{кол}} \cdot \delta \cdot \cos 45^\circ = 0,7F$, поэтому допустимая сила при извлечении будет на 30% меньше, т.е.

$$P' = 0,7P = 0,7 \cdot 770 = 540 \text{ кН}. \quad (7.4)$$

В то же время в литературе [7, с. 294] указывается, что при нагрузках до 950-1000 кН, фильтры, как правило, не извлекаются. Это значит, что при таких нагрузках произойдет разрыв сварного шва.

Подъемное усилие P_{Π} при извлечении эксплуатационной колонны с фильтром только статической силой находим по формуле [27]

$$P_{\Pi} = G + F_{\text{тр.к}} + F_{\text{тр.ф}} = g(q_{\text{кол}}l_{\text{кол}} + q_{\text{ф}}l_{\text{ф}}) + N \cdot f + F_{\text{тр.ф}}, \quad (7.5)$$

где G – общий вес извлекаемой эксплуатационной колонны и фильтра;
 $F_{\text{тр.к}}, f$ – сила и коэффициент трения эксплуатационной колонны о породу;

$q_{\text{к}}, q_{\text{ф}}$ – соответственно массы 1 м.п. колонны и фильтра, имеющих длины $l_{\text{к}}$ и $l_{\text{ф}}$;

N – горизонтальная составляющая бокового давления породы на колонну;

$F_{\text{тр.ф}}$ – сила трения фильтра с «кольматационной коркой» о породу.

Силу N найдем (при допущении о треугольной эпюре распределения горизонтальных напряжений от горного давления по глубине) как объем эпюры давления, действующего на колонну длиной $l_{\text{к}}$ и наружным диаметром $d_{\text{к}}$:

$$\begin{aligned} N &= 0,5l_{\text{к}}(\sigma_{\text{в}} + \sigma_{\text{н}})\pi d_{\text{к}} = \\ &= 0,5l_{\text{к}}\left[\sum K_{0i} \cdot \gamma_i \cdot h_i + (\sum K_{0i} \cdot \gamma_i \cdot h_i + K_{0n} \cdot \gamma_n \cdot l_{\text{к}})\right]\pi d_{\text{к}}, \end{aligned} \quad (7.6)$$

где $\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{н}}$ – напряжения на верхней и нижней отметках колонны;

K_{0i} – коэффициент давления i -ого слоя грунта толщиной h_i и удельным весом γ_i ;

K_{0n}, γ_n – то же самое водонасыщенного грунта;

K_{0i} и K_{0n} определяют по формуле (5.22).

Силу трения фильтра о породу, определим по указаниям П13-01 к СНБ 5.01.01-99 [141] как несущую способность буронабивной сваи, работающей на выдергивающие нагрузки:

$$F_{\text{тр.ф}} = \gamma_c \sum u \cdot \gamma_{cf} \cdot R_{fi} h_i, \quad (7.7)$$

где γ_c – коэффициент условий работы, $\gamma_c \approx 0,8$;

u – осредненный периметр поперечного сечения фильтра с «кольматационной коркой», состоящей из частиц гравийной обсыпки, скрепленной цементом обрастания, в i - слое водоносного пласта, м;

γ_{cf} – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности «кольматационной корки», зависящий от прочности отложений, $\gamma_{cf} = 0,6-0,8$;

R_{fi} – расчетное сопротивление трению грунта в пределах i -ого слоя водоносного пласта толщиной h_i .

Теперь рассмотрим задачу о нахождении потребной энергии удара для преодоления бокового сопротивления грунта по всей длине колонны труб и лобового сопротивления грунта для смещения ее на заданное расстояние в скважине и обеспечения срезки шпилек гильзы. Используем энергетический подход, применяемый для прогнозирования погружения свай в грунте [142].

Уравнение энергетического баланса для вертикального смещения колонны труб скважины имеет вид: полезная работа удара при погружении колонны труб скважины в грунте на заданное расстояние равна сумме работ сил бокового сопротивления грунта по всей боковой поверхности колонны и сил лобового сопротивления, плюс работа сил сопротивления материала шпилек при их срезке. Расчетные схемы для определения энергии удара для различных конструкций нижней части скважины, представлены на рисунке 7.3.

Для анализа системы молот-колонна-грунт используем наиболее простую пластическую модель, построенную с учетом следующих допущений: скважина представляет собой абсолютно твердый трубчатый стержень; окружающий скважину грунт неподвижен; силы трения между боковыми поверхностями элементов конструкции скважины и грунтом не зависят от скорости движения (кулоновское сухое трение).

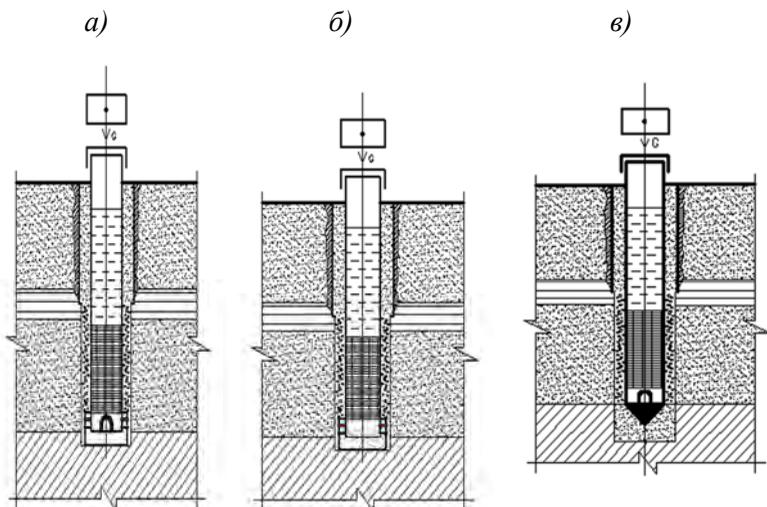


Рисунок 7.3 – Расчетные схемы определения энергии удара:

a – шпильки рассчитаны на вес всей колонны;

б – шпильки рассчитаны только на вес гильзы;

в – отстойники мест внедряемый в грунт наконечник

Для общего случая уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$aE = (R_{\phi} + R_k + R_{\text{лоб}})e + [\tau_{\text{CP}}] \cdot \omega \cdot \delta \cdot n / 2, \quad (7.8)$$

где *a* – поправочный коэффициент;

E – энергия удара;

R_k, R_{ϕ} – силы трения боковых поверхностей соответственно

фильтра и эксплуатационной (надфильтровой) колонны о грунт;

$R_{\text{лоб}}$ – лобовое сопротивление конструкции;

e – перемещение конструкции вследствие удара;

$[\tau_{\text{CP}}]$ – прочность материала шпилек на срез;

ω – площадь поперечного сечения шпильки;

δ – перемещение конструкции при срезе шпильки, равное диаметру шпильки;

n – количество шпилек.

Величину энергии, идущей непосредственно на погружение конструкции, в случае молота свободного падения, определим из [143]

$$E = 0,9G \cdot H \cdot \eta, \quad (7.9)$$

где G , H – вес ударной части молота и высота ее падения;

η – КПД передачи энергии от молота погружаемой конструкции при ударе.

КПД удара η может быть приближенно вычислен из условия соударения двух свободных тел в рамках классической теории удара

$$\eta = \frac{1 + m \cdot \varepsilon^2}{1 + m}, \quad (7.10)$$

где m – отношение массы конструктивных элементов скважины M_C к массе молота M_M ;

ε – коэффициент восстановления при ударе через наголовник с прокладкой, $\varepsilon = 0,45-0,55$ [142].

Известно, что результативность удара тем выше, чем больше масса молота при одной и той же энергии удара. Поэтому поправочный коэффициент a отражает изменение эффективности удара в зависимости от отношения массы молота к массе погружаемой конструкции. На основании сопоставлений фактических и расчетных кривых погружения свай (более 600 свай) была предложена зависимость [142]

$$a = k \sqrt{\frac{M_M}{M_C}}, \quad (7.11)$$

где k – коэффициент, характеризующий степень совершенства модели, т.е. соответствие фактическим данным и рекомендуется для подвесного молота – $k = 0,5-0,7$ [142].

Силы трения боковых поверхностей R_k, R_ϕ эксплуатационной и фильтровой колонн о грунт при ударе определим по общей формуле

$$R_i = u_i \cdot f_i \cdot l_i, \quad (7.12)$$

где u – периметр поперечного сечения колонны;

f – расчетное сопротивление грунта [144];

l – длина колонны.

Силу лобового сопротивления $R_{\text{лоб}}$ нижней части конструкции при внедрении в грунт определим по формуле

$$R_{\text{лоб}} = R_{\text{д}} \cdot F, \quad (7.13)$$

где $R_{\text{д}}$ – лобовое сопротивление грунта [144];

F – площадь поперечного сечения отстойника.

Предложенная методика расчета позволяет определить необходимые усилия для смещения вниз и извлечения фильтровой колонны при выполнении капитального ремонта скважин со смещаемыми фильтрами.

7.3 Скважины с керамзитовой засыпкой и выбуриваемой песчаной подушкой под отстойником

В 2015 г. был разработан проект бурения новых скважин №№ 2¹, 4¹, 5¹, 11¹ в зонах строгого режима тампонируемых скважин №№ 2, 4, 5, 11 и проведены работы по их тампонажу и перебурированию. Для облегчения извлечения эксплуатационных колонн с фильтрами и отстойниками при проведении капитальных ремонтов новых скважин №№ 2¹, 4¹, 5¹, 11¹, каждая из них была оснащена облегченной засыпкой из керамзитового песка снаружи эксплуатационной колонны и деревянной пробкой в отстойнике, песчаной подушкой мощностью 2м под отстойником (рисунок 7.4).

Капитальный ремонт скважины рекомендовано производить в следующей последовательности.

1) Опускают в межтрубное пространство струйный размыватель и подают в него воду от погружного насоса (рисунок 7.5). Насос забирает воду из скважины и подает её через гибкий шланг в струйный размыватель. Он состоит из коллектора и насадок с соплами. Вода распределяется по коллектору и попадает в насадки. Насадки имеют несколько отверстий, обращенных в разные стороны. Лобовые сопла, расположенные под углом от 15 до 45 градусов по отношению к оси, служат для размыва. Сопла, расположенные в обратном направлении служат для обеспечения движе-

ния насадка. Возникающая реактивная сила заставляет насадку двигаться вперед, при этом происходит взвешивание керамзитового песка мощными струями воды. Установлено четыре насадки на одинаковом расстоянии друг от друга. На поверхности земли установлена лебедка с ручным приводом. Она служит для спуска-подъема коллектора.

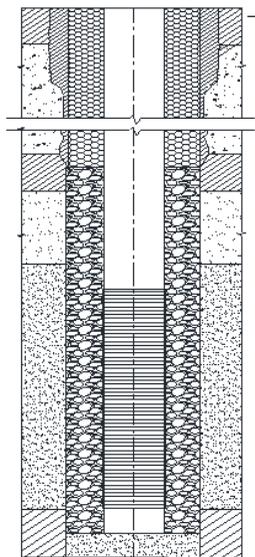
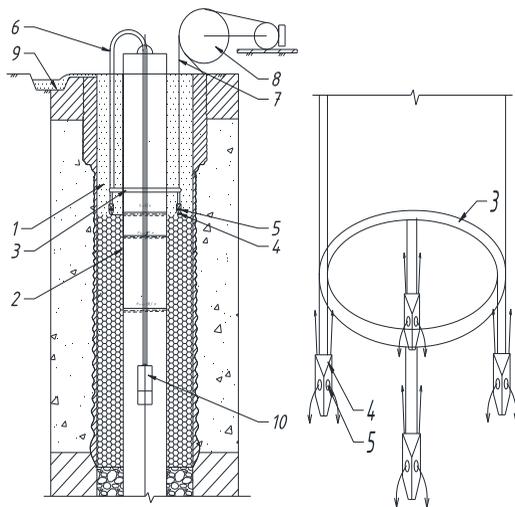


Рисунок 7.4 – Типовая конструкция скважины



1 – межтрубное пространство; 2 – эксплуатационная колонна; 3 – коллектор; 4 – насадка; 5 – сопло; 6 – шланг; 7 – трос; 8 – блок; 9 – приямок; 10 – погружной насос

Рисунок 7.5 – Процесс удаления керамзитовой засыпки струйным размывателем

Расход, необходимый для промывки, находят из формулы

$$Q_{\text{пр}} = \kappa \cdot w \cdot S, \quad (7.14)$$

где κ – коэффициент запаса на поглощение воды;

w – гидравлическая крупность керамзитового песка, $w \approx 0,92 \text{ м/с}$ для керамзитового песка с крупностью зерен (1-4) мм, выпускаемого Петриковским керамзитовым заводом Гомельской области;

S – площадь поперечного сечения, равная $S=0,785(D_{\text{конд.}}^2-D_{\text{кол.}}^2)$;
 $D_{\text{конд.}}$, $D_{\text{кол.}}$ – внутренние диаметры кондуктора и эксплуатационной колонны, соответственно.

При подстановке $\kappa = 1,2$; $w = 0,92$ м/с; $D_{\text{конд.}} = 0,7$ м; $D_{\text{кол.}} = 0,325$ м получили $Q_{\text{пр}} = 120$ м³/ч, который можно забрать только из сборного водовода водозабора.

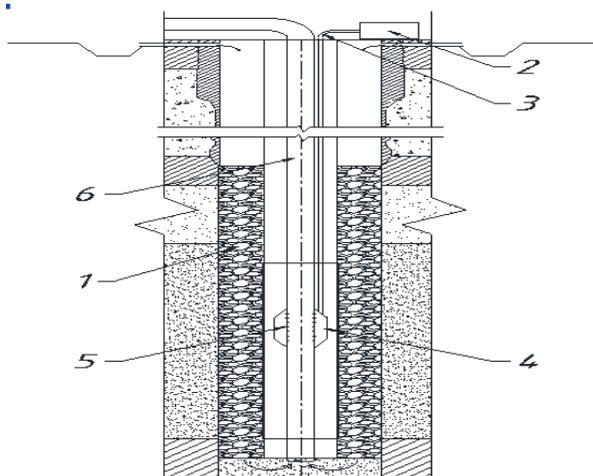
Если расхода воды, необходимого для взвешивания и выноса керамзитового песка недостаточно, в межтрубное пространство опускают гидроэлеватор или эрлифт (на рисунке не показаны). Освобождающееся затрубное пространство заливают сапропелевым буровым раствором, размешав сапропель в бетономешалке с водой.

2) Буровым долотом выбуривают деревянную пробку в отстойнике и песчаную подушку толщиной 2м под фильтром. Поднимают инструмент. Устанавливают внутрь скважины эрлифт и откачивают песок из-под фильтра и часть гравийной обсыпки из-за фильтровой колонны, обжимающей ее (рисунок 7.6).

При этом из кольцевого приемка скважины по мере удаления гравийной обсыпки непрерывно подают сапропелевый раствор, который создает водонепроницаемую корку на стенках ствола скважины и предотвращает их обрушение. Таким образом, пространство, освобождающееся от гравийной обсыпки, замещается буровым раствором.

Указанные технологические операции позволяют удалить часть обсыпки, обжимающей фильтр и создать полость под фильтром.

3) Ударным усилием или с помощью домкратов смещают фильтр вместе с эксплуатационной колонной вниз в полость под фильтром. Это позволяет срезать цементирующие связи между оставшейся гравийной обсыпкой и фильтром и облегчить его последующее извлечение. При смещении вниз все сварные швы эксплуатационной колонны и фильтра работают на сжатие, что исключает их разрушение. Затем в отстойник скважины опускают расклинивающее устройство и тяговым усилием за низ фильтра с вибрацией поднимают его вместе с эксплуатационной колонной на поверхность для замены. Наличие облегченной керамзитовой обсыпки снаружи эксплуатационной колонны позволяет снизить трение и тяговые усилия.



1 – гравийная обсыпка; 2 – компрессор; 3 – воздухопровод; 4 – смеситель;
5 – перфорация; 6 – водоподъемная труба эрлифта

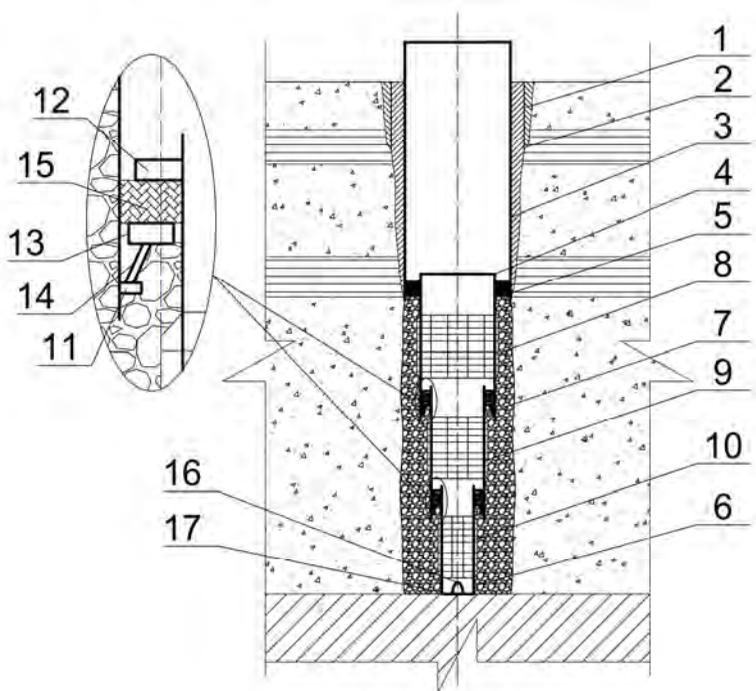
Рисунок 7.6 – Схема удаления гравийной обсыпки с помощью эрлифта с подачей глинистого раствора из приемка в межтрубное пространство

4) После извлечения в скважине остается зацементированный кондуктор, в который опускают долото большого диаметра или расширитель, выбуривают остатки закольматированной обсыпки и устанавливают новую фильтровую колонну, которую обсыпают заново. Капремонт закончен.

7.4 Скважина с телескопическим фильтром

Отличие предлагаемой скважины от типовой, с фильтром, установленным «впотай», заключается в том, что фильтровая колонна выполнена из нескольких фильтровых секций, телескопически соединенных между собой [145]. Это позволяет, при извлечении фильтровой колонны на поверхность для замены, производить поочередное извлечение секций, начиная с нижней, имеющей наименьший диаметр.

Схема водозаборной скважины представлена на рисунке 7.7.



1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3 – эксплуатационная колонна;
 4 – надфильтровая труба; 5 – сальник; 6 – отстойник; 7 – гравийная обсыпка;
 8, 9, 10 – фильтровые секции; 11 – внутренний фланец; 12 – наружный фланец;
 13 – подвижные кольца; 14 – упоры; 15 – кольцевые цилиндры; 16 – захватная
 скоба; 17 – днище

Рисунок 7.7 – Скважина с телескопическим фильтром

Погружение телескопической фильтровой колонны в ствол скважины начинают со спуска отстойника, приваренного снизу к фильтровой секции 10 меньшего диаметра, снабженной наружным фланцем 12, жестко закрепленным в ее верхней части. Фильтровую секцию 10 вместе с отстойником вывешивают на хомуте на устье скважины. На фильтровую секцию 10 под наружный фланец должны быть предварительно надеты: кольцевой цилиндр 15 из эластичного материала и подвижное кольцо 13 с упорами 14, которые будут находиться между наружным фланцем 12 и хомутом (на черте-

же не показан), зажатым на фильтровой секции 10. С помощью грузоподъемной лебедки бурового станка поднимают вертикально вверх фильтровую секцию 9 и надевают ее сверху на верхнюю часть фильтровой секции 10. Фильтровую секцию 9 удерживают навесу так, чтобы ее нижний торец находился ниже подвижного кольца 13 с упорами 14. Затем с помощью сварки жестко закрепляют внутренний фланец 11 к нижней части фильтровой секции 9. Затем включают грузоподъемную лебедку и смещают вверх фильтровую секцию 9. При этом упоры 14 упираются во внутренний фланец 11, кольцо 13 передает давление на кольцевой цилиндр 15 из эластичного материала и деформирует его. Эластичный материал заполняет все неплотности между фильтровыми секциями 9 и 10 и передает тяговое усилие лебедки на фильтровую секцию 10, которая также поднимается вверх. После этого хомут освобождается, его снимают, опускают две телескопически соединенные секции 10 и 9 в открытый ствол и вывешивают их на хомуте на устье скважины. Хомут опирают на эксплуатационную колонну. Затем с помощью грузоподъемной лебедки бурового станка поднимают вертикально вверх фильтровую секцию 8 и одевают сверху на верхнюю часть фильтровой секции 9. Затем все вышеупомянутые операции повторяют в той же последовательности и опускают три телескопически соединенные секции 10, 9 и 8 в открытый ствол и вывешивают их на хомуте на устье скважины.

Приваривают к фильтровой секции 8 надфильтровую трубу, имеющую в верхней части наружную резьбу (обычно левую). Закрепляют к ней с помощью муфты с левой резьбой буровые штанги и опускают всю конструкцию в открытый ствол скважины до забоя. Держат конструкцию на штангах навесу и устраивают гравийную обсыпку, обсыпая гравием фильтровую колонну. Затем вращая штанги вправо, откручивают колонну штанг от надфильтровой трубы и поднимают штанги на поверхность. Прокачивают скважину.

Капитальный ремонт производится следующим образом. Сначала для облегчения извлечения фильтровой колонны в полости фильтра производят импульсы гидродинамического давления, нарушающие сплошность слоев закольматированного гравия, прилегающего к наружной поверхности фильтровых секций. Затем в скважину опускают грузовой крюк, который вводят в зацепление с захватной скобой и посредством лебедки начинают производить

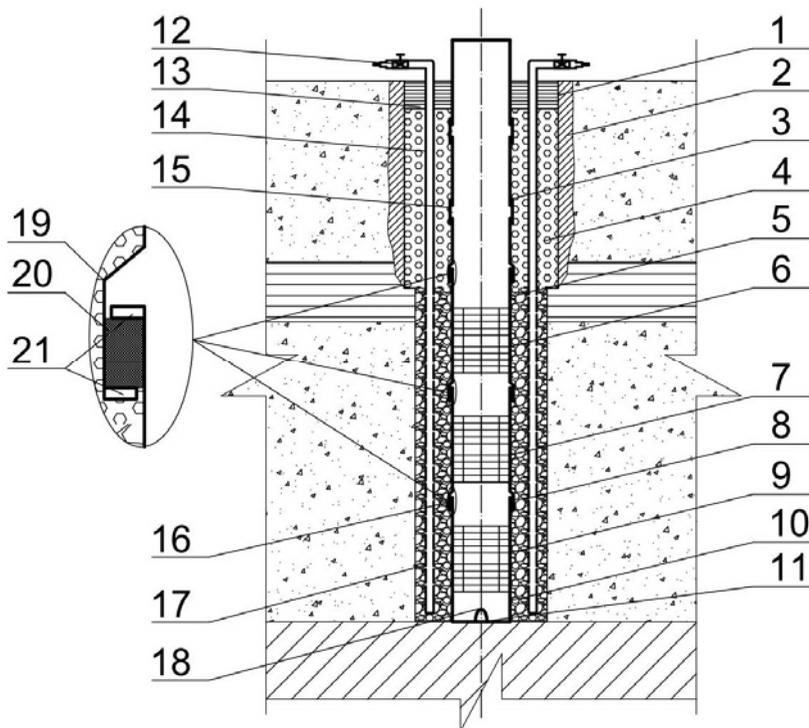
поднятие фильтровой секции 10 меньшего диаметра. За счет подвижного кольца 13 с упорами 14 и возможностью фильтровой секции 10 меньшего диаметра свободно проходить через фильтровые секции 8, 9 большего диаметра и эксплуатационную колонну, производится беспрепятственное извлечение фильтровой секции 10 меньшего диаметра. Затем в образовавшуюся полость погружают эрлифт и производят вымывание гравийной обсыпки. После освобождения фильтровой секции 9 от гравийной обсыпки, производят ее извлечение с помощью захватного устройства типа «груша», или посредством зацепления лебедки за внутренний фланец 11 фильтровой секции 9. Извлечение фильтровой секции 9 также проходит беспрепятственно за счет возможности свободно проходить через фильтровую секцию 8 большего диаметра и эксплуатационную колонну 3. Далее вновь в образовавшуюся полость погружают эрлифт и вымывают остатки гравийной обсыпки на уровне фильтровой секции 8. После освобождения фильтровой секции 8 от гравийной обсыпки производят ее захват за надфильтровую трубу 4 и внутренний фланец 11 и посредством совместного действия тяговых усилий, приложенных к внутреннему фланцу и надфильтровой трубе, производят извлечение последней секции 8 фильтровой колонны.

После посекционного извлечения фильтровой колонны, производят выбуривание старой, загрязненной кольматантом, гравийной обсыпки и промывка скважины, при необходимости также производят замену фильтровых секций и составляющих частей телескопического соединения. Затем, в последовательности описанной ранее, производится сборка и установка фильтровой колонны в проектное положение.

7.5 Скважина с фильтром, состоящим из секций с раструбными соединениями

Отличие предлагаемой скважины от скважины с фильтром на сплошной колонне и затрубной системой регенерации заключается в том, что фильтровая колонна выполнена из нескольких секций, соединенных между собой раструбами, причем на концах раструба и гладкой части секции жестко закреплены упорные кольца, между которыми установлен разжимной сальник, а в нижней части отстойника смонтирована захватная скоба и над гравийной обсыпкой

имеется керамзитовая засыпка с глиняным замком в верхней части [146]. Схема водозаборной скважины показана на рисунке 7.8.



1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3 – эксплуатационная колонна;
 4 – керамзитовая засыпка; 5 – надфильтровая труба; 6, 7, 9 – секции
 фильтровой колонны; 8 – гравийная обсыпка; 10 – тстойник; 11 – днище;
 12 – вентиль; 13 – глиняный замок; 14 – нагнетательные трубки; 15 – муфтовые
 соединения; 16 – раструбное соединение; 17 – перфорация; 18 – захватная скоба;
 19 – раструб; 20 – разжимной сальник; 21 – упорное кольцо

Рисунок 7.8 – Конструкция скважины с раструбными соединениями секций фильтра

Выполнение фильтровой колонны скважины из секций с раструбными соединениями позволяет сделать ее секции подвижными для осевых перемещений. Поэтому перед извлечением всей колонны на поверхность можно сместить поочередно тяговым усилием все секции по отдельности на 10-15см в раструбных соединениях,

разрушить кольматационные связи на границах между водопримемной поверхностью секций и гравийной обсыпкой и снизить общее подъемное усилие на 30-40%.

Производят бурение ствола подкондуктор до кровли водоносного горизонта с выполнением затрубной цементации на всю высоту до устья скважины. Вскрывают водоносный горизонт.

Спуск фильтровой колонны осуществляется посекционно, начиная с нижней секции 9. Соединение секций производится в процессе спуска фильтровой колонны. После установки упорных колец и разжимного сальника хомут закрепляют на вышерасположенную секцию фильтра. Нижняя секция за счет собственного веса деформирует разжимной сальник. Эксплуатационную колонну собирают из труб на муфтовых соединениях и центрируют в стволе с помощью фонарей. После спуска эксплуатационной колонны с фильтром и отстойником, производят спуск 4-х нагнетательных трубок с перфорацией в зоне расположения фильтровой колонны. Затем создают гравийную обсыпку вокруг фильтровой колонны, для чего засыпают гравий. Производят прокачку скважины. После выполнения прокачки производят засыпку керамзитового песка и устройство глиняного замка.

Текущие ремонты скважины осуществляют путем регенерации фильтра с помощью затрубной системы регенерации. Капитальный ремонт скважины проводят путем извлечения эксплуатационной колонны с фильтровой колонной и отстойником. Перед извлечением производят разрушение глиняного замка и вымывание керамзитового песка с помощью струи воды высокого давления (за счет пористости, малой массы и высокой прочности, керамзит под действием струи воды начинает всплывать на поверхность). Затем в нагнетательные трубки подают реагент, который разрыхляет гравийную обсыпку и разрушает кольматационные связи между фильтром и обсыпкой. В скважину опускают грузовой крюк, который вводят в зацепление с захватной скобой и посредством лебедки начинают производить поднятие нижней секции 9 фильтровой колонны. Так как секция не имеет сварных соединений, а используемые раструбные соединения обеспечивают возможность смещения каждой секции на 10-15 см вверх для разрушения кольматационных связей между фильтром и обсыпкой, то смещение нижней секции происходит без разрыва каркаса фильтра. Для смещения последующих

секций применяется захватывающий инструмент, опускаемый внутрь секций. После разрушения кольматационных связей между всеми секциями фильтровой колонны и обсыпкой, а также после освобождения эксплуатационной колонны от керамзитовой засыпки, производят извлечение фильтра целиком с эксплуатационной колонной путем применения тяговых усилий, приложенных к захватывающей скобе и оголовку эксплуатационной колонны. При невозможности произвести извлечение фильтра операции по смещению секций повторяют до тех пор, пока силы трения между фильтровыми секциями и гравийной обсыпкой не уменьшатся до приемлемых значений.

Породоразрушающим инструментом с расширителем разбуривают и удаляют старую загрязненную кольматантом гравийную обсыпку, скважину промывают, производят замену фильтровой колонны, нагнетательных трубок и вновь устанавливают все составляющие скважины в рабочее положение.

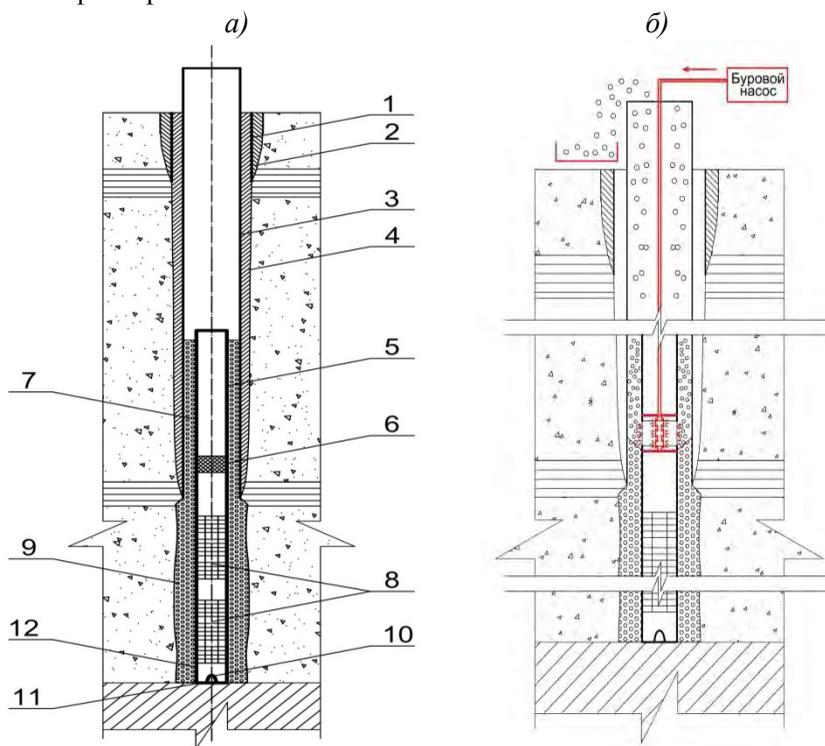
Предлагаемая конструкция скважины позволяет обеспечить не только качественное проведение текущих ремонтов в течение всего периода эксплуатации за счет наличия нагнетательных трубок, но и возможность проведения капитального ремонта с извлечением эксплуатационной и фильтровой колонны.

Применение раструбных соединений в фильтровой колонне позволяет посекционно собирать фильтра большой длины для использования в мощных водоносных горизонтах высокодебитных скважин. Использование керамзитового песка вместо стандартной засыпки из песка позволяет уменьшить горное давление и силы трения за счет меньшей плотности материала, а применение глиняного замка предохраняет скважину от попадания поверхностных вод в эксплуатационный горизонт.

7.6 Скважина с вспомогательным фильтром для удаления гравийной обсыпки надфильтровой трубы

Отличие предлагаемой скважины от типовой заключается в том, что надфильтровая труба дополнительно содержит один или несколько вспомогательных фильтров для удаления при капремонте из межтрубного пространства обсыпки, которая выполнена из керамзитового песка [147]. Во вспомогательный фильтр (рису-

нок 7.9), вмонтированный в нижнюю часть надфильтровой трубы, перед извлечением фильтровой колонны подается под давлением вода, создающая восходящий поток, вымывающий гравийную обсыпку из межтрубного пространства (гравийного сальника). Это позволяет удалить гравийную обсыпку, обжимающую надфильтровую трубу, и таким образом, снизить общее тяговое усилие при извлечении фильтра.



1 – кондуктор; 2, 4 – затрубная цементация; 3 – эксплуатационная колонна;
 5 – надфильтровая труба; 6 – вспомогательный фильтр; 7 – гравийный сальник;
 8 – фильтр; 9 – керамзитовая обсыпка; 10 – захватная скоба; 11 – днище;
 12 – отстойник

Рисунок 7.9 – Водозаборная скважина:

a – конструкция; *б* – схема удаления обсыпки надфильтровой трубы

Капитальный ремонт производится следующим образом. Сначала для облегчения извлечения фильтровой колонны в полости фильтра производят импульсы гидродинамического давления, нарушающие сплошность слоев закольматированного керамзита, прилегающего к наружной поверхности фильтра.

Далее в фильтровую колонну опускают промывочный инструмент (см. рисунок 7.9б), состоящий из буровых штанг, двух пакеров и закрепленной между ними перфорированной трубы. Инструмент устанавливают таким образом, чтобы вспомогательный фильтр находился между двумя пакерами. Нагнетанием воды в перфорированную трубу создают избыточное давление внутри вспомогательного фильтра. За счет создания перепада давления между вспомогательным фильтром и верхом керамзитовой обсыпки надфильтровой трубы, возникает интенсивная восходящая фильтрация воды через столб керамзитовой обсыпки. Под действием гидродинамического давления фильтрационного потока столб керамзитовой обсыпки взвешивается, и создается движение пульпы в сторону устья скважины. Удаляемую обсыпку аккумулируют для вторичного использования. После освобождения надфильтровой трубы от керамзитовой обсыпки, производят спуск промывочного инструмента в фильтровую колонну и по частям производят ее освобождение от керамзитовой обсыпки аналогичным образом.

В скважину опускают буровые штанги с левымпереводником на конце, который навинчивается на надфильтровую трубу. Через буровые штанги под давлением в прифильтровую зону подается вода, которая вымывает оставшийся керамзитовый песок на поверхность. Одновременно к буровым штангам прикладывают тяговое усилие и извлекают фильтровую колонну на поверхность.

Затем разбуривают и удаляют старую загрязненную кольматантом керамзитовую обсыпку. Скважину промывают, производят чистку или замену фильтра на новый и в последовательности, описанной ранее, производят установку фильтровой колонны в рабочее положение.

Применение вспомогательного фильтра в нижней части надфильтровой трубы позволяет существенно увеличить вероятность успешного извлечения фильтровой колонны на поверхность.

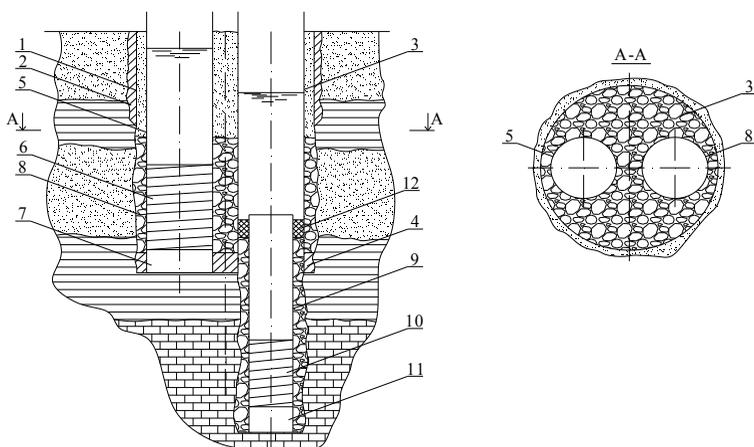
Использование облегченной обсыпки из керамзитового песка вместо стандартной обсыпки из кварцевого песка позволяет уменьшить горизонтальное давление, передаваемое на надфильтровую

колонну, и соответственно силы трения при ее извлечении. Для вымывания керамзитовой обсыпки понадобится вдвое меньший расход воды. Более окатанные зерна керамзитовой гравийной обсыпки будут менее интенсивно коагулировать в процессе эксплуатации скважины, чем зерна кварцевого песка.

7.7 Двухколонная скважина для одновременной эксплуатации двух гидравлически несвязанных водоносных горизонтов

Иногда для обеспечения водой какого-либо крупного объекта или населенного пункта приходится эксплуатировать отдельными скважинами два и более водоносных горизонта, гидравлически не связанные между собой. По гидрогеологическим условиям такие два горизонта нельзя соединять общей фильтровой колонной одной скважины, так как в них могут существовать различные пьезометрические напоры и вода из горизонта с более высоким напором будет разгружаться в горизонт с более низким напором. Кроме этого воды горизонтов могут иметь разный химический состав и различную величину водородного показателя pH , что может привести к химической реакции содержащихся в них компонентов и образованию нерастворимых соединений, коагулирующих принимающий водоносный горизонт.

При большой потребности в воде в санитарной зоне строгого режима (ЗСР) подземного водозабора иногда сооружают две скважины отдельно на каждый из двух водоносных горизонтов, гидравлически не связанных между собой. Бурение двух скважин оправдано, так как в случае бурения одной скважины с двумя фильтрами на два горизонта, вода из горизонта с более высоким напором может через ствол скважины разгружаться в горизонт с более низким напором. В БНТУ предложена конструкция двухколонной скважины для одновременной эксплуатации двух гидравлически несвязанных между собой водоносных горизонтов [148]. Предлагаемая конструкция скважины с двумя эксплуатационными колоннами в одном кондукторе представлена на рисунке 7.10.



1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3 – первая эксплуатационная колонна; 4 – подбашмачная цементация; 5 – вторая эксплуатационная колонна; 6 – фильтр; 7 – отстойник; 8 – гравийная обсыпка; 9 – надфильтровая труба; 10 – фильтр; 11 – отстойник; 12 – сальник

Рисунок 7.10 – Конструкция скважины с двумя эксплуатационными колоннами

Скважина может быть пробурена роторным способом следующим образом. Отрывают отстойник и бурят долотом диаметром 151мм разведочный ствол на проектную глубину. Производят в разведочном стволе геофизические исследования с целью определения глубины залегания и мощности водовмещающих пород двух водоносных горизонтов. После расшифровки каротажных диаграмм устанавливают направляющую колонну, производят бурение ствола подкондуктор большого диаметра, выполняют затрубную цементацию кондуктора на всю его высоту до устья скважины.

После ожидания затвердевания цемента, опустив долото через кондуктор на забой, разбуривают цементную пробку в кондукторе, вскрывают верхний водоносный горизонт, сложенный песками, и нижерасположенный водоупор - глину на нужную глубину (см. рисунок 7.10). Так как бурение производят большим диаметром, его выполняют методом обратной промывки чистой водой.

Опускают в ствол скважины и устанавливают на забой открытую снизу первую эксплуатационную колонну. Вторую эксплуатационную

колонну с приваренным к ней фильтром и отстойником с заваренным снизу доньшком устанавливают на забой рядом с первой. Установив их в стволе скважины, нагнетают цементный раствор под давлением внутрь первой эксплуатационной колонны и выполняют ее подбашмачную цементацию. Высота цементации не должна превышать высоту отстойника. В таком состоянии скважину оставляют на период твердения цемента. Срок твердения цемента для эксплуатационных колонн составляет 48 часов. После этого производят засыпку гравия в пространство между кондуктором и эксплуатационными колоннами с целью создания гравийной обсыпки вокруг фильтра 6. Запас гравия над верхом фильтра 6 должен составлять не менее 5м. Во вторую эксплуатационную колонну опускают эрлифт до днища отстойника и производят освоение верхнего водоносного горизонта, сложенного песками (см. рисунок 7.10) путем пульсирующей прокачки, которую могут сочетать со свабированием. При необходимости гравий досыпают. Сверху на гравий засыпают непромытый песок до устья скважины.

Вскрытие нижнего водоносного горизонта, сложенного песчаниками (см. рисунок 7.10) осуществляют следующим образом. В первую эксплуатационную колонну опускают долото и, разбурив цементный стакан в колонне и вышележащие породы, вскрывают водоносный горизонт, сложенный песчаниками. Затем опускают в ствол фильтровую колонну с надфильтровой трубой 9, фильтром 10 и отстойником 11. При попадании в разрезе водоносного горизонта прослойки песка, выполняют гравийную обсыпку фильтра 10 и устанавливают сальник 12. В фильтр 10 опускают эрлифт и выполняют прокачку скважины.

Скважину снабжают оголовком и оснащают два ствола отдельными глубинными насосами. Это позволяет независимо друг от друга эксплуатировать два гидравлически несвязанных между собой водоносных горизонта.

На рисунке 7.11 показаны конструкции 2-х типовых скважин для забора воды из двух водоносных горизонтов, гидравлически несвязанных между собой, и пример их объединения в одной конструкции двухколонной скважины.

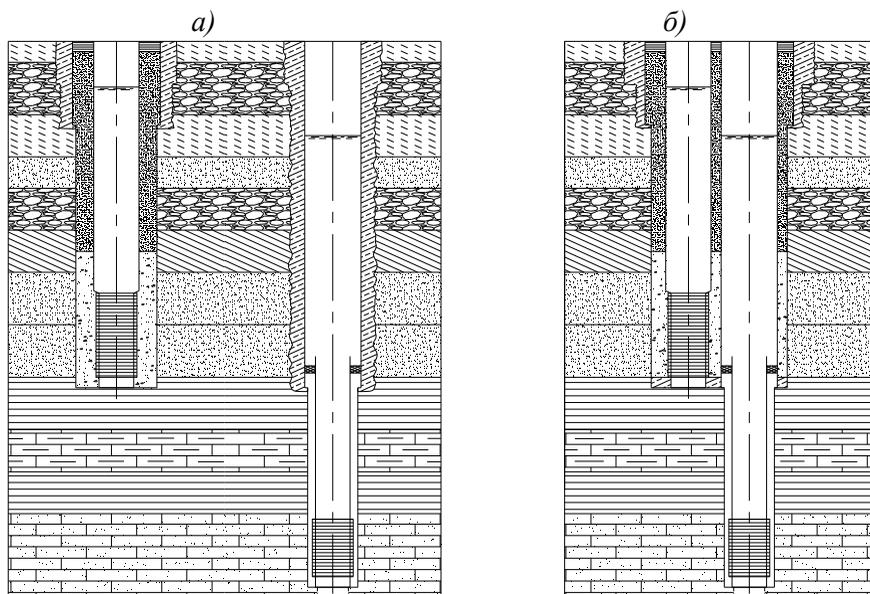


Рисунок 7.11 – Инженерно-геологический разрез и конструкции скважин:
а – две типовые скважины; *б* – двухколонная скважина

Сооружение предлагаемой скважины для забора воды из двух горизонтов, содержащей два ствола внутри одного кондуктора, позволяет расширить функциональные возможности скважины с двумя фильтрами, установленными на одной колонне. Предлагаемая конструкция имеет параллельно размещенные в двух стволах фильтры, что позволяет:

- осуществлять бесперебойную подачу воды потребителю в случае выхода из строя одного из фильтров;
- повысить водозахватную способность верхнего фильтра за счет применения гравийной обсыпки значительной мощности;
- расширить область применения скважин с двумя фильтрами, за счет одновременной эксплуатации двух водоносных горизонтов;
- обеспечить защиту водоносных горизонтов от смешения вод при их перетекании из одного горизонта в другой;
- обеспечить экономию средств по сравнению с сооружением 2-х скважин отдельно на каждый из водоносных горизонтов (один павильон вместо двух, один кондуктор вместо двух и т.д.).

Выводы по главе 7

1. Рассмотрены недостатки и преимущества методов капитального ремонта вышедших из строя скважин. На примере типовой скважины №3Б водозабора «Северный» г. Жодино показано, что перед установкой ремонтного фильтра внутрь вышедшего из строя необходимо проведение декольматации. Посредством газомпульсной обработки удельный дебит скважины удалось увеличить в 2 раза (с 6 до 12 м²/ч). Эта операция необходима, так как после капремонта у скважины с двойным фильтром она неэффективна. Показано, что такой капитальный ремонт возможен только в фильтрах с диаметрами (≥ 200 мм) и является временной мерой, так как дебит скважины и срок ее службы будут существенно снижены.

2. Проверка прочности на разрыв колонны при извлечении фильтра показала, что требуемое подъемное усилие может превышать допустимую растягивающую силу для сварных швов из-за высоких сил трения. В этой связи предложена усовершенствованная конструкция скважины со смещаемым вниз фильтром, признанная изобретением. Конструкция позволяет при выходе фильтра из строя внешними ударными усилиями сместить вниз всю фильтровую колонну внутрь гильзы и далее, при возможности, извлечь ее из скважины тяговым усилием. Из уравнения энергетического баланса для вертикального смещения колонны труб получено выражение для расчета веса ударной части молота и высоты ее падения при капремонте скважины. Предложены формулы для определения величины тягового усилия.

3. Разработаны конструкции ремонтпригодных скважин: со смещаемым вниз фильтром; с керамзитовой засыпкой и выбуриваемой песчаной подушкой под отстойником; с телескопическим фильтром; с фильтром, состоящим из секций с раструбными соединениям; с вспомогательным фильтром для удаления гравийной обсыпки надфильтровой трубы, а также конструкция двухколонной скважины для одновременной эксплуатации двух гидравлически несвязанных водоносных горизонтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа известных конструкций водозаборных скважин и способов их текущего ремонта разработаны новые конструкции высокодебитных скважин с затрубными системами промывки гравийных фильтров: с фильтром, установленным на сплошной колонне; с уширенным контуром гравийной обсыпки (патент №17098); с фильтром, установленным «впотай»; кожуховым фильтром.

2. Предложены формулы для расчета полей пьезометрических напоров в прифильтровой зоне при гидродинамической промывке фильтров скважин с затрубными системами в напорном и безнапорном водоносных пластах, при различном соотношении расходов закачки и откачки, позволяющие определять скорости и градиенты фильтрационного потока в любой точке гравийной обсыпки с постоянной и измененной проницаемостями, напор насосного оборудования для регенерации и обосновывать расходы воды, необходимые для эффективной декольматации скважин. Установлено, что для удаления мелкодисперсного железистого осадка при снижении водопроницаемости обсыпки на 20 – 40 % относительно первоначальной необходимы скорости фильтрационного потока в диапазоне от 11 до 20 мм/с.

3. Получено уравнение, описывающее квазиустановившийся промывной фильтрационный поток, возникающий при затрубной реагентной циркуляционной промывке скважин в безнапорных пластах. Решение уравнения позволяет определить (при равенстве расходов закачки и откачки) понижение уровня в заданной точке прифильтровой зоны и построить гидродинамическую сетку фильтрации, необходимую для подбора насосного оборудования. Для новых скважин в безнапорных пластах приведено обоснование конструктивных параметров затрубной системы промывки и рекомендовано количество циркуляционных трубок от 4 до 6 шт.

4. Разработаны методики расчета продолжительности процесса затрубной реагентной регенерации гравийной обсыпки скважин (для достижения степени декольматации 95-97 %) при периодической и непрерывной подаче раствора реагента в циркуляционные трубки, основанные на полученных зависимостях для расчета изменения удельного объема отложений и концентрации солей в реагенте, позволяющие назначать необходимые режимы регенерации

гравийных фильтров скважин в зависимости от параметров пласта, начальной степени кольматажа и условий подачи реагента. Установлено, что удельный расход соляной кислоты для реагентной регенерации скважин зависит преимущественно от содержания в отложениях химических соединений, включающих Fe, Mn и Ca. Для определения коэффициента K_c , позволяющего рассчитать потребное количество кислоты (по известной массе кольматанта в скважине), получена линейная регрессионная зависимость, основанная на использовании количественных данных о составе отложений, представленных в виде оксидов MnO, CaO и Fe₂O₃.

5. По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологии гидродинамической и реагентной регенерации водозаборных скважин с затрубными системами промывки, обеспечивающие эффективное удаление кольматирующих отложений. Разработана методика определения производительности насосного оборудования установки для регенерации скважин. На водозаборе в д. Узла и на строящейся Полоцкой ГЭС проведен текущий ремонт скважин способом гидродинамической промывки по всей длине фильтра с применением разработанного опытного образца установки для затрубной регенерации. В результате проведенных опытно-промышленных испытаний удельный дебит скважин увеличился в 3,9 раза и на 6,3 % соответственно, что подтвердило эффективность разработанной технологии.

6. Разработан и изготовлен экспериментальный образец гидроэлеватора с регулируемым соплом и размывающим насадком для извлечения песчаных пробок из скважин. Устройство прошло успешные испытания в полевых условиях на водозаборной скважине в д. Узла Мядельского района, что доказало эффективность предложенной технологии ремонта пескующих скважин.

7. Разработанные конструкции скважин с затрубными системами промывки могут использоваться проектными и строительными организациями для модернизации и повышения долговечности водозаборов подземных вод. Новая конструкция скважины включена в ТКП 17.04-21-2010 «Правила проектирования, сооружения (строительства), ликвидации и консервации скважин различного назначения (за исключением нефтяных и газовых)».

8. Разработан и изготовлен прибор для обнаружения мест пескования скважин, который содержит пульт управления и индикатор

мутности воды, перемещаемый в процессе обследования вдоль фильтра в процессе откачки воды из скважины. Прибор прошел лабораторные и полевые испытания на скважине и показал свою работоспособность. Разработана конструкция специального устройства для обследования фильтров скважин, включающего погружной насосный агрегат и прибор для обнаружения мест пескования.

9. Разработаны конструкции ремонтпригодных скважин: со смещаемым вниз фильтром; с керамзитовой засыпкой и выбуриваемой песчаной подушкой под отстойником; с телескопическим фильтром; с фильтром, состоящим из секций с раструбными соединениям; с вспомогательным фильтром для удаления гравийной обсыпки надфильтровой трубы, а также конструкция двухколонной скважины для одновременной эксплуатации двух гидравлически несвязанных водоносных горизонтов.

10. Разработанные технологии регенерации водозаборных скважин с затрубными системами промывки, конструкция гидроэлеватора с регулируемым соплом и размывающим насадком, конструкции ремонтпригодных скважин и технологии их ремонта могут использоваться эксплуатирующими и ремонтными организациями для продления срока службы водозаборов подземных вод, поддержания стабильного режима их работы и уменьшения эксплуатационных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международное десятилетие действий «Вода для жизни». Общие сведения [Электронный ресурс] /ООН - водные ресурсы. – 2013. – Режим доступа: <http://www.un.org/russian/waterforlifedecade>. – Дата доступа: 05.09.2013.
2. Водный кодекс Республики Беларусь[Электронный ресурс]: 15 июля 1998г., №191-3: принят Палатой представителей 18 июня 1998г.:одобр. Советом Респ.29 июня 1998г.: в ред. от 12.03.2013//КонсультантПлюс. Беларусь. ООО «ЮрСпектр», нац. Центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2014.
3. Гуринович, А.Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения. – Минск.: «ТЕХНОПРИНТ», 2001. – 305 с.
4. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 3-е изд. – Москва: Недра, 1985. – 334 с.
5. Ивашечкин, В.В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин / В.В.Ивашечкин: Монография; под ред. А.Д. Гуриновича. – Мн.: БНТУ, 2005. – 270 с.
6. Шейко, А.М. Анализ долговечности водозаборных скважин г. Минска / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин, Н.В. Холодинская, Э.А. Макарова // Вестник БНТУ. – 2006. – № 1. – С. 27–32.
7. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин/ В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1976.– 345 с.
8. Тугай, А.М. Водоснабжение из подземных источников. /Тугай, А.М., Прокопчук, И.Т. Справочник. – Киев.: Урожай, 1990. – 264 с.
9. Плотников, Н.А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н.А. Плотников, В.С. Алексеев.– М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.
10. Башкатов, Д.Н. Бурениескважин на воду/Д.Н.Башкатов,В.Л. Роговой. – М: Колос, 1976. – 208 с.
11. Волоховский, Г.А. Эксплуатация и ремонт систем сельскохозяйственного водоснабжения: Справочник/ Г.А. Волоховский. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 224 с.
12. Проектирование водозаборов подземных вод / А.И. Арцев [и др.]; под.ред. Ф.М. Бочевера. –М.: Стройиздат, 1976. – 291 с.

13. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02) / ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР.- М.: Стройиздат, 1989. – 272 с.

14. Тугай, А.М. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу / А.М. Тугай, О.Я. Олейник, Я.А. Тугай: Монографія. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.

15. Ловля, С.А. Взрывные работы в водозаборных скважинах / С.А. Ловля.– М.: Недра, 1970. – 120 с.

16. Водозаборная скважина: а. с. 1448002SU, МКИ Е ОЗВ 3/18 / В.П. Ткаченко; Гидрологическая экспедиция Министерства мелиорации и водного хозяйства УССР. - № 4235664/29-33; заявл. 24.02.87; опубл. 30.12.88 (не публик).

17. Гуринович, А.Д. Системы питьевого водоснабжения с водозаборными скважинами. Планирование, проектирование, строительство и эксплуатация. – Минск: Технопринт, 2004. – 247 с.

18. Гаврилко, В. М. Фильтры из стеклопластиковых труб / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1966. – № 11. – С. 16–18.

19. Указания по проектированию дренажа подземных гидротехнических сооружений №ВСН-045-72: утв. МЭ и Э, СССР – Москва, 1973.

20. Богомолов, Г.В. Бесфильтровые водозаборные скважины в рыхлых породах (теория и практика устройства) / Г.В. Богомолов, Р.А. Станкевич. – Минск: Наука и техника, 1975. – 152 с.

21. Бочевер, Ф.М., Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения / Ф.М. Бочевер, Н.Н. Веригин – Москва: Госстройиздат, 1961. – 200 с.

22. Дренажно-водозаборная скважина: пат. 2330916С1 Российская Федерация, МПК Е02В11/00, Е03В3/18 / В.Я. Катюхин, И.В. Серебряников, М.Г. Соковых, Е.В. Карачева; заявл. 02.03.2007, опубл. 10.08.2008// Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам -2008.-№22. – 10 с.

23. Фильтр водозаборной скважины: пат. 2130532 Российская Федерация, С1, Е03В3/18/ Г.В. Викторов, Н.С. Кобелев, А.В. Сучков; заявитель Курский госуниверситет. техн. ун-т - №а20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 20/05/1999//Бюл. – 1999. – № 14.

24. Ивашечкин, В. В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения/ В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко,

А.Н. Кондратович: Монография; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 276 с.

25. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении: пат. 9453 Респ. Беларусь, МПКС1, E21B43/00, B03B 03/00 /В.В. Ивашечкин, А.Н.Кондратович, И.А. Герасименко, Н.И. Крук, И.В. Рытько; заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т - №а20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 30/06/2005//Афіцыйны бюл./цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 110.

26. Ивашечкин, В. В. Теоретические и технологические основы регенерации водозаборных скважин циркуляционными и газоимпульсными методами: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.04/ В.В. Ивашечкин. – Минск, 2011. – 314 с.

27. Ивашечкин, В.В. Сооружение и ремонт водозаборной скважины с системой циркуляционной регенерации / В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко // Энергетика – Изв. высш. учеб.заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. –№ 4. – С. 64 – 73.

28. Милихикер, А.Г. Осадкообразование в скважинах водопонижения. – М.: «Энергия», 1971. – 103 с.

29. Романенко, В.А. Восстановление производительности водозаборных скважин/ В.А. Романенко, Э.М. Вольницкая. – Л.: Недра, 1986. – 112 с.

30. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде/ К.А.Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

31. Ивашечкин, В.В. Физические основы регенерации водозаборных скважин импульсными методами/ В.В.Ивашечкин, А.Н. Кондратович, А.Д. Гуринович // «Мир технологий».– 2002. – №2. – С.60 – 64.

32. Андреев, К.Н. Пневморегентная регенерация скважин на воду: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / К.Н. Андреев. – Москва, 1990. – 23 с.

33. Склянский, В.Г.Временная инструкция по применению пневмовзрыва для увеличения производительности скважин на воду / В. Г. Склянский - Баку, АЗНИИ водных проблем, 1975. – 43 с.

34. Балашканд, М.И. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях/ М.И. Балашканд, С.А. Ловля. – М.: Недра, 1977. – 150 с.

35. Щеголев, Е.Ю. Регенерация водозаборных скважин импульсными методами: дисс.... канд. техн. наук/ Е.Ю. Щеголев.– М., 1987. – 140 с.

36. Устройство для промывки фильтра и прифильтровой зоны водяной скважины: а.с. 815175 СССР, МКИ Е 03В 3/15 /Л.Ф. Петрашин, Н.П. Школьный, Н.И. Губина, А.П. Панченко; Ивано-Франковский ин-т нефти и газа. – № 2472876; заявл. 27.03.79; опубл. 23.03.81 / Бюлл. № 11. – 1981.

37. Ивашечкин, В. В. Гидродинамика подводного газового взрыва в закольматированной водозаборной скважине / В. В. Ивашечкин, П.А. Автушко, А.И. Бловацкая, Е.И. Евсюкова // Наука – образованию, производству: материалы 6-ой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2008 г.: в 2 т. / БНТУ. – Минск, 2008. – Т. 2. – С. 12.

38. Романенко, В. А. Исследования способа очистки фильтров водозаборных скважин взрывом ацетилено-воздушной смеси / В. А. Романенко, Н. С. Соловьёва / Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1979 – № 12. – С. 101–104.

39. Способ регенерации водозаборной скважины: а.с. 1768722 СССР. /А.Д. Гуринович, В.Н. Ануфриев, В.В. Ивашечкин: Белор. политех. инс-т.– 4426835/33; заявл. 31.07.89; опубл. 15.10.92.– Открытия. Изобрет.– 1992.– №38.

40. Устройство для регенерации фильтров скважин: а.с. 1512194 А1 СССР; МКИ Е03В3/15, Е21В 37/00 /А.Д. Гуринович, В.В. Ивашечкин, В.Н. Ануфриев, Б.В. Сабадах и Л.С. Ивашечкина; Белор. Политехн. инс-т – №4320394/23-33; заявл. 27.10.87; непублик.

41. Башкатов, Д.Н. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д.Н. Башкатов [и др.]. – Москва: Недра, 1988. – 268 с.

42. Аксельруд, Г.А. Растворение твердых веществ / Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов. – Москва.: «Химия», 1977. – 272 с.

43. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А.Франк-Каменецкий. –2-е изд.– Москва.: «Наука», 1967. – 491 с.

44. Морозов, Э.А. Справочник по эксплуатации и ремонту водозаборных скважин Э.А. Морозов, А.В. Стецюк. – Киев: Будівельник, 1984. – 96 с.

45. Алексеев, В.С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 239 с.

46. Алексеев, В.С. Технология реагентной регенерации скважин на воду / В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников. – Москва: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1985. – 72 с. – (Обзорная информация / М-во мелиорации и вод. хоз-ва СССР, обводнение и сельхоз. водоснабжение).

47. Рекомендации по импульсно-реагентному восстановлению производительности скважин. – Москва: ВНИИ «ВОДГЕО», 1982. – 92 с.

48. Method and apparatus for cleansing well liner and adjacent formation: pat. 3945436 USA, Int Cl. E21B 33/124; E21B 33/127; E21B 43/24 / R. Nebolsine; New York. – № 539,111; filed 7.01.1975; pub. 23.03.1976.

49. Analysis of Development Methods for Gravel Envelope Wells[Electronic resource] / Roscoe Moss Company. – 2013. – Mode of access: <http://www.roscoemoss.com/technical-methods.html> – Date of access: 10.09.2013.

50. Untersuchungen zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung, Dresden, Juli 2003 J. / Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V.: F. Börner (Geschäftsfürer DGFZ e. V.). – Dresden, 2003. – 108 s.

51. Houben, G. Regenerierung und sanierung von Brunnen / G. Houben, C. Treskatis. – Munchen: Oldenbourg industrier, 2003. – 280 s.

52. Устройство для реагентной обработки скважин на воду: а. с. 1597423SU, Е ОЗВ 3/15 / В.Т. Гребенников, В. Е. Воропанов, Ю.А. Качура, К.Г. Иванищев, В.А. Попов; Всесоюзный НИИ ВОДГЕО. - № 4348781/23-33; заявл. 25.12.87; опубл. 07.10.90 // Производ.-издательский комбинат «Патент». – 1990.

53. Устройство для реагентной разглинизации скважины: а. с. 1719564SU, Е ОЗВ 3/15 / В.Т. Гребенников, Б.С. Краковский; Всесоюзный НИИ ВОДГЕО. - № 4792427/23; заявл. 14.02.90; опубл. 15.03.92 // Производ.-издательский комбинат «Патент». – 1992.

54. Устройство для циркуляционной обработки скважины на воду: пат. 2209893RU, Е ОЗ В 3/18, Е 21 В 43/08, В 01 D29/62, 35/16 / Г. В. Виктор; заявитель Курский гос. техн. ун-т. - № 2001129842/03; заявл. 05.11.2001; опубл. 10.08.2003 // Официальный бюл. Научно-исслед. отделение по подготовке офиц. изд. Федерального ин-та пром-ной соб-ти. – 2003.

55. Устройство для циркуляционной обработки скважин: а. с. 1733578SU, Е ОЗВ 3/15 / П. В. Тарабарин, Р.С. Яремийчук, С.Н. Мизин, Я.М. Перепелицкий, В.М. Хорьков; Научно-техн. производ. Кооператив «Контракт». - № 4797512/29; заявл. 10.01.90; опубл. 15.05.92 // Производ.-издательский комбинат «Патент». – 1992.

56. Устройство для реагентной обработки скважин: а. с. 1654473SU, Е ОЗВ 3/15 / К. Г. Иванищев, В. Е. Воропанов, В. А Попов; Всесоюзный НИИ ВОДГЕО. - № 447788/33; заявл. 24.08.88; опубл. 07.06.91 // Производ.-издательский комбинат «Патент». – 1991.

57. Тесля, В.Г. Циркуляционная регенерация скважин и пласта: дис. канд. техн. наук: 04.00.06 / В.Г. Тесля. – Москва, 1986. – 144 с.

58. Шейко, А.М. Циркуляционно-реагентная регенерация скважин на воду: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04, 05.23.16 / А.М. Шейко. – Минск, 2008. –135 с.

59. Устройство для реагентной обработки скважины на воду: пат. 16996 Респ. Беларусь, МПКС1, Е03В3/15, В03В 03/00 /П.А. Автушко, В.В. Ивашечкин, А.В. Автушко; заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - №а20101725; заявл. 01.12.2010//Афіцыйны бюл. №2 / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – №2.

60. Цейтлин, М. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах / М.Г. Цейтлин, В.В. Верстов, Г.Г. Азбель: – Л.: Стройиздат, Ленингр. Отделение, – 1987. – 262 с.

61. Башкатов, А. Д.Прогрессивные технологии сооружения скважин /А.Д. Башкатов. – Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 554 с.

62. Устройство для тампонирувания поврежденного участка обсадной трубы или фильтра водозаборной скважины: пат. 18849 Респ. Беларусь, МПКС2 Е21В29/00, Е21В33/00 В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко; заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - №а20111723; заявл. 13.12.2011// афіцыйны бюл. №6 / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – №6.

63. Басарыгин, Ю.М.Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации: справочное пособие: в 6 т. / редкол.: Ю.М. Басарыгин [и др.]. – Москва: Недра, 2003. – Т. 4. – 431 с.

64. Устройство для обследования водозаборной скважины: пат. 18713 Респ. Беларусь, МПКС2, Е21В47/00/ В. В. Ивашечкин, П.А. Автушко; заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - №а20111722; заявл.

13.12.2011// афіцыйны бюл. №5 / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – №5.

65. Съюмен, Д. Справочник по контролю и борьбе с пескопроявлениями в скважинах / Д. Съюмен, Р. Эллис, Р. Снайдер; пер. с англ./ пер. и ред. М.А. Цайгера. – Москва: Недра, 1986. – 176 с.

66. Сафонов, А. Н. Буровое дело / А. Н. Сафонов, В. Г. Ильин, Г.М. Красношеков. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 176 с.

67. Ивашечкин, В. В. Лабораторные испытания гидроэлеватора для извлечения песчаных пробок из скважин / В. В. Ивашечкин, П.А. Автушко, А.Н. Курч, А.А. Антипова, Н.А. Рудьман, Ю.А. Бобкова // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т., Минск, 2013 г. / БНТУ. – Минск, 2013. – Т. 2., – С. 109.

68. Ивашечкин, В.В. Натурные испытания гидроэлеватора для извлечения песчаных пробок из скважин / В. В. Ивашечкин, П.А. Автушко, А.Н. Кондратович, А.И. Притыка, Ю. С. Машук, А.Н. Курч // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т., Минск, 2014 г. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2014. – Т. 1., – С. 128.

69. Аксельруд, Г.А. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость/ Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. - Л.: Химия, 1974. –256 с.

70. Веригин, Н.Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах/Н.Н. Веригин //Растворение и выщелачивание горных пород. Сер. Инженерная гидрогеология, – М.,1957. – С. 84-113.

71. Орадovская, А.Е. Фильтрационное выщелачивание дисперсно-распределенного гипса из песчано-глинистых пород/А.Е. Орадovская //Растворение и выщелачивание горных пород. Сер. Инженерная гидрогеология. – М., 1957. – С.46-83.

72. Ивашечкин, В.В. Повышение долговечности водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-ой Междунар. науч.- практ. конф., Минск, 2009 г.: в 2 т. / БНТУ. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 12.

73. Ивашечкин, В.В. Энергосберегающая конструкция водозаборной скважины/ В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко, Д.М. Коледюк // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 8-ой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2010 г.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – Т.2. – С. 130.

74. Ивашечкин, В.В. Модернизация водозаборов подземных вод путем бурения долговечных энергосберегающих скважин новой конструкции /В. В. Ивашечкин, П.А. Автушко // Стратегические проблемы охраны и использования водных ресурсов: матер. 4-ого Международ. Водного форума, Минск, 12 - 13 октября 2010 / Минприроды Республики Беларусь [и др.]. – Минск, 2010. – С. 148 – 152.

75. Ивашечкин, В.В. Технология сооружения водозаборных скважин с затрубными системами реагентной промывки/В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко, А.Н. Кондратович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Международ. науч.-практ. конф., Минск, 2012 г.: в 4 т. / БНТУ. – Минск, 2012. – Т. 2., – С. 170.

76. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении: пат. 17098 Респ. Беларусь, МПКС1, Е21В43/00/ В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко; заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - №а20101726; заявл. 01.12.2010, опубл. 26/12/2012//афшыйны бюл. №2 / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – №2.

77. Фильтр водозаборной скважины: пат. 20486 Респ. Беларусь, МПКС1, Е04В3/18/ В. В. Ивашечкин, А. И. Притыка, П.А. Автушко; заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - №а20130387; заявл. 28.03.2013, зарег. 29/06/2016 в гос. реестре.

78. Ивашечкин, В.В. Долговечные скважины со встроенными системами зафилтровой регенерации/ В.В.Ивашечкин// "Водоснабжение и санитарная техника" №12, Москва, 2014, с. 25-32.

79. Ивашечкин, В.В. Исследование установившегося движения жидкости в прифилтровой зоне скважины при ее регенерации с помощью трубчатой зафилтровой системы промывки/ В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко, А.М. Шейко // Энергетика – Изв. высш. учеб.заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013.– №5.– С. 85 – 94.

80. Автушко, П.А. Гидродинамическая промывка прифилтровой зоны водозаборной скважины, оборудованной затрубной системой циркуляционной регенерации/ П.А. Автушко, В.В. Ивашечкин // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов VII международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов)., Минск, 4-5 апреля 2013.: – в 2 ч./КИИ. – Минск, 2013. – Ч.1., с. 120.

81. Ивашечкин, В.В. Циркуляционная регенерация водозаборной скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки/

В. В. Ивашечкин, П.А. Автушко // Мелиорация. – 2010. – № 1(63). – С. 70 – 77.

82. Аренс, В.Ж. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых / В. Ж. Аренс, А. М. Гайдин. – Москва: Недра, 1978. – 215 с.

83. Автушко, П.В. Технологии гидродинамической и реагентной регенерации водозаборных скважин с затрубными системами промывки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / П.В. Автушко. – Минск, 2015. – 31 с.

84. Николадзе, Г.И. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения: учебн. Пособие - 2-е изд., перераб. и доп./ Г.И. Николадзе, Д.М. Минц, А.А. Кастальский// Москва: Высшая школа, 1984. – 215 с.

85. Абрамов, С.К. Водозаборы подземных вод / С.К.Абрамов, Н.Н. Биндеман, М.П. Семенов. – Москва: Стройиздат, 1947. – 228 с.

86. Ивашечкин, В.В. Моделирование процесса реагентной регенерации скважин, оборудованных затрубными системами промывки/ В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко, В.В. Верременюк, // Энергетика. – 2013. – №6 – С. 80 – 87.

87. Минц, Д.М. Гидравлика зернистых материалов/Д.М. Минц, С.А. Шуберт. – М.: МКХ РСФСР, 1955. – 111 с.

88. Алексеев, В.С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах В.С. Алексеев, Г.М. Коммунар, Б.С. Шержуков// Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер.гидрогеология и инженерная геология, – Москва,1989. – т.11, 144 с.

89. Ивашечкин, В.В. Расчет технологических параметров затрубной реагентной циркуляционной промывки гравийных фильтров водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, В.В. Верременюк, П.А. Автушко // Энергетика – Изв. высш. учеб.заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 6. – С. 83 – 93.

90. Алексеев, В. С. Подбор количества реагента для регенерации скважин/ В. С. Алексеев, Г.М. Коммунар, В.Т. Гребенников // Сб. науч. тр. / НИИ ВОДГЕО. – Москва, 1977. – Вып. 63: Гидрогеология. – С. 117–124.

91. Ивашечкин, В.В. Методика расчета удельных затрат кислотных реагентов для регенерации фильтров водозаборных скважин/ В.В. Ивашечкин, Э.А. Макарова, А.Н. Кондратович// Энергетика. - 2007. -№6 – С. 78-85.

92. Демиденко, Е.З. Линейная и нелинейная регрессия / Е.З. Демиденко. – Москва: Финансы и статистика, 1981. – 304 с.

93. Автушко, П. А. Расчет количества реагента для восстановления производительности скважин на воду/ П. А. Автушко, В.В. Ивашечкин, В.В. Веремеинок //Мелиорация. – 2014. – № 1, С. 164–170.

94. Ансберг, А. В. Практикум по общей гидрогеологии/ А.В. Ансберг, В.П. Боровицкий, Ш.Ф. Бутц и др.; под общей редакцией В.С. Самариной. – Л.: Изд. ЛОЛГУ, 1965. – 230 с.

95. Ивашечкин, В.В. Кинетика растворения отложений методом «реагентной ванны» в скважинах, оборудованных затрубными системами промывки / В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко // Наука – образованию, производству: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т., Минск, 2013 г. / БНТУ. – Минск, 2013. – Т. 2., – С. 110.

96. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов – 4-е изд., доп. и перераб. / Р.Р. Чугаев. – Л.: «Энергия», 1982. – 672 с.

97. Гордеев, В.П. Руководство к практическим занятиям по гидрогеологии / В.П. Гордеев, В.А. Шемелина, О.К. Шулякова. – М.: Высшая школа, 1981. – 152 с.

98. Ивашечкин, В.В. Экспериментальные исследования скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки / В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко, Д. М. Коледюк // Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 80 – 87.

99. Обработка результатов измерений физических величин: учеб.пособие для лабораторного практикума по общей физике / С.А. Фокин [и др.]; под общ. ред. С.А. Фокина. – СПб: РГГМУ, 1999. – 60 с.

100. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений: ГОСТ 8.207-76. – Введ. 01.01.77. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 7 с.

101. Железняков, Г.В. Гидротехнические сооружения (справочник проектировщика)/Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-Заде, П.Л. Иванов и др.; под общей редакцией В.П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

102. Жиленков, В.Н. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость (П 12-83) / В. Н. Жиленков, - ЛЕНИНГРАД:ВНИИГ, 1983.

103. Мелентьев, В.А. Песчаные и гравелистые грунты намывных плотин / В.А. Мелентьев. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 163 с.

104. Ивашечкин, В.В. Экспериментальные исследования гидродинамической промывки фильтров скважин с затрубными системами регенерации/ В.В.Ивашечкин, - «Мелиорация» №2 (74), Минск, 2015, с. 48-57.

105. Панасенко, В. А. Гидрохимические особенности зоны активного водообмена территории Белорусской ССР в связи с оптимизацией эксплуатационных режимов водозаборных скважин: дис. ... канд. геол.-минер. наук: 04.00.06 / В. А. Панасенко. – Минск, 1986. – 173 с.

106. Автушко, П.А. Артезианские скважины с повышенным сроком службы / П.А. Автушко, В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович // Вода. – Минск, 2014. – №1 (196). – С. 2 – 4.

107. Романенко, В.А. Электрофизические способы восстановления производительности водозаборных скважин/ В.А.Романенко.– Л.: Недра, 1980. – 79 с.

108. Автушко, П.А. Технология текущего ремонта скважин, обрудованных затрубными системами промывки/ П.А. Автушко, В.В. Ивашечкин //Перспективные разработки науки и техники: матер. XI Междунар. научно-практической конференции, Перемишль (Польша), 07-15 ноября 2013 / Nauka I studia, 2013. – С. 44 – 47.

109. Примеры расчетов по гидравлике / А.Д. Альтшуль [и др.] ; под общ.ред. А. Д. Альтшуля. – Москва: Стройиздат, 1977. – 256 с.

110. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев [и др.] 4-е изд. - Москва: Энергия, 1972. – 312 с.

111. Козорез, А.С. Агрегаты электронасосные скважинные для воды. Каталог / А.С. Козорез, З.И. Гринцевич, В.З. Гринцевич. – Мн.: 2006. – 80 с.

112. Козорез, А.С. Погружные скважинные электронасосные агрегаты. Эксплуатация и технический сервис / А.С. Козорез, В.С. Ивашко. – Мн.: «Институт энергетики», 2006. – 186 с.

113. Автушко, П.А. Циркуляционная регенерация дренажных скважин, оснащенных затрубной системой реагентной промывки/ П.А. Автушко, В.В. Ивашечкин, В.В. Веремениук // Гидротехническое строительство. – 2013. – №5. – С. 45 – 51.

114. Богомолов, А.И. Гидравлика – 2-е изд., доп. и перераб. / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – Москва: Стройиздат, 1972. – 648 с.

115. Автушко, П. А. Циркуляционная регенерация дренажной скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки / П. А. Автушко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-ой Междунар. науч.-практ. конф., Минск 2012 г.: в 4 т. / БНТУ. – Минск, 2012. – Т. 2., – С. 171.

116. Шейко, А.М. Циркуляционно-реагентная регенерация скважин на воду: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04, 05.23.16 / А.М. Шейко. – Минск, 2008. –22с.

117. Автушко, П.А. Теоретические исследования кинетики растворения кольматирующих отложений при затрубной циркуляционной регенерации скважин/ П. А. Автушко, В. В. Ивашечкин, Ю. С. Машук, А.Н. Курч // Наука – образованию, производству: материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т., Минск, 2014 г. / БНТУ. – Минск, 2014. – Т. 1., – С. 134.

118. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы: учебное пособие для вузов / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – Москва: Стройиздат, 1990. – 336 с.

119. Кривченко, Г.И. Гидравлические машины: Турбины и насосы: учебное пособие для вузов / Г.И. Кривченко. – Москва: Энергия, 1978. – 320 с.

120. СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов.

121. ТКП 45-5.01-237-2011. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Подпорные стены и крепления котлованов. Правила проектирования и устройства». – Минск: Минстройархитектуры. – 2011.

122. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов: учебное пособие / под ред. Г.Г. Круглова. – Мн.: БНТУ, 2006. – 584 с.

123. Суреньянец, С.Я. Эксплуатация водяных скважин / С.Я. Суреньянец. – М.: Стройиздат, 1976. – 128 с.: ил.

124. Сьюмен, Д. Справочник по контролю и борьбе с пескопроявлениями в скважинах / Д. Сьюмен, Р. Эллис, Р. Снайдер.: Пер. с англ. / Пер. и ред. М.А. Цайгера. – М.: Недра, 1986. – 176 с.

125. Лерман, С.Н. Справочник по бурению, борудованию, эксплуатации и ремонту артезианских скважин / С.Н. Петров.– К.: Будивельник, 1974. – 148 с.

126. Башкатов, А.Д. Предупреждение пескования скважин / А.Д. Башкатов. – М.: Недра, 1991. – 176 с.: ил.

127. Чалищев, А.М. Устройство буровых скважин для водоснабжения / А.М. Чалищев. – М.: Госстройиздат, 1976. – 195 с.

128. Башкатов, Д.И. Справочник по бурению скважин на воду/ Д.И. Башкатов, С.С. Сулакшин, С.Л. Драхлис, Г.П. Квашнин. – М.: Недра, 1979. – 560 с.

129. Тугай, А.М. Эксплуатация и ремонт систем артезианского водоснабжения / А.М. Тугай, И.Т. Прокопчук. – К.: Будивельник, 1988. – 176 с.

130. Авторское свидетельство СССР №1173076. А. М.Кл.4 F04F 5/00. Гидроэлеватор. / В.А. Романов, Н.А.Богомоллов (СССР) - Заявка №3688731/25-06; Заявлено 06.01. 1984;Опубл. 15.08.1985, Бюл. №30 // Открытия. Изобретения. – 1985. - №30.

131. Ивашечкин, В.В. Расчет гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок / В.В. Ивашечкин. – Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Том 59, №1 – С. 79–90.

132. Каменев, П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. Москва: Стройиздат, 1964. – 403 с.

133. Соколов, Е.А. Струйные аппараты/ Е.А. Соколов, Н.М. Зингер. - 2-е изд. – Москва: Энергия, 1970. – 288 с.

134. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. - 2-е изд. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.

135. Сизов, Г.Н. Гидравлические расчеты специальных систем речных танкеров/ Г. Н. Сизов. – Ленинград: Судостроение, 1976.– 288 с.

136. Лямаев, Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки/ Б.Ф. Лямаев. – Ленинград: Машиностроение, 1988. – 268 с.

137. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб/ Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев.- 6-е изд. – Москва: Стройиздат, 1984. – 116 с.

138. Алексеев, В.С. Учебная книга мастера по ремонту скважин на воду / В.С. Алексеев, Г.А. Волоховский, В.Т. Гребенников. – М.: Колос, 1983. – 255 с.: ил.

139. Водозаборная скважина: патент №19304 (ВУ) Респ. Беларусь, МПКС1 E21B43/00, E03B3/00/ Ивашечкин В.В., Автушко П.А., Шейко А.М. заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - №а20120856; заявл. 31.05.2012// Афіцыйны бюл. №6 / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015.

140. Кочетов, В.Т. Сопротивление материалов / В.Т. Кочетов, А.Д. Павленко, М.В. Кочетов. – Ростов на Дону: Феникс, 2001. – 366 с.

141. Проектирование и устройство буронабивных свай: пособие к строительным нормам РБ. П13-01 к СНБ 5.01.01-99. – Минск: Минстройархитектуры. – 2002. – 43 с.

142. Новожилов Г.Ф. Бездефектное погружение свай в талых и вечномерзлых грунтах. – Л.: Стройиздат, 1987. – 112 с.

143. Васенин, В.А. Оценка параметров колебаний грунта при ударном погружении свай. Основные следствия// Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – № 7. – С. 210 – 224.

144. СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты».

145. Водозаборная скважина: Заявка на патент №201501112 (ВУ) Респ. Беларусь, МПКС1 E21B43/00, E03B3/00/ Ивашечкин В.В., Магарян М.П. заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. заявл. 27.10.2015.

146. Конструкция водозаборной скважины: Заявка на патент №20150113 (ВУ) Респ. Беларусь, МПКС1 E21B43/01, E03B3/01/ Ивашечкин В.В., Магарян М.П. заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т. - заявл. 27.10.2015.

147. Конструкция водозаборной скважины: Заявка на патент №20160213 (ВУ) Респ. Беларусь, МПКС1 E21B43/00, E03B3/00/ Ивашечкин В.В., Магарян М.П.заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т.; заявл. 7.06.2015.

148. «Конструкция водозаборной скважины»: Заявка на патент №а20140396 (ВУ) Респ. Беларусь, МПКС1 E21B43/00, E03B3/00/ Ивашечкин В. В., Ивашечкин А. В., Иванова И. Е., Машук Ю. С., Доморацкий А. С., Корсюк А. Л.,заявитель Белор. Нац. Техн. ун-т.; заявл. 16.07.2014.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ РЕМОНТА ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН.....	5
1.1 Анализ конструкций скважин с оценкой их ремонтопригодности и долговечности.....	5
1.1.1 Скважины типовых конструкций.....	5
1.1.2 Скважины с затрубной регенерацией	10
1.2 Краткий обзор методов регенерации типовых скважин.....	13
1.2.1 Импульсный метод	16
1.2.2 Реагентный и комбинированный методы	19
1.3 Предотвращение пескования скважин.....	23
1.4 Методы расчета реагентного воздействия на кольматирующие отложения.....	25
1.5 Пути повышения долговечности скважин.....	29
Выводы по главе 1.....	31
ГЛАВА 2. СКВАЖИНЫ С ЗАТРУБНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРОМЫВКИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОМЫВНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА.....	33
2.1 Новые конструкции ремонтнопригодных скважин с затрубными системами промывки	33
2.2 Гидродинамическая промывка скважин	40
2.3 Циркуляционная реагентная промывка скважин, пробуренных в напорных водоносных пластах.....	50
2.4 Исследование циркуляционной реагентной регенерации скважин, пробуренных в безнапорных пластах.....	54
Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ КОЛЬМАТИРУЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ С ЗАТРУБНОЙ СИСТЕМОЙ ПРОМЫВКИ.....	61
3.1 Исследование процесса регенерации скважин способом позапных закачек реагента	61
3.2 Исследование процесса регенерации скважин способом циркуляционной реагентной промывки.....	68
3.3 Расчет количества реагента для восстановления дебита скважин	77

Выводы по главе 3.....	83
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОДИКИ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	85
4.1 Оборудование, методики и оценка точности измерений при исследовании параметров фильтрационного потока.....	85
4.2 Лабораторные исследования гидродинамики фильтрационного потока в напорном и безнапорном пластах....	88
4.3 Лабораторные исследования суффозионных характеристик гравийной обсыпки.....	95
4.4 Лабораторные исследования процесса затрубной циркуляционной реагентной промывки.....	102
4.5 Натурные испытания затрубной системы регенерации	107
Выводы по главе 4.....	110
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ И РЕАГЕНТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН С ЗАТРУБНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРОМЫВКИ.....	112
5.1 Основные способы затрубной регенерации скважин.....	112
5.2 Обоснование технологических схем затрубной регенерации.....	115
5.3 Технологические основы затрубной гидродинамической регенерации.....	119
5.4 Технологические основы затрубной реагентной регенерации.....	126
5.4.1 Способ поэтапных закачек реагента	128
5.4.2 Способ циркуляционной промывки.....	129
5.5 Опыт сооружения скважин с затрубными системами промывки и отработка технологий их текущего ремонта	131
5.5.1 Скважины в д. Узла Мядельского района и п. Ждановичи Минского района.....	131
5.5.2 Скважина системы глубинного водопонижения Полоцкой ГЭС	133
5.5.3 Оработка технологии гидродинамической промывки скважин в натуральных условиях	135
Выводы по главе 5.....	150
ГЛАВА 6. ОБСЛЕДОВАНИЕ И РЕМОНТ ПЕСКУЮЩИХ СКВАЖИН	152

6.1 Гидроэлеваторная установка для удаления песчаных пробок	152
6.1.1 Методика расчета	152
6.1.2 Лабораторные испытания гидроэлеватора.....	164
6.1.3 Полевые испытания гидроэлеваторной установки....	167
6.2 Совершенствование методов обследования и ремонта дефектов пескующих скважин	171
Выводы по главе 6.....	178
ГЛАВА 7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН И МЕТОДОВ ИХ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА	
180	
7.1 Опыт капитального ремонт скважины с установкой ремонтного фильтра внутрь вышедшего из строя	180
7.2 Скважина со смещаемым вниз фильтром.....	184
7.3 Скважины с керамзитовой засыпкой и выбуриваемой песчаной подушкой под отстойником	192
7.4 Скважина с телескопическим фильтром.....	195
7.5 Скважина с фильтром, состоящим из секций с раструбными соединениями.....	198
7.6 Скважина с вспомогательным фильтром для удаления гравийной обсыпки надфильтровой трубы.....	201
7.7 Двухколонная скважина для одновременной эксплуатации двух гидравлически несвязанных водоносных горизонтов.....	204
Выводы по главе 7.....	208
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	209
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	212

Научное издание

ИВАШЕЧКИН Владимир Васильевич
АВТУШКО Павел Александрович

**РЕМОНТОПРИГОДНЫЕ
ВОДОЗАБОРНЫЕ СКВАЖИНЫ**

Подписано в печать 09.12.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,31. Уч.-изд. л. 10,41. Тираж 100. Заказ 992.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.