

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 628.112.24

МЕДВЕДЕВА
Юлия Александровна

**ДВУХКОЛОННЫЕ ДВУХФИЛЬТРОВЫЕ
ВОДОЗАБОРНЫЕ СКВАЖИНЫ
И МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ДЕБИТА**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

Минск, 2024

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный
руководитель

ИВАШЕЧКИН Владимир Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Гидротехническое
и энергетическое строительство, водный
транспорт и гидравлика», Белорусский
национальный технический университет

Официальные оппоненты:

КИТИКОВ Вадим Олегович,
доктор технических наук, профессор, дирек-
тор Института жилищно-коммунального
хозяйства Национальной академии наук
Беларуси;

МИТРАХОВИЧ Александр Иванович,
кандидат технических наук, доцент, веду-
щий научный сотрудник РУП «Институт
мелиорации»

Оппонирующая организация

УО «Белорусский государственный универ-
ситет транспорта»

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 15⁰⁰ на заседании совета по защите дис-
сертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по
адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого
секретаря (017) 293-93-52, e-mail: tg_v_fes@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национально-
го технического университета.

Автореферат разослан « » мая 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор



П. И. Дячек

© Медведева Ю. А., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Хозяйственно-питьевое водоснабжение Республики Беларусь основано на подземных водах, для добычи которых в стране эксплуатируется более 30 тысяч водозаборных скважин. В то же время, около 90 % скважин работает со сниженной производительностью и повышенными затратами электроэнергии. Особенно это характерно для высокодебитных скважин при неравномерном графике водоподачи, так как при включениях мощного погружного насоса возникают значительные снижения динамического уровня воды, что вызывает нарушение газового равновесия в подземном потоке в зоне фильтра и выпадение отложений, а также создает риски для выноса песка. Это снижает дебит скважин, сокращает интервалы между регенерациями, увеличивает напор насосов и энергозатраты на подъем воды. В структуре эксплуатационных затрат скважинных водозаборов доля расходов на электроэнергию может достигать 85 %. Эксплуатация скважин со сниженной производительностью также обусловлена недостаточной эффективностью существующих способов регенерации фильтров и методов обследования пескующих скважин. Наличие в типовых конструкциях скважин единственного фильтра снижает их надежность, так как при выходе его из строя, скважину перебуривают.

В этой связи разработка новых конструкций долговечных скважин и эффективных методов восстановления их дебита, к которым относят: регенерацию скважин, снизивших производительность в результате кольтации фильтров, и ремонт пескующих скважин, включающий обследование, извлечение песчаной пробки, устранение причин пескования, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Решить эту проблему предлагается путем разработки и внедрения на водозаборах: 1) двухколонных скважин с двумя независимыми фильтрами, которые позволяют вместо одного мощного насоса разместить в скважине два менее мощных (один – для основной нагрузки, второй – для пиковой) и комбинировать работу насосов так, чтобы обеспечивать водоподачу с минимальными понижениями динамического уровня воды и энергозатратами; 2) методов реагентной регенерации скважин с помощью линейного свабирования и закачных мелкотрубчатых скважин; 3) методов обследования и ремонта пескующих скважин.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования и результаты, положенные в основу диссертации, соответствуют п. 3. «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование (энергетическая эффективность, энергосбережение; полезные ископаемые и изучение недр)» Перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156.

Работа проводилась в рамках ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2025 гг. по заданию 1.1.09 «Повышение энергоэффективности эксплуатации групповых водозаборов подземных вод за счет оптимизации режимов их работы и создания высокодебитных ремонтпригодных скважин» (ГБ № 21-02/1, № ГР 20212431) и аспирантских грантов Министерства образования Республики Беларусь: ГБ № 18-06 «Разработка устройства для диагностики пескующих водозаборных скважин по мутности поступающего в ствол потока и техно-

логии их ремонта» (№ ГР 20180619) и ГБ № 19-20 «Технология сооружения и поддержание стабильной работы двухколонной водозаборной скважины с повышенным ресурсом службы» (№ ГР 20191233).

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка конструкций двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин и методов восстановления их дебита.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать модели двухколонных двухфилтровых скважин для проведения экспериментальных лабораторных и натуральных гидравлических исследований.

2. Обосновать зависимости для расчета конструктивных параметров двухколонных двухфилтровых скважин и притока воды к ним на основе экспериментальных исследований.

3. Установить зависимости для определения подач и напоров скважинных насосов, смонтированных в колоннах одной и нескольких двухколонных двухфилтровых скважин, при их совместной работе.

4. Установить зависимости для расчета вертикальной и радиальной скоростей фильтрационного потока в гравийной обсыпке при линейном сваивании ограниченного пакерами участка фильтра, разработать режимы регенерации скважины.

5. Определить необходимое количество мелкотрубчатых скважин, пробуренных в ближней зоне восстанавливаемой скважины, для проведения ее циркуляционно-реагентной регенерации.

6. Исследовать диаграммы изменения мутности воды по глубине пескующих скважин с помощью индикатора мутности в процессе откачки при натуральных испытаниях.

7. Разработать рекомендации по проектированию, сооружению и восстановлению дебита двухколонных двухфилтровых скважин.

Объект исследования – скважины систем водоснабжения и вертикального дренажа.

Предмет исследования – конструктивные и гидравлические параметры скважин, способы восстановления дебита.

Научная новизна

Установлено, что удельный дебит двухколонной двухфилтровой скважины в среднем на 6–8 % выше, чем у одноколонной типовой за счет наличия соединительных переемычек между фильтрами, обеспечивающих их совместную параллельную работу.

Обоснованы зависимости для расчета конструктивных параметров двухколонных двухфилтровых скважин и притока воды к ним, позволяющие рассчитать длины и диаметры филтров, понижения уровней в скважинах при заданном проектном дебите и известных гидрогеологических условиях.

Получены зависимости, позволяющие определить подачи и напоры скважинных насосов, установленных в колоннах одной и нескольких двухколонных двухфилтровых скважин, при их совместной работе.

Установлены зависимости для расчета вертикальной и радиальной скоростей фильтрационного потока в гравийной обсыпке при линейном сваивании ограниченного пакерами участка фильтра и определены режимы поинтервальной реагентной регенерации при заданной скорости перемещения сваба, включающие количество циклов движения сваба, общее время декольматации.

Определено необходимое количество мелкотрубчатых скважин, пробуренных в ближней зоне восстанавливаемой скважины, обеспечивающих ее равномерную циркуляционно-реагентную регенерацию.

Установлен характер диаграмм мутности воды по глубине с помощью индикатора мутности в процессе откачки из пескующих скважин при натуральных исследованиях, обеспечивающих точное определение места притока песка.

Положения, выносимые на защиту

1. Двухколонные двухфилтровые водозаборные скважины для забора воды из одного или более водоносных горизонтов, отличающиеся наличием двух фильтров с соединительными перемычками, установленных на двух эксплуатационных колоннах, смонтированных в одном буровом стволе, обладающие повышенной надежностью и долговечностью, позволяющие увеличить удельный дебит до 8 %, и за счет совместной работы двух погружных насосов снизить эксплуатационные затраты на подъем воды (до 33 %) и интенсивность коагуляционных процессов.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния количества соединительных перемычек между фильтрами на величину удельного дебита двухколонных двухфилтровых скважин, позволившие обосновать расчеты конструктивных параметров скважин и притока воды к ним, а также результаты теоретических исследований влияния понижений уровня воды в скважинах различных конструкций на величины напоров и подач насосов при их совместной работе, которые позволили предложить порядок расчета режимов работы насосов и затрат электроэнергии на подачу воды.

3. Зависимости для расчета скорости промывного фильтрационного потока реагента в закоагулированной гравийной обсыпке от скорости движения сваба на ограниченном пакерами интервале фильтра, позволившие установить изменение удельного объема отложений во времени и режимы поинтервальной реагентной регенерации скважин способом линейного свабирования в замкнутых камерах.

4. Результаты натуральных исследований по определению мест пескования путем анализа диаграмм изменения мутности воды по глубине пескующих скважин, полученных с помощью индикатора мутности в процессе откачки, позволяющие повысить точность определения участка притока песка в скважину, предложить способы восстановления дебита путем тампонажа участка и удаления песчаной пробки с помощью гидроэлеватора с размывающим насадком.

Личный вклад соискателя ученой степени

Научным руководителем доктором техн. наук, проф. Ивашекиным В. В. оказывалась научно-консультационная и практическая помощь при выполнении диссертации. Положения, выносимые на защиту, цель и задачи исследования сформулированы автором совместно с научным руководителем. Научные результаты диссертационной работы, включающие новые конструкции двухколонных двухфилтровых скважин, результаты теоретических и экспериментальных исследований получены соискателем самостоятельно. Совместно с аспирантом Кочергиным А. Ю. производилась сборка устройства для определения мест пескования и его апробация в полевых условиях. Совместно со ст. преподавателем Амелишко И. Е. проводилась разработка режимов реагентной регенерации скважин способом линейного свабирования. Другим соавторам публикаций принадлежат результаты, не вошедшие в положения, выносимые на защиту.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты исследований, включенные в диссертацию, доложены на следующих конференциях: Международных научно-технических конференциях (МНТК) «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2012–2013, 2015–2018); Международных форумах-конкурсах молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2017–2019, 2022); Юбилейной МНТК «Проек-

тирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей», (Санкт-Петербург, 2017); Международной конференции (МК) «Геотехника Беларуси: наука и практика» (Минск, 2018); МК «Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения» (Минск, 2019); XIV МНТК «Яковлевские чтения» (Москва, 2019); 15-й МК «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Минск–Тула–Донецк, 2019); МНТК «Вода. Газ. Тепло 2020» (Минск, 2020); студенческой МНТК «Современные направления в проектировании, строительстве и эксплуатации водохозяйственных объектов и водного транспорта» (Минск, 2020); VIII Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2021» (Минск, 2021); МНТК «Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте» (Минск, 2021–2022).

Результаты диссертации внедрены в производство на предприятиях КУП «Жодинский водоканал», УП «Дирекция по строительству Минского метрополитена» и в учебный процесс Белорусского национального технического университета.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 научных работах, в том числе в 8 статьях в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь и Российской Федерации (всего 4,5 авторского листа), 27 статьях, тезисах и докладах на конференциях, 1 методическом документе в строительстве. Получены 3 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 129 страниц. Работа содержит 95 страниц основного текста, 52 рисунка на 18 страницах, 13 таблиц на 4 страницах, 7 приложений на 23 страницах, список используемых источников в количестве 60 наименований, список публикаций соискателя из 35 научных работ, 1 методического документа в строительстве и 3 патентов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе выполнен аналитический обзор наиболее распространенных конструкций скважин на воду, причин снижения их дебита, способов диагностики технического состояния скважин, а также способов реагентной регенерации, выявлены проблемы и намечены пути их решения.

Анализ конструкций типовых высокодебитных скважин выявил их недостатки, связанные с повышенными энергозатратами на подъем воды и относительно низким сроком службы. Установлено, что известные методы реагентной регенерации недостаточно эффективны в высокодебитных скважинах с длительными сроками эксплуатации.

Произведена оценка возможности применения двухколонных двухфильтровых скважин для забора подземных вод. Отмечена повышенная надежность их конструкций из-за наличия двух фильтров, а также возможность снижения затрат электроэнергии и интенсивности кольтации фильтров благодаря совместной работе двух насосов с подачами, отвечающими графику водопотребления.

С целью повышения эффективности проведения реагентной регенерации скважины выполнена оценка возможности осуществления ее обработки способами поинтервального линейного свабирования участков фильтра, ограниченных пак-

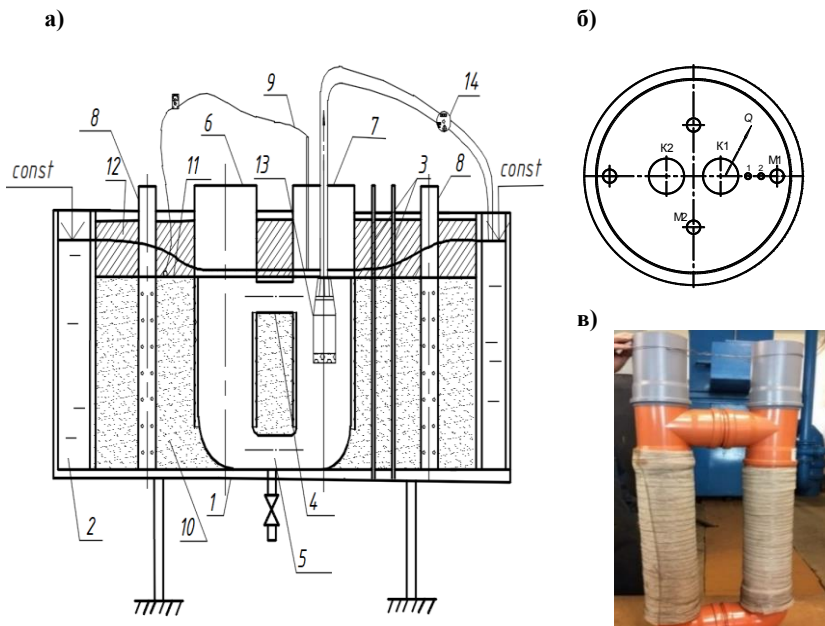
рами, а также путем закачки реагента в специально пробуренные в ее ближней зоне мелкотрубчатые скважины.

Для повышения надежности проведения ремонта пескующих скважин предложено определять место притока песка с помощью индикатора мутности воды, удалять песчаную пробку с использованием гидроэлеваторной установки с размывающим насадком и производить устранение причин пескования путем тампонирования поврежденного участка.

На основании проведенного анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе изложены результаты лабораторных и натурных гидравлических исследований двухколонных двухфильтровых скважин, приведено описание основного оборудования, приборов, методик измерений, предложены разновидности конструкций скважин.

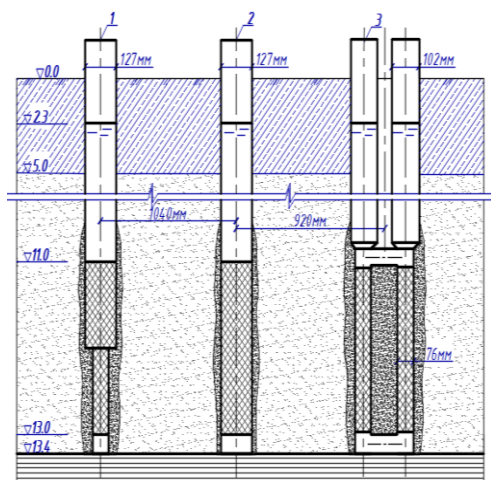
Для исследований в лабораторных условиях использовали стенд, состоящий из радиального фильтрационного лотка диаметром 1,22 м и высотой 1,0 м с кольцевым бьефом (рисунок 1).



1 – фильтрационный лоток; **2** – кольцевой бьеф; **3** – пьезометры;
4, 5 – перемычки; **6, 7** – вторая (K2) и первая (K1) колонны; **8** – циркуляционные трубки (M1, M2); **9** – уровнемер; **10** – водовмещающий грунт;
11 – полиэтиленовая пленка; **12** – глиняный замок; **13** – насос; **14** – расходомер
 Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: продольный разрез (а), поперечный разрез (б), фотография фильтровых колонн (в)

Внутри лотка устанавливали модель двухколонной двухфилтровой скважины, фильтры которой представляли собой трубчатые перфорированные каркасы из ПВХ диаметром 110 мм, длиной 0,3 м, обмотанные полиэтиленхолстом. Выше и ниже фильтров монтировали две соединительные перемычки того же диаметра. Модель напорного пласта засыпали кварцевым песком. В одну из колонн помещали насос «Ручеек-1», который откачивал из нее воду при различных вариантах закрытия–открытия перемычек. Измеряли производительность насоса, понижение воды в колонне, вычисляли удельный дебит. Установлено, что наибольшие средние значения удельных дебитов достигаются при открытых верхней и обеих соединительных перемычках: $q = 31,4 \text{ см}^2/\text{с}$ и $q = 28,9 \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно.

Натурные гидравлические исследования по оценке эффективности двухколонной двухфилтровой скважины по сравнению с типовой одноколонной производились на опытном участке в д. Приморье Минского района, состоящем из трех опытных скважин (рисунок 2).



1 – одноколонная скважина с двухсекционным фильтром;
 2 – одноколонная типовая скважина;
 3 – двухколонная двухфилтровая скважина
Рисунок 2 – Геолого-технические разрезы опытных скважин



Рисунок 3 – Общий вид оборудования при гидравлических исследованиях двухколонной скважины

Водоносный горизонт напорный, сложен разнозернистыми песками мощностью $m = 8,4 \text{ м}$. Глубина всех скважин 13,4 м. Они оборудованы сетчатыми фильтрами длиной 2 м из полиамидной сетки галунного плетения на трубчатых дырчатых каркасах скважностью 10,5 % с гравийной обсыпкой из калиброванного песка крупностью 1,0–1,8 мм.

Расход воды Q измеряли объемным методом при работе насосов на выброс в емкость объемом $0,1 \text{ м}^3$, понижения уровней воды S_0 – электроуровнеммером (рисунок 3).

Вычисляли значения коэффициентов фильтрации пород $k_{\text{п}}$ во фрагменте опытная–наблюдательная скважина, где двухколонная скважина была вначале опытной, а типовая – наблюдательной, а затем наоборот, а также значения показателей обобщенного сопротивления фильтров и прифильтровых зон ζ_2 (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительные результаты натуральных испытаний скважин

Условия забора воды		$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$S_0, \text{ м}$	$q, \text{ м}^2/\text{ч}$	$k_{\text{п}}, \text{ м}/\text{сут.}$	ζ_2
Двухколонная скважина	Одним насосом	1,37	0,37	3,65	6,24	0,87
	Двумя насосами	2,72	0,76	3,57	6,20	0,89
Типовая скважина	Одним насосом	1,37	0,40	3,43	6,20	0,50

У обеих скважин значения $k_{\text{п}}$ практически не отличаются и находятся в диапазоне $k_{\text{п}} = (6,20–6,24) \text{ м}/\text{сут.}$, а значения ζ_2 не превышают единицу и отличаются незначительно: $\zeta_2 = 0,88$ (двухколонная) и $\zeta_2 = 0,50$ (одноколонная). Откачками при разных дебитах установлено, что удельный дебит двухколонной скважины в среднем на 6–8 % выше, чем у типовой одноколонной, что указывает на ее преимущество по удельным энергозатратам на подъем воды. Экспериментами установлено, что понижения уровней воды в колоннах двухколонной скважины при работе одного или двух насосов будут одинаковыми.

Разработан ряд конструкций двухколонных двухфильтровых скважин, для которых предложены следующие области применения: в водоносных однородных пластах мощностью $m < 10–15 \text{ м}$ следует применять конструкцию скважины с фильтрами, установленными на одном уровне, с перемычками; в горизонтах мощностью $m > 10–15 \text{ м}$ – исходить из конструкции скважины с перемычками, в которой фильтры устанавливаются на разных уровнях в наиболее проницаемых зонах, а при значительном расстоянии между фильтрами по глубине и заборе воды из двух не связанных между собой водоносных горизонтов рекомендовано применять конструкцию без перемычек.

В третьей главе приведены зависимости для расчета конструктивных параметров двухколонных двухфильтровых скважин, притока воды к ним и режимов совместной работы скважинных насосов.

Схемы к расчету притока воды к двухколонным двухфильтровым скважинам предлагаемых конструкций представлены на рисунке 4.

Рекомендовано использовать в рыхлых породах фильтры с гравийной обсыпкой минимальной толщиной 60 мм. Минимальный внутренний диаметр каркасов фильтров рекомендован 100–150 мм по условиям ремонта, а максимальный наружный – 273 мм по условиям производства работ.

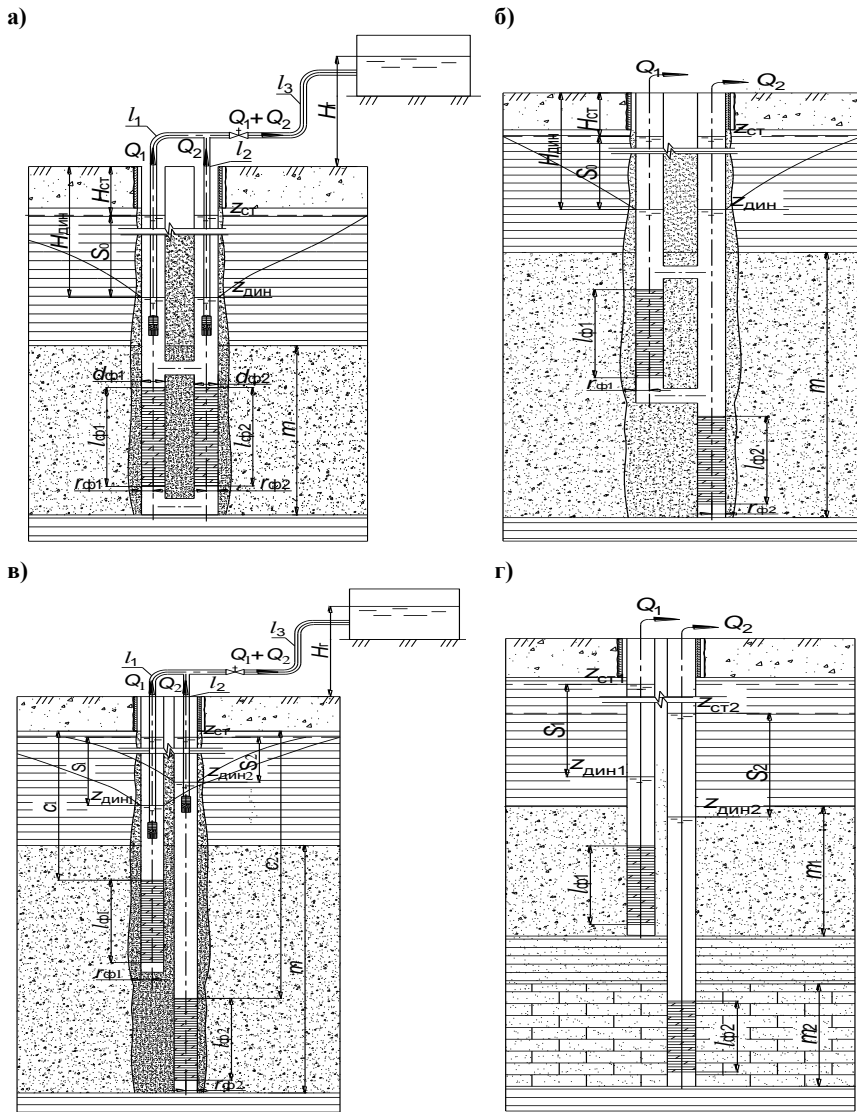


Рисунок 4 – Схемы к расчету притока воды к двухколонным скважинам с двумя фильтрами: на одном уровне с перемычками (а), на разных уровнях с перемычками (б) и без перемычек (в), с фильтрами в разных водоносных горизонтах (г)

Принято, что в скважинах (рисунок 4) при выходе одного из фильтров из строя, второй фильтр должен обеспечить проектный дебит скважины Q_c при расчетном понижении уровня. Расчетную длину фильтра l_ϕ каждой из колонн при заданном диаметре его водопримемной поверхности d_ϕ предложено определять из формулы:

$$l_\phi = \frac{Q_c}{\alpha \eta \pi d_\phi v_{\text{вх.доп}}}, \quad (1)$$

где α – коэффициент, учитывающий прогнозное снижение площади проходных отверстий вследствие их зарастания продуктами кольматажа, $\alpha < 1$;

η – скважность водопримемной поверхности фильтра; $v_{\text{вх.доп}}$ – допустимая скорость при входе в водопримемную поверхность, м/с.

Скорости в верхних поперечных сечениях каркасов фильтров не должны превышать $v_{\text{к.доп}} = 1,5$ м/с.

Так как для схем (рисунок 4, а, б) понижения уровней воды в скважине $S_1 = S_2 = S_0$, то, например, для напорного изолированного пласта при постоянном дебите Q_c понижение S_0 можно найти по формуле:

$$S_0 = \frac{Q_c \left(\ln \frac{R^*}{r_0} + \zeta_1 + \zeta_2 \right)}{2\pi km}, \quad (2)$$

где R^* – приведенный радиус влияния скважины, м; $R^* = 1,5\sqrt{a^*t^*}$ (a^* – коэффициент пьезопроводности пласта, м²/сут.; t^* – срок эксплуатации скважины, сут.);

r_0 – радиус условного фильтра двухколонной двухфильтровой скважины, м;

ζ_1, ζ_2 – поправки на несовершенство скважины по степени и характеру вскрытия пласта соответственно;

k – коэффициент фильтрации пород пласта, м²/сут.;

m – мощность пласта, м.

В выражении (2) радиус условного фильтра r_0 скважин (рисунок 4, а, б) предложено определять путем приведения водопримемной поверхности скважины, состоящей из двух цилиндрических фильтров радиусами $r_{\phi 1}$ и $r_{\phi 2}$ к одному цилиндрическому фильтру радиусом r_0 с длиной рабочей поверхности l_ϕ эквивалентной фильтрующей площади. Например, при $r_{\phi 1} = r_{\phi 2} = r_\phi$; $l_{\phi 1} = l_{\phi 2} = l_\phi$ получим: $2\pi r_0 l_\phi = 4\pi r_\phi l_\phi$, тогда $r_0 = 2r_\phi$. Поправку ζ_1 находят как функцию: $\zeta_1 = f(l_\phi / m; m / r_0)$ – для скважины, представленной на рисунке 4, а; $\zeta_1 = f(2l_\phi / m; m / r_0)$ – для скважины на рисунке 4, б.

Понижения S_1 и S_2 в соответствующих колоннах скважины при $r_{\phi 1} = r_{\phi 2} = r_\phi$ (рисунок 4 в) при работе двух насосов равны:

$$S_1 = \frac{Q_1}{2\pi km} \left(\ln \frac{R^*}{r_{\phi 1}} + \zeta_1 + \varphi_2 \right); \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{Q_2}{2\pi km} \left(\ln \frac{R^*}{r_{\phi 2}} + \zeta_1'' + \varphi_1 \right), \quad (4)$$

где Q_1, Q_2 – подачи насосов, установленных в соответствующих колоннах, $\text{м}^3/\text{с}$;

ζ_1', ζ_1'' – поправки на несовершенство по степени вскрытия пласта фильтрами первой и второй колонн;

φ_1, φ_2 – коэффициенты, учитывающие влияние первого фильтра на работу второго и – второго фильтра на работу первого соответственно.

Приведены зависимости для расчета рабочих режимов совместной работы на резервуар двух скважинных насосов с напорными характеристиками вида $H_{\text{н}} = -aQ^2 + bQ + c$ (a – параметр кривой $H_{\text{н}} = f(Q)$ насоса, $\text{с}^2/\text{м}^5$; b – то же, $\text{с}/\text{м}^2$, c – некоторый фиктивный напор насоса, м), установленных в:

1) скважинах (рисунок 4, а, б):

$$\begin{cases} H_{\text{н1}} = H_{\Gamma} + H_{\text{ст}} + \frac{Q_1 + Q_2}{q} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_3 l_3 (Q_1 + Q_2)^2; \\ H_{\text{н2}} = H_{\Gamma} + H_{\text{ст}} + \frac{Q_1 + Q_2}{q} + A_2 l_2 Q_2^2 + A_3 l_3 (Q_1 + Q_2)^2, \end{cases} \quad (5)$$

где H_{Γ} – высота от устья скважины до уровня воды в резервуаре, м ;

$H_{\text{ст}}$ – статический уровень в скважине, м ;

q – удельный дебит скважины, $\text{м}^2/\text{с}$;

l_1, l_2 – длины водоподъемных труб, м ;

l_3 – длина сборного водовода, м ;

A_1, A_2, A_3 – удельные сопротивления водоподъемных труб и сборного водовода соответственно, $\text{с}^2/\text{м}^6$;

2) скважине (рисунок 4, в):

$$\begin{cases} H_{\text{н1}} = H_{\Gamma} + H_{\text{ст}} + \frac{Q_1}{q_1(1 - \alpha_1)} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_3 l_3 (Q_1 + Q_2)^2; \\ H_{\text{н2}} = H_{\Gamma} + H_{\text{ст}} + \frac{Q_2}{q_2(1 - \alpha_2)} + A_2 l_2 Q_2^2 + A_3 l_3 (Q_1 + Q_2)^2, \end{cases} \quad (6)$$

где q_1, q_2 – удельные дебиты соответствующих фильтровых колонн скважины, $\text{м}^2/\text{с}$;

α_1, α_2 – коэффициенты снижения удельного дебита первого фильтра от влияния откачки из второго фильтра и – второго фильтра от влияния откачки из первого фильтра, соответственно;

3) скважине (рисунок 4, з):

$$\begin{cases} H_{н1} = H_{Г} + H_{ст1} + \frac{Q_1}{q_1} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_3 l_3 (Q_1 + Q_2)^2; \\ H_{н2} = H_{Г} + H_{ст2} + \frac{Q_2}{q_2} + A_2 l_2 Q_2^2 + A_3 l_3 (Q_1 + Q_2)^2. \end{cases} \quad (7)$$

Приведен пример расчета и сравнение годовых энергозатрат при работе двух водозаборов, имеющих в составе:

1) две типовые одноколонные скважины (рабочую и резервную) с насосами ЭЦВ 10-65-65 НРК;

2) две двухколонные двухфилтровые рабочие скважины с четырьмя насосами ЭЦВ 6-16-50 КН. Годовой график водоподачи: с пиковой нагрузкой $\sum Q = 62,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ продолжительностью $t = 396 \text{ ч}$; с частичной нагрузкой $\sum Q = 39,1 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 818 \text{ ч}$; с основной нагрузкой $\sum Q = 20,16 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 2976 \text{ ч}$ при годовом водопотреблении $\sum W = 116\,700 \text{ м}^3$.

Установлено, что величина потребляемой в течение года электроэнергии при комбинировании работы насосов на втором водозаборе составила $E_{\text{год}} = 33\,489 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, что обеспечило экономию электроэнергии 33 % в сравнении с первым водозабором.

Приведен сравнительный расчет затрат на сооружение двух водозаборов глубиной 68 м, имеющих в составе:

1) две типовые одноколонные скважины (рабочую и резервную) с двумя павильонами;

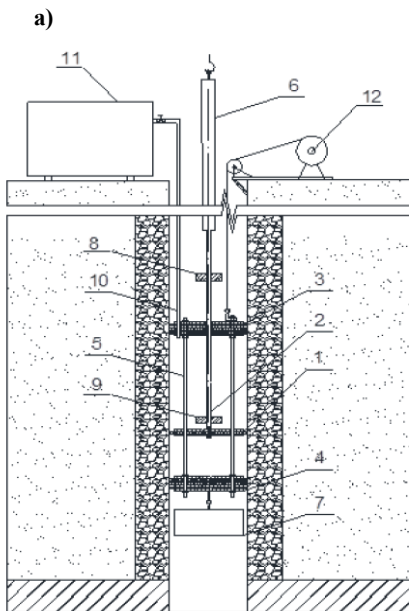
2) одну двухколонную двухфилтровую скважину с одним павильоном.

Затраты соответственно составили: $C_1 = 188\,112 \text{ руб.}$ и $C_2 = 120\,994 \text{ руб.}$ Достигаемая экономия $\Delta C = 67\,118 \text{ руб.}$, или 35,7 %.

В четвертой главе приведено описание методов восстановления дебита двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин.

Представлена разработанная конструкция скважинного устройства, входящего в состав оборудования установки для реагентной обработки фильтров скважин способом линейного свабиrowания, характеризуемого повышенной эффективностью удаления кольматанта за счет создания интенсивных знакопеременных фильтрационных потоков реагента в гравийной обсыпке (рисунок 5).

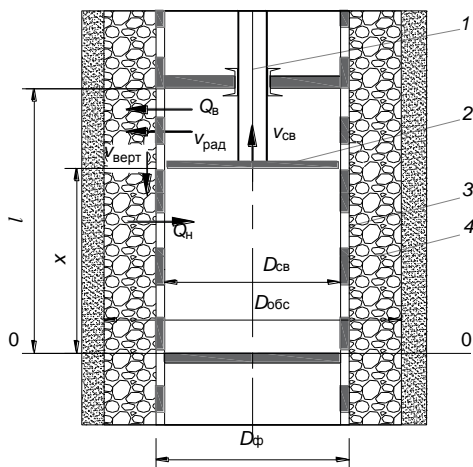
Скважинное устройство (рисунок 5, б) на водоподъемных трубах эрлифта опускают в обрабатываемый участок фильтра и фиксируют с помощью тросовой лебедки. Заливку реагента в рабочую камеру производят из емкости при опускании штока вниз на величину рабочего хода сваба.



1 – сваб; 2 – шток; 3, 4 – верхний и нижний пакеры; 5 – направляющие стержни; 6 – водоподъемные трубы эрлифта; 7 – массивный груз; 8, 9 – верхний и нижний упоры; 10 – шланг; 11 – емкость; 12 – лебедка
Рисунок 5 – Схема оборудования установки (а) и общий вид скважинного устройства (б) для реагентной обработки фильтра на основе способа линейного свабливания в замкнутых камерах

Регенерацию участка фильтра начинают, поднимая вверх сваб площадью $\omega_{\text{св}}$ со скоростью $v_{\text{св}}$ на величину рабочего хода. В верхней полости рабочей камеры формируется поток реагента с расходом $Q_{\text{в}} = v_{\text{св}} \cdot \omega_{\text{св}}$, который разделяется на два потока: 1) поток, направленный вертикально вниз по гравийной обсыпке, поступающий в нижнюю камеру, имеющий расход $Q_{\text{в-н}}$ и скорость $v_{\text{верт}}$ в поперечном сечении гравийной обсыпки площадью $\omega_{\text{обс}}$; 2) радиальный поток, вытесняемый в прифильтовую зону через боковую поверхность фильтра диаметром $D_{\text{ф}}$, имеющий расход $Q_{\text{в-пз}}$ и скорость $v_{\text{рад}}$. Затем из крайнего верхнего положения сваб перемещают вниз со скоростью $v_{\text{св}}$ и реагент вытесняется по гравийной обсыпке из нижней части камеры в верхнюю и частично перетекает в прифильтовую зону. Рабочие ходы повторяют до достижения необходимой степени регенерации.

Для определения скорости фильтрационного потока, являющейся основным интенсифицирующим фактором растворения отложений, была рассмотрена гидродинамика движения реагента на участке обработки фильтра (рисунок 6).



1 – шток; 2 – сваб; 3 – фильтр;
4 – гравийная обсыпка

Рисунок 6 – Расчетная схема движения реагента на участке фильтра при движении сваба

Получены уравнения баланса напоров и расходов реагента в обсыпке при движении сваба вверх между неподвижными герметичными пакерами, которые имеют вид:

$$\Delta p_{в-н} = \Delta p_{в-пз} + \Delta p_{пз-н}, \quad (8)$$

$$Q_{в} = Q_{в-пз} + Q_{в-н}, \quad (9)$$

$$Q_{н} = Q_{пз-н} + Q_{в-н}, \quad (10)$$

где $\Delta p_{в-н}$ – потери давления при перетекании жидкости из верхней полости в нижнюю с расходом $Q_{в-н}$ по гравийной обсыпке, Па;

$\Delta p_{в-пз}$ – то же при вытеснении жидкости из верхней полости в прифилтровую зону с расходом $Q_{в-пз}$, Па;

$\Delta p_{пз-н}$ – потери давления при притоке жидкости из прифилтровой зоны с расходом $Q_{пз-н}$ в нижнюю полость, Па;

$Q_{н}$ – расход, поступающий в нижнюю полость, м³/с.

После преобразования уравнений (8)–(10) и их решения получены выражения для нахождения вертикальной $v_{верт}$ и радиальной $v_{рад}$ скоростей фильтрационного потока в гравийной обсыпке:

$$v_{\text{верт}} = \frac{v_{\text{св}} \omega_{\text{св}}}{\omega_{\text{обс}}(1+a)}; \quad (11)$$

$$v_{\text{рад}} = \frac{a v_{\text{св}} \omega_{\text{св}}}{\pi D_{\phi} (l-x)(1+a)}, \quad (12)$$

где l – длина рабочего хода сваба, м; x – расстояние от начала отсчета до сваба, м;

$$a - \text{безразмерный параметр, } a = \frac{\delta q x (l-x)}{k \omega_{\text{обс}} l_{\phi} l};$$

δ – расчетная длина пути фильтрации при обтекании сваба фильтрационным потоком, м;

k – коэффициент фильтрации материала гравийной обсыпки, м/сут.;

l_{ϕ} – длина фильтра, м.

С целью определения продолжительности и числа ходов сваба с заданной скоростью на участке обработки, необходимых для обеспечения заданной степени удаления отложений, использована система уравнений, описывающая процесс растворения отложений, включающая объединенное уравнение движения и сохранения массы, а также обобщенное уравнение кинетики:

$$\begin{cases} -v \frac{\partial C}{\partial x} - \rho_{\text{ос}} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}; \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi \cdot (C_{\text{max}} - C), \end{cases} \quad (13)$$

где v – скорость реагента в обсыпке, м/с;

C, C_{max} – текущая и максимальная концентрации солей в реагенте, кг/м³;

n_0 – начальная пористость обсыпки;

b – удельная насыщенность обсыпки кольматантом плотностью $\rho_{\text{ос}}$;

$$\Phi = \frac{B_i}{\rho_{\text{ос}}} f(b), \quad f(b) = \frac{1}{\sqrt{1-n_0}} \sqrt{\frac{1}{n_0-b}-1}, \quad B_i = A_1 \left(\frac{D^4}{v_c} \right)^{1/6} \cdot \omega_0 \sqrt{\frac{v}{d_0}},$$

где A_1 – константа, $A_1 \in [0,76 - 0,996]$;

D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с;

v_c – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с;

ω_0 – удельная поверхность гравийной обсыпки, принимаемая как суммарная поверхность зерен шаровой формы диаметром d_0 в единице объема, м⁻¹,

$$\omega_0 = 6 \frac{(1-n_0)}{d_0}.$$

Начальные и граничные условия, соответствующие расчетной схеме (рисунок 6), имеют следующий вид:

$$C(0, x) = C_0, C(t, 0) = C_0, b(0, x) = b_0 < n_0, t \geq 0, x \in [0; l], \quad (14)$$

где C_0 – начальная концентрация солей в реагенте, кг/м³;

b_0 – начальный удельный объем отложений.

Сделано допущение о том, что $v = v_{\text{верт}}$. Для упрощения расчетов функцию $f(b)$ определяли при значении среднего удельного объема отложений b_c (как показали расчеты для реальных скважин, можно взять $b_c = 0,5b_0$).

В результате интегрирования задачи (13)–(14) получена зависимость для расчета значения b на границе участка обработки после проведения k ходов реагента:

$$b(T_0, l, k) = b_0 - \sum_{m=1}^k \left[n_0(1 - e^{-\alpha_m T_0}) + \alpha_m e^{-\alpha_m T_0} (1 - n_0) T_0 \right] J_m, \quad (15)$$

где T_0 – время, за которое реагент проходит расстояние l со скоростью $v_{\text{верт}}$, с, $T_0 = l/v_{\text{верт}}$;

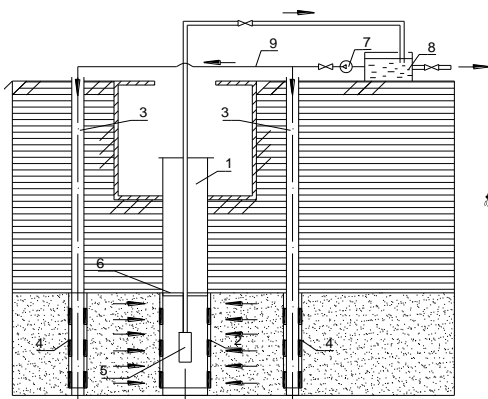
значения α_m и J_m определяются рекуррентно: $\alpha_1 = B_i \cdot f(0, 5b_0)$; $J_1 = Ct - C_0$, а для

$m > 1$ полагаем $\alpha_m = B_i \cdot f(0, 5b(T_0, l, m-1))$; $J_m = J_{m-1} \cdot e^{-\alpha_{m-1} T_0}$.

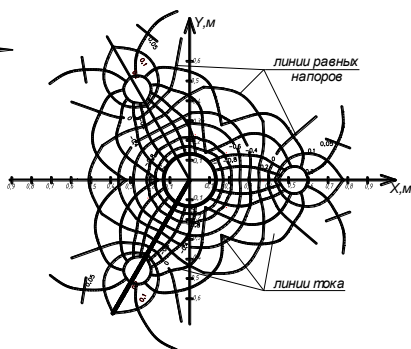
По зависимости (15) составлена компьютерная программа, позволяющая рассчитать степень удаления кольматанта на каждом этапе регенерации, количество циклов работы устройства и общую продолжительность очистки. Приведен пример расчета.

Предложен способ циркуляционно-реагентной регенерации скважины с использованием специально пробуренных в ее ближней зоне нескольких закачных мелкотрубчатых скважин (рисунок 7). С помощью закачного насоса из емкости по распределительной системе непрерывно подают реагент в мелкотрубчатые скважины и одновременно откачивают его с продуктами реакции откачным насосом назад в емкость. Циркуляцию проводят до полного растворения отложений.

Приведены результаты лабораторных исследований распределения напоров промывного фильтрационного потока при данном способе обработки. Воду забирала насосом «Ручеек-1» из модели совершенной скважины, установленной в фильтрационном лотке (рисунок 1), которая моделировала одну из колонн двухколонной двухфилтровой скважины, и подавали сначала в одну, а затем в две модели мелкотрубчатых скважин. По показаниям пьезометров, установленных на линии между моделями восстанавливаемой и закачной скважин, строили пьезометрические линии, на которые накладывали результаты расчета по теоретическим зависимостям, базирующимся на методе наложения фильтрационных течений. Полученная хорошая сходимость результатов теоретического расчета с данными опытов показала возможность применения теоретических зависимостей для построения гидродинамических сеток фильтрации.



**1 – восстанавливаемая скважина;
2, 4 – фильтры; 3 – мелкотрубчатые
скважины; 5 – откачной насос; 6 – пакер;
7 – закачной насос; 8 – емкость;
9 – распределительная система**
**Рисунок 7 – Технологическая схема
промывки скважины**



**Рисунок 8 – Гидродинамическая
сетка фильтрации при трех
закачных мелкотрубчатых
скважинах**

Анализ построенных гидродинамических сеток показал, что с увеличением количества мелкотрубчатых скважин от 1 до 3 шт. на один фильтр двухколонной двухфильтровой скважины достигается охват промывным потоком его обсыпки со всех сторон и поле скоростей получается более равномерным (рисунок 8).

Изготовлено экспериментальное устройство для обнаружения мест пескования скважины путем контроля мутности воды по ее глубине (рисунок 9), содержащее пульт управления, двухжильный кабель с тросом и индикатор мутности воды, перемещаемый вдоль фильтра в процессе откачки воды из скважины. Сигнал, поступающий из индикатора мутности по кабелю, преобразуется в показания миллиамперметра. Анализируя их, можно определить место притока песка в скважину.

Проведены натурные исследования по определению места пескования путем изучения мутности воды по глубине скважины № 22/2009 в КУП «Жодинский водоканал» в 2018 г. Индикатор мутности помещали внутрь водоподъемных труб работающего эрлифта и опускали в нижнюю часть фильтра, где на глубине 96 м с помощью переменного резистора установили значение силы тока на миллиамперметре $I = 35$ мА. В процессе подъема индикатора с отметки 96 м построена диаграмма изменения силы тока миллиамперметра по глубине скважины $I = f(H)$ с соответствующими значениями концентрации песка, полученными с использованием тарифовочного графика (рисунок 10).



Рисунок 9 – Натурные исследования изменения мутности воды по глубине пескующей скважины с помощью индикатора мутности

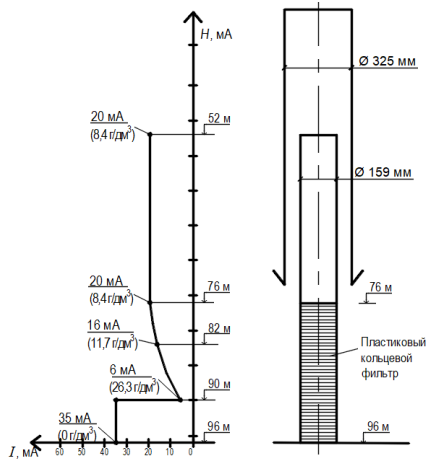


Рисунок 10 – Диаграмма изменения силы тока $I = f(H)$ по глубине пескующей скважины № 22 водозабора г. Жодино

Анализ диаграммы $I = f(H)$ показал, что резкое падение силы тока (почти в шесть раз) на отметке 90 м указывает на место притока песка в фильтр вместе с поступающей водой, а увеличение силы тока с 6 до 20 мА на участке (90–76) м связано с уменьшением мутности поступающего потока из-за увеличения расхода воды по высоте фильтра. Постоянство силы тока на участке надфильтровой трубы (76–52) м указывает на отсутствие притока песка по ее длине.

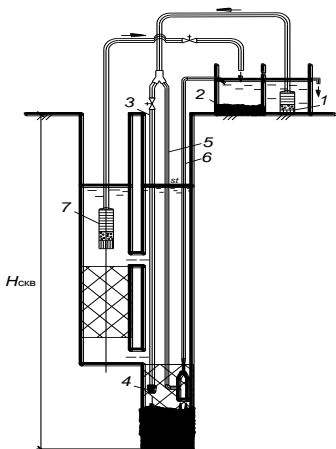
Достоверность диаграммы подтвердили ремонтные работы скважины путем засыпки фильтра крупным гравием до отметки 87 м, что позволило перекрыть 3-метровой пробкой место притока песка в скважину. В скважине смонтировали погружной насос ЭЦВ 8-77-45, что позволило восстановить ее дебит до $Q = 71 \text{ м}^3/\text{ч}$. Годовой экономический эффект составил 150 388,6 руб. по состоянию на 10.11.2020. В настоящее время скважина успешно эксплуатируется с достигнутым дебитом.

Натурные испытания проводились также на пескующей водопонижительной скважине, пробуренной на объекте «Техническое водопонижение станции метрополитена "Немига" г. Минск». При работающем эрлифте индикатор мутности перемещали от дна отстойника скважины вверх и строили диаграмму $I = f(H)$. Установлено незначительное снижение силы тока миллиамперметра по длине фильтра в диапазоне от $I = 36 \text{ мА}$ до $I = 33 \text{ мА}$, которое указало на то, что пескование происходило по всей длине фильтра и было связано с некачественным освоением скважины.

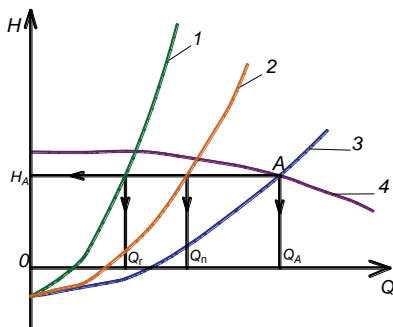
В результате проведения повторных эрлифтных прокачек пескование прекратилось, что позволило отказаться от ремонтных работ и достичь экономического эффекта 11 247,7 руб. по состоянию на 01.06.2018.

Приведено описание методики расчета графоаналитическим способом параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин, оснащенной гидроэлеватором и дополнительным гидромониторным трубопроводом с насадком, который обеспечивает размыв песчаной пробки (рисунки 11, 12).

Методика расчета позволяет подобрать рабочий насос, диаметры трубопроводов, размывающего насадка, а также рассчитать необходимые размеры насоса-гидроэлеватора, способного поднять пульпу на поверхность скважины по пульповоду с заданной глубины.



1 – рабочий насос; 2 – бак;
3 – гидромониторный трубопровод;
4 – размывающий насадок;
5 – подводный насос;
6 – пульповод; 7 – насос;
Рисунок 11 – Гидроэлеваторная установка



1 – $H_{г.треб} = f(Q)$; 2 – $H_{п.треб} = f(Q)$;
3 – суммарная характеристика трубопроводов;
4 – характеристика рабочего насоса $H_n = f(Q)$
Рисунок 12 – Характеристики совместной работы трубопроводов и насоса

Приведены результаты экспериментальных лабораторных исследований по определению коэффициента инжекции i и КПД η насоса-гидроэлеватора.

Приведено описание технологии восстановления дебита пескующей скважины путем тампонажа места притока песка и откачки гидроэлеватором песчаной пробки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан ряд новых конструкций высокодебитных ремонтпригодных двухколонных двухфилтровых скважин для эксплуатации одного или более водоносных горизонтов по результатам лабораторных и натурных исследований [2; 11; 15; 17; 22; 26; 29; 31; 35; 38; 39].

2. По результатам сравнительных натуральных гидравлических исследований двухколонной двухфилтровой и типовой одноколонной скважин в одинаковых гидрогеологических условиях на опытном участке установлено, что удельный дебит двухколонной скважины в среднем на 6–8 % выше за счет наличия соединительных перемычек между фильтрами, обеспечивающих их совместную параллельную работу, что указывает на ее преимущество по удельным энергозатратам на подъем воды [8; 9; 10; 25; 28; 29; 30].

3. Обоснованы зависимости для расчета конструктивных параметров двухколонных двухфилтровых скважин, позволяющие рассчитать длины и диаметры фильтров из расчета обеспечения проектного дебита скважины любым из фильтров в случае выхода другого фильтра из строя [2; 5; 36; 37].

4. Предложены формулы для расчета притока воды к двухколонным двухфилтровым скважинам ряда конструкций, применяемых в различных гидрогеологических условиях для эксплуатации одного или более водоносных горизонтов с учетом конкретных конструктивных особенностей скважин, позволяющие определить понижения уровней в скважинах при проектном дебите и известной производительности насосного оборудования [5; 10; 12; 28; 31; 36].

5. Получены зависимости, позволяющие определить подачи и напоры скважинных насосов при их совместной работе, на основании решения уравнений динамического равновесия скважинных водозаборов, состоящих из одной или нескольких двухколонных двухфилтровых скважин. Установлено, что при неравномерном графике водоподачи годовая экономия электроэнергии при комбинировании работы насосов на водозаборе, состоящем из двухколонных двухфилтровых скважин, достигает 33 % по сравнению с затратами электроэнергии при эксплуатации рабочего насоса в типовой скважине [13; 14; 34; 36].

6. Получены расчетные зависимости для определения вертикальной и радиальной скоростей фильтрационного потока в гравийной обсыпке, учитывающие заданную скорость перемещения сваба на ограниченном пакерами интервале фильтра, геометрические размеры интервала обработки, проницаемость гравийных фильтров, позволившие определить режимы реагентной регенерации скважины способом линейного свабирования в замкнутых камерах [3; 7; 23; 24].

7. На основе анализа гидродинамических сеток фильтрации предложено сооружать не менее трех мелкотрубчатых скважин в ближней зоне восстанавливаемой скважины, обеспечивающих ее равномерную циркуляционно-реагентную регенерацию [1; 18–21; 36; 37].

8. В результате натуральных исследований установлен характер диаграмм мутности воды по глубине с помощью индикатора мутности в процессе откачки из пескующих скважин, обеспечивающий определение места притока песка и последующее эффективное восстановление дебита скважины [4; 27].

9. Предложена методика расчета графоаналитическим способом параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин [6; 16; 32; 33].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные конструкции двухколонных двухфилтровых скважин рекомендуется использовать проектным и строительным организациям для модернизации

и повышения долговечности водозаборов подземных вод в соответствии с разработанными рекомендациями – Р 4.01.197-2023 «Рекомендации по проектированию, сооружению и эксплуатации двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин» [36]. Конструкция двухколонной двухфилтровой скважины включена в СП 4.01.03-2022 «Водозаборные сооружения». Две конструкции скважин защищены Евразийским патентом на изобретение (№ 033351) и патентом Республики Беларусь (№ 23608) [38; 39].

Разработанное устройство для обнаружения мест пескования скважины путем контроля мутности воды по ее глубине предназначено для использования эксплуатирующими и ремонтными организациями для продления срока службы водозаборов. При обследовании устройством пескующей скважины водозабора «Северный» КУП «Жодинский водоканал» обнаружено место пескования фильтра, произведен тампонаж дефектного участка. Дебит скважины восстановлен до $71 \text{ м}^3/\text{ч}$, получен годовой экономический эффект 150 388,6 руб. по состоянию на 10.11.2020. Работы по обследованию пескующей скважины также проведены на объекте «Техническое водопонижение станции метрополитена "Немига", г. Минск». Годовой экономический эффект составил 11 247,7 руб. по состоянию на 01.06.2018.

Разработанный способ реагентной регенерации скважин линейным свабированием в замкнутых камерах, позволяющий повысить эффективность работы и долговечность скважин, рекомендуется использовать для регенерации типовых одноколонных и двухколонных скважин.

Результаты работы внедрены в учебный процесс по дисциплине «Механика жидкости и газа» на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ для студентов, обучающихся по специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов».



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь и Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Ивашечкин, В. В. Исследования установившегося движения жидкости в прифильтровой зоне скважины при ее регенерации циркуляционно-реагентным методом / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Мелиорация. – 2016. – № 4. – С. 34–39.

2. Ивашечкин, В. В. Двуствольная фильтровая водозаборная скважина для эксплуатации одного водоносного горизонта / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева, А. Н. Курч // Мелиорация. – 2017. – № 3. – С. 36–41.

3. Реагентная декольматация водозаборных скважин методом свабирования в замкнутых камерах / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, Ю. А. Медведева, А. Н. Глинская, И. Е. Иванова // Мелиорация. – 2018. – № 2. – С. 20–27.

4. Ивашечкин, В. В. Совершенствование методов обследования и ремонта пескующих водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 3. – С. 24–29.

5. Основы расчета и проектирования двухколонных двухфильтровых водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева, А. Н. Кондратович, Е. С. Сацута // Наука и Техника. – 2021. – Т. 20, № 5. – С. 410–419.

6. Медведева, Ю. А. Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 281–289.

7. Медведева, Ю. А. Расчет режимов регенерации водозаборной скважины методом линейного свабирования / Ю. А. Медведева, И. Е. Амелишко, В. В. Ивашечкин // Мелиорация. – 2023. – № 1. – С. 31–38.

8. Ивашечкин, В. В. Гидродинамические натурные исследования двухколонных двухфильтровых водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева, В. И. Крицкая // Мелиорация. – 2023. – № 4. – С. 33–41.

Статьи в научно-технических журналах

9. Medvedeva, J. A. Double-column double-filter water well for groundwater abstraction / J. A. Medvedeva // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 : Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO, Saint Petersburg, 17–19 May 2019 / ed. V. Litvinenko. – St. Petersburg, 2019. – Vol. 2. – P. 730–737.

10. Медведева, Ю. А. Новая конструкция двухколонной двухфильтровой скважины для забора подземных вод и бесперебойной и надежной доставки воды потребителям / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2020. – № 5. – С. 50–55.

11. Немеровец, О. В. Ресурсы подземных вод Республики Беларусь, проблемы водоснабжения и способы их решения / О. В. Немеровец, Ю. А. Медведева // Горный журнал. – 2020. – № 11. – С. 61–66.

12. Ivashchkin, V. V. Two-column two-filter water intake well and the method of its calculation / V. V. Ivashchkin, J. A. Medvedeva, E. S. Sacuta // E3S Web of Conferences / ed. V. S. Litvinenko. – St. Petersburg, 2021. – Vol. 266 : Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2021, Saint Petersburg, May 31– June 6, 2021. – Art. id. 07008.

13. Ивашечкин, В. В. Двухколонная водозаборная скважина и расчет режимов ее работы / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 57–61.

14. Ивашечкин, В. В. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 5. – С. 451–462.

Статьи в сборниках научных трудов, материалы конференций и тезисы докладов

15. Новые конструкции ремонтнопригодных водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, А. И. Притыка, А. В. Петрик, Ю. А. Медведева (Бобкова), К. Н. Федарович, Н. А. Рудьман, С. С. Казак // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 2. – С. 169.

16. 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. Медведева (Бобкова) // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2013. – Т. 2. – С. 109–110.

17. Совершенствование технологий капитального ремонта водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, М. П. Магарян, Ю. А. Медведева (Бобкова), А. А. Корсюк // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2015. – Т. 1. – С. 142.

18. Медведева, Ю. А. Регенерация водозаборных скважин реагентным методом / Ю. А. Медведева // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 147.

19. Медведева, Ю. А. Регенерация водозаборных скважин циркуляционно-реагентным методом / Ю. А. Медведева // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30 марта 2017 / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Ю. Солодовников [и др.]. – Минск, 2017. – С. 435–436.

20. Медведева, Ю. А. Лабораторные исследования фильтрационного потока в прифильтовой зоне двуствольной скважины при ее затрубной регенерации / Ю. А. Медведева, А. Ю. Кочергин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 203.

21. Медведева, Ю. А. Регенерация скважин на воду путем закачки реагента в ремонтные мелкотрубчатые скважины / Ю. А. Медведева // Проблемы гидро-

пользования : материалы междунар. форум-конкурса молодых ученых, Санкт-Петербург, 19–21 апр. 2017 г. / редкол.: В. Л. Трушко [и др.]. – СПб., 2017. – Ч. 1. – С. 41–43.

22. Ивашечкин, В. В. Многоствольные водоприемные сооружения для забора подземных вод / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей : материалы юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию создания гидротехнической лаборатории им. проф. В. Е. Тимонова, Санкт-Петербург, 14–15 нояб. 2017 г. / под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. – СПб., 2017. – Т. 1. – С. 149–157.

23. Медведева, Ю. А. Регенерация фильтров скважин способом поинтервального свабиrowания в реагенте / Ю. А. Медведева // Проблемы недропользования : материалы междунар. форум-конкурса молодых ученых, Санкт-Петербург, 18–20 апр. 2018 г. / редкол.: И. Б. Сергеев [и др.]. – СПб., 2018. – Ч. 1. – С. 80–83.

24. Ивашечкин, В. В. Регенерация водозаборных скважин методом линейного свабиrowания / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 1. – С. 164.

25. Медведева, Ю. А. Лабораторные и натурные исследования двухколонной водозаборной скважины / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, А. Ю. Кочергин // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы междунар. конф., Минск, 23–26 окт. 2018 г. / сост.: В. А. Сернов [и др.]. – Минск, 2018. – С. 132–138.

26. Медведева, Ю. А. Двухствольная водозаборная скважина / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения : материалы междунар. конф., посвящ. 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февр. 2019 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 96–99.

27. Медведева, Ю. А. Устройство для обследования пескующих скважин / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения : материалы междунар. конф., посвящ. 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февр. 2019 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 100–104.

28. Медведева, Ю. А. Двухколонная двухфильтровая скважина для обеспечения бесперебойного водоснабжения / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин // Яковлевские чтения : сб. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти академика РАН С. В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ», Москва, 14–15 марта 2019 г. / Моск. гос. строит. ун-т. – М., 2019. – С. 112–116.

29. Medvedeva, J. A. Double-column double-filter water well / J. A. Medvedeva // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources : XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers, Saint Petersburg, 13–17 May 2019 : sci. conf. abstr. / ed.: I. V. Sergeev [et al.]. – St. Petersburg, 2019. – P. 298.

30. Медведева, Ю. А. Полевые испытания двухколонной водозаборной скважины / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы 15 Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энер-

гетики, Минск–Тула–Донецк, 29–30 окт. 2019 г. : в 4 т. / под общ. ред. А. Б. Копылова, И. А. Басалай. – Минск, 2019. – Т. 1. – С. 154–158.

31. Медведева, Ю. А. Двухуровневая скважина для забора подземных вод / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // Вода. Газ. Тепло 2020 : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Белорус. нац. техн. ун-та, 100-летию каф. «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию каф. «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8–10 окт. 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2020. – С. 188–192.

32. Медведева, Ю. А. Определение КПД насоса-гидроэлеватора [Электронный ресурс] / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы респ. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 мая 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

33. Медведева, Ю. А. Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин глубиной до 70 метров / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // Новые горизонты – 2021 : сб. материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, Минск, 11–12 нояб. 2021 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2021. – Т. 2. – С. 56–58.

34. Медведева, Ю. А. Энергоэффективная эксплуатация скважинных водозаборов / Ю. А. Медведева // Актуальные проблемы недропользования: материалы междунар. форум-конкурса молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 г. / редкол.: И. Б. Сергеев [и др.]. – СПб., 2022. – Т. 3. – С. 127–129.

35. Конструктивные особенности скважин для забора воды из подземных источников [Электронный ресурс] / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, А. В. Чиникайло // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Респ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апр. 2022 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Методический документ в строительстве

36. Рекомендации по проектированию, сооружению и эксплуатации двухколлонных двухфилтровых водозаборных скважин : Р 4.01.197-2023 : срок действия с 06.12.2023 г. до 06.12.2028 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; сост.: В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. – Минск : БНТУ, 2023. – 67 с.

Патенты на изобретение

37. Способ регенерации фильтра водозаборной скважины : пат. ВУ 22256 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. – Оpubл. 30.12.2018.

38. Конструкция водозаборной скважины : пат. ЕА033351В1 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева, А. Н. Курч. – Оpubл. 30.09.2019.

39. Водозаборная скважина : пат. ВУ 23608 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. – Оpubл. 30.12.2021.

РЭЗІЮМЭ

Мядзведзева Юлія Аляксандраўна

Двухкалонныя двухфільтравыя водазаборныя свідравіны і метады аднаўлення іх дэбіту

Ключавыя словы: двухкалонная двухфільтравая свідравіна, фільтр, кальматаж, рэгенерацыя, свабаванне, пескаванне, гідраэлеватар

Мэта даследавання: распрацоўка канструкцый двухкалонных двухфільтравых водазаборных свідравін і метадаў аднаўлення іх дэбіту.

Метады даследавання і апаратура: для даследаванняў прымяняліся лабараторны і натурны эксперыменты, камп'ютарнае мадэляванне, прыборы і абсталяванне для вывучэння свідравін.

Вынікі даследавання і іх навізна. Распрацаваны новыя канструкцыі высокадэбiтных рамонтапрыдатных двухкалонных двухфільтравых свідравін для эксплуатацыі аднаго або больш ваданосных гарызонтаў, метадыка разліку іх канструктыўных параметраў і атрыманы залежнасці для разліку прытоку вады да свідравін, якія ўключаны ў метадычны дакумент Р 4.01.197-2023 «Рэкамендацыі па практаванні, будаванні і эксплуатацыі двухкалонных двухфільтравых водазаборных свідравін». Распрацавана метадыка разліку рэжымаў рэагентнай рэгенерацыі свідравін для рэалізацыі спосабу лінейнага свабавання ў замкнёных камерах. Праведзены натурныя выпрабаванні прылады для вызначэння месцаў пескавання свідравіны шляхам кантролю каламутнасці вады па яе глыбіні. Разгледжаны працоўны працэс гідраэлеватарнай устаноўкі з размывальным насадкам для выдалення пяску са свідравін.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацаваныя канструкцыі двухкалонных двухфільтравых свідравін, спосабы дыягностыкі, рамонту і рэагентнай рэгенерацыі свідравін могуць выкарыстоўвацца практычнымі і будаўнічымі арганізацыямі для павышэння даўгатрываласці водазабораў падземных вод.

Галіна прымянення: сістэмы камунальнага і вытворчага водазабеспячэння, вертыкальнага дрэнажу.

РЕЗЮМЕ

Медведева Юлия Александровна

Двухколонные двухфилترовые водозаборные скважины и методы восстановления их дебита

Ключевые слова: двухколонная двухфилтровая скважина, филтвр, кольматаж, регенерация, свабирование, пескование, гидроэлеватор

Цель исследования: разработка конструкций двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин и методов восстановления их дебита.

Методы исследования и аппаратура: для исследований применялись лабораторный и натурный эксперименты, компьютерное моделирование, приборы и оборудование для изучения скважин.

Результаты исследования и их новизна. Разработаны новые конструкции высокодебитных ремонтпригодных двухколонных двухфилтровых скважин для эксплуатации одного или более водоносных горизонтов, методика расчета их конструктивных параметров и получены зависимости для расчета притока воды к скважинам, которые включены в методический документ Р 4.01.197-2023 «Рекомендации по проектированию, сооружению и эксплуатации двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин». Разработана методика расчета режимов реагентной регенерации скважин для реализации способа линейного свабирования в замкнутых камерах. Проведены натурные испытания устройства для определения мест пескования скважины путем контроля мутности воды по ее глубине. Рассмотрен рабочий процесс гидроэлеваторной установки с размывающим насадком для удаления песка из скважин.

Рекомендации по использованию. Разработанные конструкции двухколонных двухфилтровых скважин, способы диагностики, ремонта и реагентной регенерации скважин могут использоваться проектными и строительными организациями для повышения долговечности водозаборов подземных вод.

Область применения: системы коммунального и производственного водоснабжения, вертикального дренажа.

SUMMARY

Medvedeva Yuliya

Double-column double-filter water wells and methods for restoring their flow

Keywords: double-column double-filter well, filter, colmatage, regeneration, swabbing, sanding, hydraulic elevator

Purpose of the study: development of designs for double-column double-filter water intake wells and methods for restoring their flow rate.

Research methods and equipment: laboratory and field experiments, computer modeling, instruments and equipment for studying wells were used for research.

Research results and their novelty. New designs of high-yield repairable double-column double-filter wells for the exploitation of one or more aquifers as well as the technique of their design parameters calculation have been developed. The formulas to calculate the water inflow to the wells which are included in the guidance document 4.01.197-2023 «Recommendations on the design, construction and operation of double-column double-filter water intake wells» have been obtained. The technique of reagent regeneration modes calculation in wells to realize the method of linear swabbing in closed chambers has been worked out. Full-scale testing of the device was carried out to determine the locations of well sanding by controlling water turbidity along its depth. The working process of a hydraulic elevator installation with a scouring nozzle for removing sand from wells is considered.

Recommendations for use. The developed designs of double-column double-filter wells, diagnostics methods, repair and reagent regeneration of wells can be used by design and building companies to increase groundwater intakes durability.

Scope of application: municipal and industrial water supply systems, vertical drainage.

Научное издание

МЕДВЕДЕВА
Юлия Александровна

**ДВУХКОЛОННЫЕ ДВУХФИЛЬТРОВЫЕ
ВОДОЗАБОРНЫЕ СКВАЖИНЫ
И МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ДЕБИТА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

В авторской редакции

Подписано в печать 23.05.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,66. Тираж 70. Заказ 343.

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.