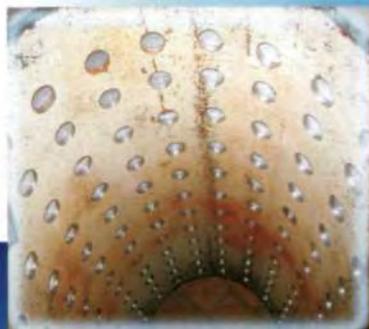


**В.В. Ивашечкин  
А.М. Шейко  
А.Н. Кондратович**

# **Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения**



**Минск 2008**

В.В. ИВАЩЕЧКИН  
А.М. ШЕЙКО  
А.Н. КОНДРАТОВИЧ

РЕГЕНЕРАЦИЯ СКВАЖИННЫХ  
И НАПОРНЫХ ФИЛЬТРОВ СИСТЕМ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*Монография*

Минск БНТУ 2008

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 11 от 27.10.2008 г.)

**Ивашечкин, В.В.**

Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения: монография / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 277 с.

ISBN 978-985-525-065-5.

В книге выполнен обзор ряда существующих высокоэнергетических импульсных и основных реагентных методов восстановления дебита скважин на воду, а также способов регенерации напорных фильтров систем водоснабжения. Предложены математические модели процесса пульсаций в скважине продуктов взрыва, находящихся в открытой снизу жесткой камере, а также продуктов цилиндрического и сферического газового взрывов, заключенных в эластичные оболочки, горизонтальной циркуляции реагента в пласте совершенной скважины, процесса промывки сетчатых напорных фильтров при газоимпульсной регенерации.

Описаны измерительные схемы, результаты лабораторных и производственных экспериментов по регенерации скважинных и напорных фильтров.

Монография предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами сооружения и эксплуатации скважин на воду, аспирантов и студентов старших курсов высших технических учебных заведений.

Табл. 17. Рис. 75. Библиогр. 153 назв.

#### **Рецензенты:**

*Э.И. Михневич*, доктор технических наук, профессор

*В.И. Байков*, доктор технических наук, профессор

ISBN 978-985-525-065-5

© Ивашечкин В.В., Шейко А.М.,  
Кондратович А.Н., 2008  
© БНТУ, 2008

## Введение

Надежность и долговечность водозаборных скважин зависит от качества бурения и освоения водоносных горизонтов, а также от эффективности ремонтов и технического обслуживания.

В процессе работы скважин происходит снижение их удельного дебита в результате процессов механического, биологического и химического кольматажа. Химический кольматаж вызван изменением гидродинамической обстановки в пласте при работе скважины и считается неизбежным процессом. Общая производительность водозаборов подземных вод уменьшается и возникает необходимость в бурении новых скважин.

Стоимость бурения одного погонного метра высокодебитной скважины составляет уже более 500\$ США. Количество вновь сооружаемых скважин может быть уменьшено, если с момента начала эксплуатации скважин проводить наблюдения за изменением их удельных дебитов и своевременно производить текущие ремонты, заключающиеся в удалении осадков, закупоривающих фильтр и гравийную обсыпку.

При выборе технологии ремонтных работ следует исходить из возможностей каждого способа декольматации фильтров скважин.

Как известно, импульсные методы декольматации обладают высокой эффективностью при обработках скважин с небольшими сроками эксплуатации и малоэффективны в длительно-эксплуатирующихся скважинах, для которых характерны прочные дегидратированные отложения. Межремонтный период импульсных способов составляет менее одного года, в связи с остаточной насыщенностью кольматантом прифильтровой зоны.

Последовательное или одновременное импульсно-реагентное воздействие следует назначать для скважин, в которых импульсная обработка уже неэффективна. Такие обработки сочетают в себе механическое разрушение осадков и химическое их растворение, для них характерна высокая степень удаления отложений и большой межремонтный период.

В последнее время в Республике Беларусь для восстановления дебита скважин начали применяться новые газоимпульсные, реагентные и комбинированные технологии, основанные на использовании газового взрыва водородно-кислородной смеси (ВКГС) и го-

ризонтальной циркуляции растворов порошкообразных реагентов. Имеется опыт применения газоимпульсной технологии для восстановления пропускной способности сетчатых напорных фильтров систем водоснабжения.

Цель предлагаемой монографии – дать наиболее полное представление о существующих способах регенерации скважинных и напорных фильтров и области их применения, ознакомить с новыми технологиями и теоретическими подходами к их научному обоснованию.

Основные результаты, отражённые в настоящей книге, получены при выполнении НИР на кафедре «Гидравлика» БНТУ.

Введение, главы 2, 3, 6, 7 и разделы 1.1, 1.2 написаны канд. техн. наук, доц. В.В. Ивашекиным, главы 4, 5 и раздел 1.3 – ассистентом А.М. Шейко, разделы 3.4 и 3.5 – ст. преподавателем А.Н. Кондратовичем.

Авторы благодарны доц. Д.А. Козлову, доц. В.В. Веремеенку, ст. преподавателю Добрияну Г.К., аспиранту Пулко Ю.В. за участие в исследованиях и апробации полученных решений; работникам Министерства ЖКХ (Сушко С.А.) и УП «Минскводоканал» (И.А. Герасименку, Н.И. Круку, Н.В. Холодинской, И.И. Янковскому, Т.Ю. Вакуленко) за участие во внедрении технологий в производство; директору фирмы «Oil-Engineering» (г. Уфа) (канд. техн. наук В.П. Дыбленко и сотрудникам И.А. Туфанову, А. Лысенкову и др.) за оказанную безвозмездную материально-техническую и научно-практическую помощь при разработке и внедрении технологии виброволнового воздействия.

Авторы благодарят рецензентов: д-ра техн. наук, проф. Михневича Э.И. и д-р техн. наук, проф. В.И. Байкова, а также канд. техн. наук, доц. В.Н. Ануфриева за критические замечания, которые были учтены при подготовке к изданию данной монографии.

# **Глава 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ И РЕАГЕНТНЫХ МЕТОДОВ РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН**

## ***1.1. Высокоэнергетические импульсные методы***

Импульсные методы освоения новых и декольматации старых скважин входят в группу физических методов стимулирования водоотбора [1].

К основным высокоэнергетическим импульсным методам относятся: взрыв зарядов взрывчатых веществ (ВВ), электрогидродарный и пневмовзрывной методы. Значительный вклад в их разработку внесли В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев, Н.И. Богданов, В.А. Романенко, С.А. Ловля, М.А. Шляйферт, Э.М. Вольницкая, В.Г. Склянский и др. [1–5].

Основной задачей импульсных методов является разрушение, диспергирование и удаление кольматирующих отложений из фильтра и прифильтровой зоны, а при работе в полускальных породах - создание искусственной трещиноватости. Энергия передается фильтру в виде ударной волны, волн сжатия и разрежения, гидропотока в полости фильтра и соответствующего знакопеременного фильтрационного потока в пористой среде. Это позволяет существенно восстановить проницаемость фильтров и прифильтровых зон скважин при небольших сроках их эксплуатации.

В длительно эксплуатирующихся скважинах происходит дегидратация железистых соединений и образуется цемент обрастания, который прочно скрепляет частицы песка и гравия в прифильтровой зоне, образует наросты в отверстиях и на внутренней поверхности фильтровой колонны.

На рисунке 1.1 представлены фотографии кольматанта, извлеченного эрлифтом из скважины №12 водозабора «Новинки» г. Минска после газоимпульсной обработки фильтра взрывами ВКГС 25 июля 2008 года.



Рис. 1.1. Фотографии образцов кольматанта скважины №12 водозабора «Новинки»

Скважина пробурена в 1974 году, оборудована проволочным фильтром диаметром 12 дюймов на трубчатом перфорированном каркасе. Кольматант был извлечен с поверхности и из отверстий каркаса импульсами давления. Химический состав кольматанта следующий:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -81,16%;  $\text{SiO}_2$ -3,73%;  $\text{TiO}_2$ -0,01%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -0,08%;  $\text{MnO}$ -0,18%;  $\text{CaO}$ -0,76%;  $\text{MgO}$ -0,27%;  $\text{K}_2\text{O}$ -0,07%;  $\text{Na}_2\text{O}$ -0,12%;  $\text{P}_2\text{O}_5$ -0,4;  $\text{SO}_3$ -0,2; потеря при прокаливании – 13,53%. Минералогический анализ показал, что магнитная фракция представлена железистой стружкой землисто-бурого цвета, угловатой, неправильно-таблитчатой формы; тяжелая фракция представлена гидроокислами железа бурого цвета неправильной угловато-окатанной формы; легкая фракция также представлена гидроокислами железа бурого цве-

та неправильной угловато-окатанной формы (35%), кварцем желтоватого цвета (60%); лейкоксеном буровато-белого цвета неправильной формы (5%). Происхождение железистой стружки в пробах объясняется, видимо, наличием заусениц на поверхности трубы при сверлении отверстий на заводе-изготовителе. Заусенцы и отверстия перфорации, имеющие развитую поверхность, при работе фильтра стали центрами аккумулярования кольматанта. Степень зарастания некоторых отверстий была близка к 100% (см. рисунок 1.1). В результате газоимпульсной и виброимпульсной обработок без применения реагента, удалось восстановить удельный дебит скважины на 65%.

Результаты обработок скважин подтверждают, что импульсное воздействие неспособно раздробить сцементированный кольматант на всю глубину его распространения до такой степени, чтобы удалить его через отверстия водопримной поверхности фильтра. Высокоэнергетическая импульсная обработка создает благоприятные условия для последующих химических обработок, так как раздробленный и разрыхленный кольматант имеет более развитую поверхность и лучше растворяется специально подобранными реагентами. В работах [6-8] разработаны рекомендации по применению перечисленных методов в сочетании с реагентными методами.

Рассмотрим основные высокоэнергетические импульсные методы регенерации скважин на воду.

**Взрыв зарядов ВВ.** Здесь используется энергия детонационного превращения твердых ВВ. Разрушающие факторы: ударная волна, волны сжатия и фильтрационные потоки переменного направления, возникающие при пульсациях газообразных продуктов взрыва. Метод имеет наибольшую из всех импульсных методов долю энергии, переносимую ударной волной (>50%), причем ударная волна и динамическое воздействие жидкости при взрыве направлены под прямым углом к фильтру и, что очень важно, создают равномерно-распределенную импульсную нагрузку.

ВНИПИ взрывгеофизикой разработаны конструкции торпед детонирующих шнуровых ТДШ-25 и ТДШ-50 с диаметрами кабельных головок 25 и 50мм для увеличения производительности скважин в нефтедобывающей промышленности. Торпеды впоследствии стали использовать для разглиннизации скважин на воду в трещиноватых горизонтах. Для обработки водозаборных скважин, оборудо-

ванных фильтрами, разработана торпеда ТДШ-В, имеющая специальные центраторы для установки заряда по оси фильтра. Это снижает вероятность разрыва фильтрующих покрытий. Шнур подрывают обычно с помощью электродетонатора. Торпеда ТДШ-В имеет следующие характеристики: максимальный наружный диаметр торпеды без центраторов – 60 мм; длина торпеды – (1–10)м; число отрезков детонирующего шнура – (1–2); тип центраторов – сменные.

Технология обработки следующая. Собирают торпеду у оголовка скважины, причем ее длину принимают равной длине фильтра. Собранный торпеду с центраторами опускают в скважину. Детонатор устанавливают перед самым спуском и размещают его так, чтобы он находился вне зоны рабочей части фильтра. Не допускают ситуации, когда груз торпеды упирается в отстойник скважины. Режимы обработки скважин с помощью ТДШ-В приведены в [4].

В последнее время метод ограниченно применяется в водозаборных скважинах из-за специальных требований техники безопасности при работе с твердыми ВВ и опасности разрушения фильтров.

**Электрогидроударный (ЭГ) метод.** Метод основан на импульсном выделении энергии при высоковольтных электрических разрядах в полости фильтра. Принципиальная схема ЭГ-установки для осуществления разрядов в скважине представлена на рисунке 1.2.

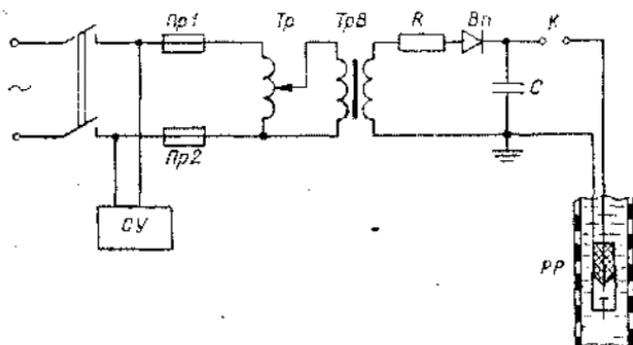


Рис. 1.2. Электрическая схема ЭГ-установки [4]:

*РР* – рабочий разрядник; *СУ* – система управления; *Pr1, Pr2* – предохранители; *Tr* – витотрансформатор; *TrB* – высоковольтный трансформатор; *R* – зарядное сопротивление; *Вп* – выпрямитель; *С* – конденсатор; *К* – коммутатор

Здесь применяется наиболее простая схема разрядного контура, в котором все основные элементы (конденсатор  $C$ , высоковольтный коммутатор  $K$  и рабочий разрядник  $PP$ ) соединены последовательно. Оборудование ЭГ-установок производят в г. Николаев (Украина).

При ЭГ-обработке скважин разрядник на коаксиальном кабеле с помощью лебедки опускают в зону фильтра и совершают его поинтервальную обработку. В диапазоне напряжений (1-100 кВ), применяемых на практике, происходит пробой межэлектродного промежутка, в котором находится вода, и образование канала разряда. Давление в канале повышается, что сопровождается его расширением. Скорость расширения канала может быть соизмерима со скоростью звука в жидкости и в этих случаях волна сжатия может иметь вид ударной волны. На этой стадии давление может увеличиваться при росте объема канала и достигать 100 МПа. На послеразрядной стадии канал превращается в газовый пузырь, который вначале расширяется, а затем под действием гидростатического давления движется в обратную сторону. При схлопывании пузыря давление газа возрастает, и пузырь совершает несколько затухающих пульсаций [9]. Ударная волна, распространяясь в радиальном направлении, производит разрушение и диспергирование коагулирующих отложений, а интенсивный поток воды при пульсациях пузыря отрывает разрушенные отложения от поверхности фильтра.

Энергия волн сжатия, излучаемых на стадии разряда (до 20%) и энергия пульсаций газового пузыря, равная потенциальной энергии пузыря в момент максимального объема (до 30%), составляют работу, совершаемую каналом. Энергия пульсаций затрачивается на излучение волн сжатия и разряднения.

Основными разрушающими факторами ЭГ-метода являются ударная волна и волны сжатия. Влияние фильтрационных потоков невелико ввиду малого объема газового пузыря. Следовательно, наибольшей эффективностью ЭГ-метод обладает при регенерации фильтров диаметром 125–200 мм. Метод менее эффективен в фильтрах диаметром 250–300 мм, что подтверждается при ремонтных работах на высокодебитных скважинах УП «Минскводоканал». ЭГ-установки работают при высоких напряжениях (30–50) кВ, что повышает опасность для обслуживающего персонала, усложняет

эксплуатацию установок и ограничивает их применение. Рациональный межремонтный период составляет 7 месяцев [1].

**Пневмовзрывной метод.** Основан на использовании энергии сжатого воздуха, который, истекая в полость фильтра, расширяется и совершает механическую работу. При производстве пневмовзрывной обработки в фильтр опускают специальный пневмоснаряд, соединенный с баллонами сжатого воздуха (рисунок 1.3).

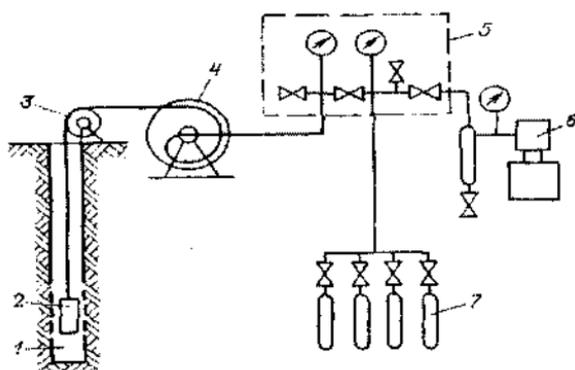


Рис. 1.3. Принципиальная схема установки для пневмовзрывной обработки скважин [4]:  
1-скважина; 2-пневмокамера; 3-направляющий блок; 4-лебедка;  
5-щит управления; 6-компрессорный агрегат; 7-баллоны

При заполнении пневмокамеры, входящей в состав пневмоснаряда геометрическим объемом  $V_1 = (0,5 - 1) \text{ дм}^3$ , происходит срабатывание специального клапана, и сжатый воздух через окна истекает в воду скважины. Образуется воздушный пузырь, который, претерпевая несколько затухающих пульсаций, всплывает вверх.

В связи с тем, что выхлоп сжатого воздуха происходит в кольцевой зазор между пневмоснарядом и стенкой фильтра через окна, направленные в сторону водопрямной поверхности, не исключена возможность попадания большого количества воздуха в прифильтровую зону. Защемленные в порах обсыпки пузырьки воздуха, содержащие кислород, снижают её проницаемость и усиливают биологический кольматаж.

При работе пневмоснаряда ударная волна отсутствует, а энергия первой акустической волны составляет 2-3% от общей энергии при начальном давлении в камере 10,0 – 12,0 МПа [10], поэтому большая часть энергии выхлопа затрачивается на пульсации воздушного пузыря и создание гидротоков знакопеременного направления.

Установки для пневмоимпульсной обработки скважин серийно выпускаются в г. Подольске (Россия). Как следует из опубликованных данных, пневмоимпульсные установки АВПВ-150/150 и АСП-Т имеют предельную глубину обработки скважин – 150 м, что сужает область их применения. Энергия единичного воздействия здесь ограничена как мощностью применяемого оборудования, так и интенсификацией процессов биологического и химического коагюлятажа в связи с введением кислорода в прифильтровую зону скважины в процессе обработки. Рациональный межремонтный период составляет 5 месяцев [1].

## *1.2. Газоимпульсный метод регенерации фильтров скважин*

Метод основан на импульсном выделении энергии при окислении горючих газов, которая через воду передается закоагулированному фильтру посредством ударной волны и гидротока и восстанавливает его фильтрующую способность [2, 4, 11- 12].

Газоимпульсный метод также относится к высокоэнергетическим методам, так как позволяет осуществлять мощное ударное воздействие на фильтр, но более мягкое и безопасное, чем воздействие взрыва твердых ВВ. Он позволяет вести обработку фильтров с применением различных режимов химического превращения (взрывного горения и детонации), имеет малую стоимость, более безопасен в работе. Взрыв газовой смеси в полости фильтра сочетает в себе «мягкость» пневмовзрыва и «жесткость» электроразряда. По исследованиям [10] детонационный взрыв газовых смесей близок к пневмовзрыву. Энергия преломленной ударной волны, вызванной падением детонационной волны на границу раздела газ-вода при сферическом взрыве стехиометрической смеси пропан-бутан-кислород составляет 0,3% от полной энергии взрыва, а энергия фазы сжатия акустического сигнала первой волны давления – (1,5 – 2)%. Большая часть энергии подводного газового взрыва расходуется на расширение продуктов взрыва и создание гидротока.

Энергия, остающаяся в продуктах при максимальном расширении, расходуется на излучение волн сжатия и разрежения и другие потери.

Анализ газоимпульсного метода показывает, что при использовании 2-х режимов химического превращения горения и детонации, он обладает широким спектром разрушающих факторов: ударной волной (при детонации), волнами сжатия и разрежения, гидротоками знакопеременного направления, возникающими при пульсациях продуктов взрыва. Подводный газовый взрыв способен создать мощное динамическое воздействие на фильтр и инициировать знакопеременные фильтрационные потоки в прифильтровой зоне скважины.

Одна из первых принципиальных схем аппаратов для реализации этого метода была предложена Раменским ВНИИ геофизики [2]. Здесь баллоны с кислородом и энергоносителем, вместе с редукторами, дозаторами, смесителем и рабочей камерой опускают на каротажном кабеле в скважину, в которой должна осуществляться обработка фильтра. Однако из-за малых поперечных размеров водозаборных скважин реализация такой схемы трудновыполнима.

*Газоимпульсный метод на основе газовойдушной смеси.* В Ивано-Франковском институте нефти и газа разработана и опробована установка газоимпульсной регенерации фильтров с использованием газовойдушной смеси [11]. Газ и воздух, находящиеся в баллонах у устья скважины, по гибким шлангам подают в полость взрывной камеры, которая находится в фильтре в составе подвижного поршень-снаряда. В результате взрыва газовойдушной смеси поршень-снаряд смещается в стволе скважины и при своем движении создает отрицательные и положительные давления в зоне обработки. Испытания выявили область применения способа, который позволяет вести обработку фильтров на небольших глубинах.

*Газоимпульсный метод на основе ацетилено-воздушной смеси.* В.А.Романенко [4] предложено использование взрывов ацетилено-воздушной смеси в скважинах по 2-м схемам: верхними взрывами над поверхностью воды в скважине и нижними взрывами непосредственно в фильтре. Для реализации обеих схем используется ацетиленовый газогенератор, работающий на измельченном карбиде кальция, взрывная камера со свечей поджига. Способ испытан на 22 скважинах, что позволило восстановить их производительность в

диапазоне от 15 до 70% от первоначальной в зависимости от срока их эксплуатации. Работы по регенерации фильтров этим способом осложняются необходимостью подъема снаряда на поверхность и перезарядки карбидом кальция после каждого взрыва.

**Газоимпульсный метод на основе водородно-кислородной смеси.** В Белорусском национальном техническом университете разработан газоимпульсный метод на основе взрыва ВКГС, получаемой электролизом воды непосредственно в снаряде, находящемся в скважине [12].

Принципиальная схема установки для осуществления взрывов ВКГС в жидкости представлена на рисунке 1.4.

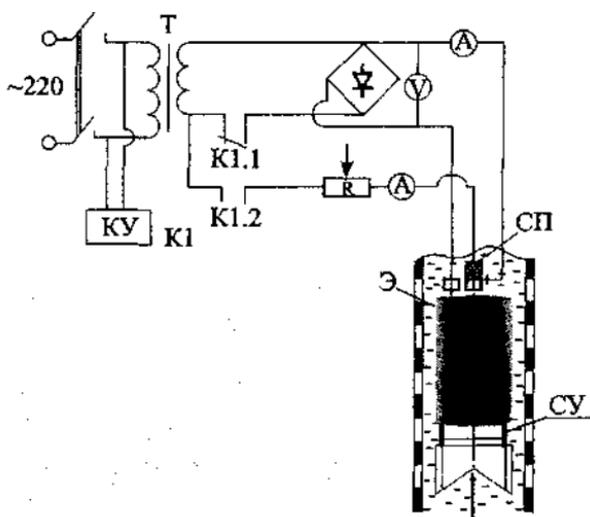


Рис. 1.4. Принципиальная схема установки для осуществления взрыва ВКГС в жидкости: КУ – командное устройство; Т – понижающий трансформатор; R – регулируемое сопротивление; СП – свеча поджига; Э – электролизер; СУ – скважинное устройство

Структурно схема состоит из 3-х контуров: 1) контура питания электролиза Э, содержащего выпрямитель, амперметр и вольтметр; 2) контура питания свечи поджига СП, содержащего регулируемое сопротивление R и амперметр; 3) контура питания командного устройства КУ, управляющего контактами K 1.1 и K 1.2.

Сопrotивление  $R$  используется для регулирования силы тока на спирали накаливания свечи поджига  $СП$ .

Система электропитания работает следующим образом. Выпрямленный и пониженный до необходимого значения, электрический ток подают на электроды электролизера Э. Длительность процесса электролиза зависит от задаваемой при обработке энергии в импульсе. Посредством электрического сигнала, поступающего из системы управления на командное устройство КУ, или внешним воздействием, электролизер Э обесточивают и подают напряжение на свечу поджига  $СП$ .

Газоимпульсный метод на основе взрыва ВКГС имеет ряд достоинств: 1) возможность получения ВКГС путем электролиза воды при безопасном напряжении непосредственно в зоне обрабатываемого фильтра, что не требует сложного оборудования для подачи газов на забой с поверхности и подъема устройства на поверхность для зарядки после каждого импульса; 2) метод экологически безопасен, так как продуктами взрыва ВКГС являются пары воды; 3) по характеру передачи энергии фильтру и прифилтровой зоне метод отличается от известных импульсных методов наличием имплозионного воздействия на кольматирующие отложения.

Дальнейшим развитием метода газоимпульсного воздействия на призабойную зону скважин стала разработка газодинамических генераторов импульсов для нефтяных скважин. Впервые газодинамический генератор импульсов ГДГ-116 был испытан в 1990 г. в НГДУ «Арланефть» ПО «Башнефть» и показал хорошую эффективность. К сожалению, дальнейшие работы по более широкому внедрению данного метода в практику эксплуатации и повышению производительности добывающих и нагнетательных скважин пришлось свернуть в связи с начавшимся в то время кризисом в нефтяной промышленности.

Опыт широкого использования импульсных методов для восстановления производительности водозаборных скважин показал, что не всегда удается достигнуть необходимых результатов, особенно на высокодебитных скважинах с большим сроком эксплуатации. Это заставляет искать новые, более эффективные, ранее не применявшиеся в практике повышения производительности водозаборных скважин методы или их комбинации с целью достижения максимально возможной степени восстановления удельного дебита.

К таким методам можно отнести метод виброимпульсного и метод импульсного и виброреагентного воздействия на призабойную зону скважины (ПЗС), где совместно с традиционными импульсными и реагентными методами, применяется виброволновое низкочастотное воздействие с возможностью изменения в широком диапазоне, как частоты, так и амплитуды давления.

### *1.3. Реагентные методы регенерации скважин*

#### *1.3.1. Анализ эффективности существующих реагентных методов и устройств регенерации скважин*

Реагентные методы регенерации скважин предполагают взаимодействие реагента с колюматирующим осадком, его растворение и последующее удаление продуктов за пределы скважины. Выбор типа реагента зависит от многих факторов, определяющими из которых являются: состав и состояние колюматированного осадка, конструкция фильтра и его состояние, способ реагентной регенерации и т.д. Для защиты фильтров и оборудования в процессе реагентных обработок применяется широкий спектр современных прогрессивных ингибиторов коррозии, как самостоятельных [13], так и входящих в полиреагент [14, 15].

Реагентные методы регенерации получили распространение как в Республике Беларусь, так и зарубежной практике эксплуатации водозаборных скважин [16–18]. Они отличаются технологической доступностью, могут применяться в различных гидрогеологических условиях на скважинах различного диаметра и глубины, оборудованных фильтрами различных конструкций.

Реагентные методы регенерации, являются перспективными для эффективного восстановления структуры, пористости и проницаемости прилегающих к фильтру пород и увеличения срока эксплуатации скважин [5, 19, 20]. При применении комбинированного метода регенерации значительную часть прироста удельного дебита и увеличения межремонтного периода удается достигнуть благодаря заключительной реагентной обработке скважины [20, 21]. Импульсные методы регенерации в большинстве случаев только разрушают колюматированный осадок, но не извлекают его за пределы прифилтровой зоны [18, 22].

В практике эксплуатации скважин могут применяться четыре основных реагентных способа регенерации: 1) реагентная ванна; 2) циклическое задавливание реагента за контур фильтра сжатым воздухом; 3) создание поля гидродинамических возмущений; 4) циркуляция реагента в прифильтровой зоне скважины.

**Способ реагентной ванны.** Предполагает заливку по трубкам реагента, который под влиянием процессов диффузии проникает за контур фильтра и растворяет осадки [1, 18]. Применение этого способа не требует дополнительного оборудования и герметизации оголовка скважины. Для эффективного растворения кольматирующего осадка может применяться соляная кислота [23]. Однако при ее использовании в качестве реагента могут выделяться опасные для здоровья продукты реакции: токсичные газы и, в частности, сероводород. Применение соляной кислоты также требует специальных мер по технике безопасности [18].

Обработка скважин методом реагентной ванны в общем случае обеспечивает незначительный прирост удельных дебитов скважин. Растворение кольматирующих соединений происходит в статических условиях, при которых продукты реакции кольматанта и реагента могут экранировать доступ поступающего реагента, что замедляет скорость процесса растворения [24, 25]. С увеличением скорости движения реагента число инертных частиц, экранирующих поверхность кольматирующих образований, уменьшается [24]. Таким образом, способ реагентной ванны является низкоэффективным.

**Способ циклического задавливания** реагента за контур фильтра сжатым воздухом был предложен В.М. Гаврилко в 1952 г., а в 1958 г. этот метод был опробован на одном из водозаборов г. Дзержинска. Благодаря простоте и сравнительно высокой эффективности этот способ является наиболее распространенным при текущих ремонтах водозаборных скважин.

Накоплен большой опыт применения этого способа при регенерации фильтров скважин [1, 5, 6, 26], в том числе на водозаборах Республики Беларусь [27–30].

Цикл обработки заключается в следующем [31]. 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, возвра-

щается в фильтр скважины, где, смешиваясь с реагентом, повышает свою концентрацию. Интервал между циклами задавливания принимается равным 5 – 10 минутам.

К основным недостаткам этого способа можно отнести:

- ограничение максимального размера обрабатываемой зоны объемом столба жидкости от статического уровня до верха фильтра из условия недопущения прорыва воздуха в прифильтровую зону;
- неравномерность очистки фильтра как по длине, так и по глубине прифильтровой зоны, так как в процессе задавливания сжатым воздухом реагент движется по наиболее проницаемым участкам прифильтровой зоны;
- не обеспечивается возможность регулирования размеров зоны обработки.

Известно устройство для реагентной обработки герметизированной скважины [32], которое позволяет осуществлять задавливание реагента с низким статическим уровнем воды над фильтром. Однако в этом случае количество отдавливаемой жидкости будет зависеть от объема корпуса устройства, который в свою очередь будет зависеть от диаметра фильтра и его длины. Размеры обрабатываемой зоны будут максимальны при условии, что диаметр корпуса будет приближен к диаметру скважины. Реагент, в этом случае, будет стремиться в нижнюю часть фильтра из-за характера естественной кольматации [1,33] и из-за более высокой плотности. В результате нижняя малозакольматированная и более проницаемая часть прифильтровой зоны скважины будет подвергнута обработке возвратно поступательным движением реагента.

Предложенный способ реагентной обработки скважин предполагает наличие многочисленных уплотнений, как в самой скважине, так и на её устье, а также наличие сложной водопроводной арматуры, контактирующей с реагентом.

*Способ, основанный на создании поля гидродинамических возмущений* [34], предполагает возвратно-поступательное движение реагента в прифильтровой зоне скважины (рисунок 1.5).

Реагентная обработка этим способом проводится на специализированных установках, реализующих все необходимые технологические приемы, включая приготовление растворов из порошкообраз-

ных реагентов, закачку их в зону фильтра, вакуумирование скважины и нагнетание в нее сжатого воздуха, эрлифтную прокачку.

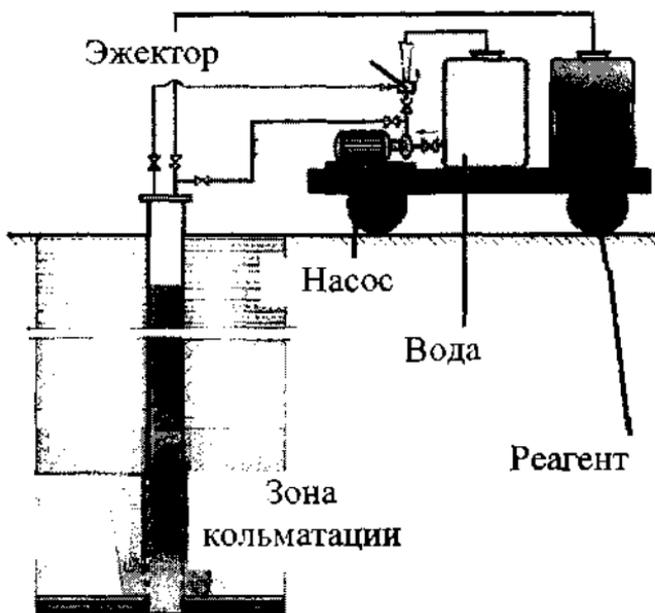


Рис. 1.5. Схема установки при создании гидродинамических возмущений

Этот способ обеспечивает более интенсивную регенерацию при-фильтровой зоны возвратно-поступательным движением реагента в отличие от циклического задавливания реагента сжатым воздухом. Однако так же, как и при циклическом задавливании, происходит проникновение реагента по наиболее проницаемым участкам при-фильтровой зоны, что влечет за собой неравномерную очистку фильтра и призабойной зоны скважины. Осадки, остающиеся после некачественной обработки скважины, представляют собой центры адсорбции соединений железа из подземных вод, и поэтому процессы коагуляции после обработки протекают достаточно интенсивно. При регенерации нет возможности регулирования размеров обрабатываемых зон в широком диапазоне. Данный способ также предполагает наличие громоздкого оборудования.

Таким образом, три вышеперечисленных способа реагентной регенерации скважин не способны обеспечить равномерную очистку фильтра и прифильтровой зоны.

Дальнейшее совершенствование технологий реагентной регенерации скважин привело к созданию способа, предполагающего принудительное циркуляционное движение реагента в прифильтровой зоне скважины. Циркуляционный способ обеспечивает более равномерное и интенсивное растворение коагулирующих отложений в закольматированной зоне.

### *1.3.2. Существующие циркуляционные способы регенерации: средства и пути совершенствования*

Основным отличием циркуляционных способов регенерации является разделение фильтра скважины во время обработки одним или несколькими горизонтальными пакерами на две либо несколько секций. Процесс циркуляции реагента происходит за счет того, что в одну секцию производится закачка реагента, а из другой одновременно – откачка. В результате такого деления фильтра на ряд секций закачки и откачки происходит циркуляция реагента в прифильтровой закольматированной зоне скважины.

Циркуляционные способы регенерации применяются в ряде таких стран, как США, Германия, Россия и др.

*Использование циркуляционных способов в США.* Известно устройство и способ для циркуляционной обработки фильтра и прифильтровой зоны скважины [35]. Устройство разделяет фильтр скважины во время обработки на три секции гидравлическими удлиненными пакерами. Две секции являются закачными и одна – откачная (рисунок 1.6). Циркуляционная обработка фильтра скважины происходит поинтервально на длину участка фильтра в зависимости от длины герметизированного пакера.

Недостатком данной технологии является то что, циркуляция реагента может происходить по наиболее проницаемым участкам: либо по пути от закачной до откачной секции через проницаемый грунт водоносного горизонта в обход закольматированной прифильтровой зоны, либо вдоль самого закольматированного фильтра скважины. В результате будут обработаны области прифильтровой зоны, которые непосредственно примыкают к секциям.

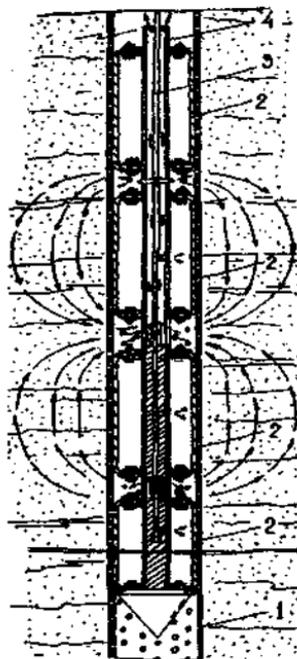


Рис. 1.6. Схема циркуляционной регенерации:  
 1 – фильтр; 2 – гидравлические пакеры; 3 – трубопровод для закачки реагента; 4 – колонна для отвода реагента

Е. John List в 1983 г. дал подробное теоретическое и экспериментальное описание процесса совмещенной механической и циркуляционной обработки прифилтровой зоны скважины, оборудованной гравийной обсылкой [36]. На рисунке 1.7 представлены основные схемы циркуляции жидкости в процессе свабирования и одновременного нагнетания рабочего агента в прифилтровую зону скважины. Такие способы обработки требуют наличия кранового оборудования для спускоподъемных работ и могут применяться с целью очистки прифилтровой зоны скважины от продуктов бурения в период освоения, а также скважин, эксплуатировавшихся непродолжительный промежуток времени. За это время кольматирующий осадок не успеет превратиться в прочную цементную корку и останется в рыхлом состоянии. Благодаря высокой проницаемости

фильтра и гравийной обсыпки в начальный период эксплуатации скважины, такие схемы обработки достаточно эффективны.

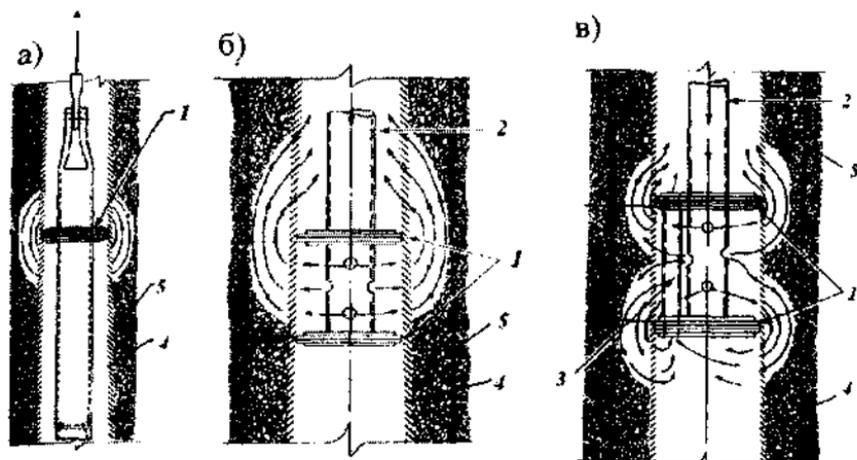


Рис. 1.7. Схема обработки скважины с гравийной обсыпкой:  
 а – линейное свабиrowание; б – свабиrowание без байпаса; в – свабиrowание с байпасом  
 1 – фланец; 2 – трубопровод для закачки реагента; 3 – байпас;  
 4 – фильтр скважины; 5 – гравийная обсыпка

**Использование циркуляционных способов в Германии.** Циркуляционные способы регенерации скважин получили широкое распространение на водозаборах Германии. Различные фирмы предлагают свои услуги по регенерации и санации водозаборных скважин. Фирма «Hölscher Wasserbau» [37] осуществляет циркуляцию путем подачи реагента самотеком из емкости, находящейся на устье скважины и откачку продуктов реакции насосом, установленным в скважине (рисунок 1.8). Процесс регенерации предусматривает установку устройства на нужном интервале фильтра скважины, регенерацию и откачку продуктов реакции. Основным недостатком данной схемы циркуляции является то, что давление в нагнетательной секции будет зависеть от гидростатического давления, создаваемого реагентом. При высоком расположении статического уровня, скорость заливки реагента будет очень низкой. Количество реагента, поступающего в нагнетательную секцию, будет недостаточно для полноценного растворения коагулирующего осадка, что при-

ведет к притоку воды к насосу из водоносного горизонта. Давление, создаваемое при таком расположении статического уровня, может быть недостаточным для продавливания реагента в прифильтровую закольцованную зону.

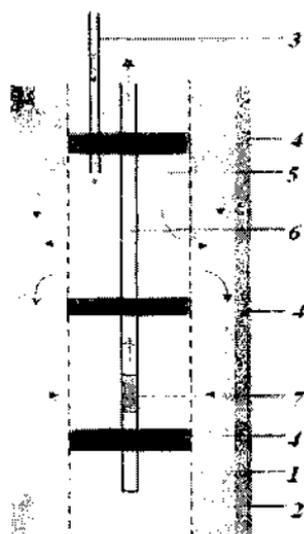


Рис. 1.8. Схема циркуляционной обработки скважины:  
 1 – фильтр; 2 – прифильтровая зона; 3 – подача реагента; 4 – пакеры;  
 5 – нагнетательная секция; 6 – напорный водовод;  
 7 – отвод продуктов реакции

По такому же принципу работают двухсекционные устройства циркуляционной регенерации, используемыми фирмами «Aqua Brunnen Service regenerierungstechnik» г. Мюнхен [38] и «AquaPlus Brunnenanierung» [39, 40], а также представленные в работах [41, 42].

Известное устройство для циркуляционной регенерации фильтра и прифильтровой зоны скважины [43, 44] включает в себя две секции, осевой насос, состоящий из электродвигателя и рабочего колеса, емкость для реагента, пульт управления и треногу (рисунок 1.9).

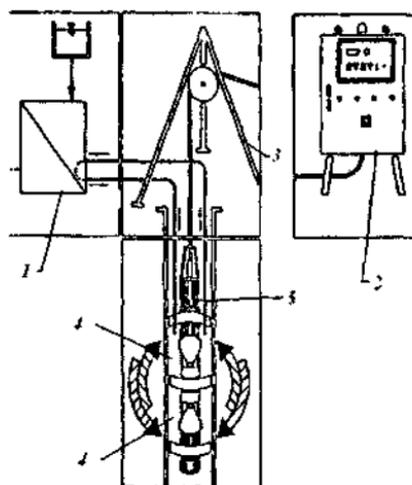


Рис. 1.9. Схема устройства циркуляционной регенерации:

- 1 – ёмкость для реагента; 2 – пульт управления;  
3 – тренога; 4 – секции; 5 – осевой насос

Благодаря реверсу электродвигателя погружное устройство работает при двух режимах обтекания жидкостью прифилтровой зоны (рисунок 1.10). Благодаря движению жидкости сначала в одном (рисунок 1.10 а), а затем в другом направлении (рисунок 1.10 б) происходит интенсификация растворения коагулирующего осадка фильтра и прифилтровой зоны. Однако так же, как и в предыдущем случае, данное устройство может быть использовано для повышения проницаемости гравийной обсыпки с незначительным количеством осадка, находящимся в пастообразном и рыхлопористом состоянии. При значительной коагуляции осадками, находящимися в цементированном состоянии, фильтр и прифилтровая зона имеет низкую проницаемость, в то время как применяемый здесь осевой насос рассчитан для использования при больших расходах, но при низких напорах подаваемой им жидкости [45, 46]. Создаваемый такими насосами напор может быть недостаточен для продавливания реагента за контур цементированного фильтра в закоагулированную прифилтровую зону.

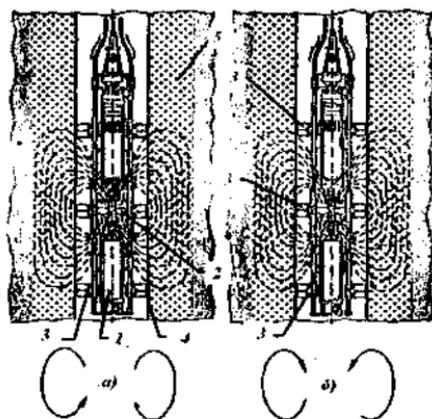


Рис. 1.10. Схема циркуляции при изменении направления движения жидкости:  
 1 – электродвигатель; 2 – рабочее колесо; 3 – пакеры; 4 – фильтр;  
 5 – гравийная обсыпка

Также представляет интерес технология циркуляционной регенерации, совмещенная с механической очисткой фильтра скважины, представленная фирмой ГмбХ R. Späne [47]. Помимо пакеров погружное устройство сверху и снизу снабжено щетками для механической очистки внутренней поверхности фильтра (рисунок 1.11).

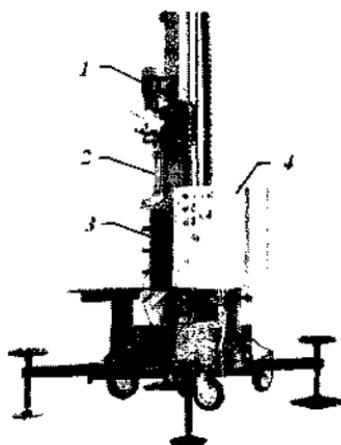


Рис. 1.11. Общий вид установки:  
 1 – электродвигатель; 2 – штанга;  
 3 – погружное устройство; 4 – пульт управления

Для тщательной механической очистки оно совершает круговые движения. Погружное устройство предполагает также движение реагента в противоположную сторону, тем самым, интенсифицируя процесс удаления коагулирующего осадка из прифильтровой зоны (рисунок 1.12). Вращательное движение устройства обеспечивается электродвигателем, установленным на общей раме (см. рисунок 1.11), а также наличием штанг для спускоподъемных работ, что ограничивает глубину обработки фильтра скважины. Так же, как и в предыдущем случае, максимальная эффективность очистки возможна при обработке скважин, на которых регулярно проводятся восстановительные мероприятия через промежуток времени, не превышающий межремонтный период для данной скважины.

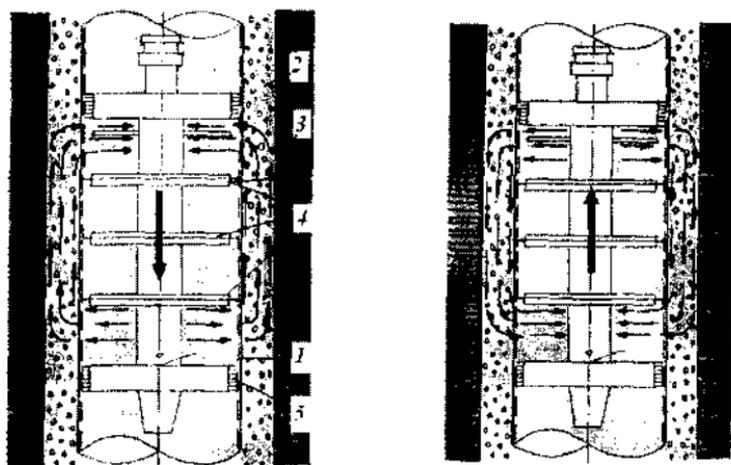


Рис. 1.12. Схема циркуляции при изменении направления движения жидкости:

- 1 – фильтр скважины; 2 – гравийная обсыпка; 3 – водоносный горизонт;  
4 – пакеры; 5 – щетка для механической очистки

**Использование циркуляционных способов в России.** Циркуляционные способы нашли применение на нефтяных и водозаборных скважинах, а также при добыче полезных ископаемых.

Наиболее полное исследование циркуляционной регенерации водозаборных скважин провел В.Г. Тесля [48–50]. Предложенный им способ циркуляционной регенерации скважин основан на разделении фильтра скважины пакером на две секции, в одну из которых

производится закачка жидкости, а из другой – откачка [51]. Для случая, когда циркуляционная установка представляет собой совершенную по степени вскрытия пласта скважину и длины секции фильтра для откачки и закачки жидкости равны, результирующее изменение напора в пласте определится на основе метода суперпозиции.

Анализ расчетных зависимостей показывает [50], что размеры зоны циркуляции на любой момент времени зависят от соотношения циркуляционного и откачного расходов  $Q_c / Q_o$  и длины пакера. Однако максимальные размеры зоны обработки, соответствующие поступлению в откачную секцию 95% закачиваемого расхода, вне зависимости от конструкционных установок составляют 1,4–1,6 м.

При разделении фильтра скважины на две секции регулирование размеров зоны циркуляции обеспечивается за счет изменения времени обработки, размеры зоны при этом определяются с помощью расчетных зависимостей. Однако сокращение общего времени обработки пласта приводит к тому, что нижняя часть вместе с участком откачной секции фильтра остаются необработанными. Поэтому в работе [50] были проанализированы многопакерные схемы с чередованием секций фильтра для закачки и откачки жидкости. В этом случае конечные размеры зоны циркуляции и продолжительность периода ее формирования также могут быть определены на основании расчетных зависимостей. Показано [51], что при установке в фильтре  $\bar{n}$  пакеров конечные размеры обрабатываемой зоны по сравнению с однопакерной схемой уменьшаются в  $\bar{n}$  раз, а общее время обработки сокращается в  $\bar{n}^2$  раз.

На основании исследований, В.Г. Теслей была предложена циркуляционная схема с установкой в фильтре негерметичных перегородок (дисков) [49]. Такая схема предназначена в первую очередь для обработки прифильтровых зон небольших размеров, так как здесь наряду с движением жидкости в прифильтровой зоне, имеет место и ее 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 [51].

На рисунке 1.13 показана схема оборудования скважины при циркуляционной регенерации.

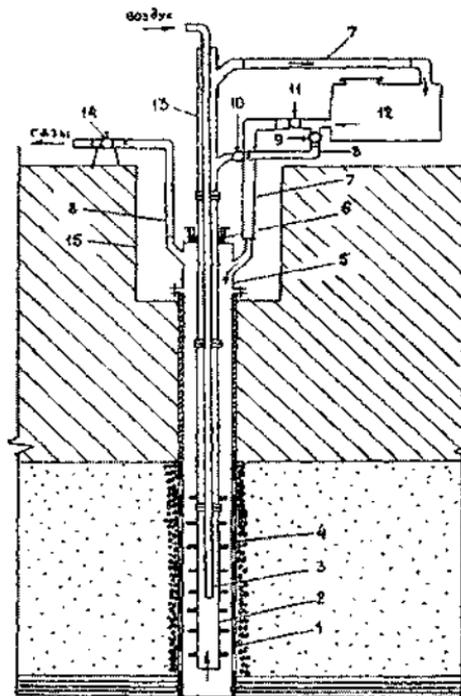


Рис. 1.13. Схема оборудования скважины при циркуляционной регенерации: 1 – фильтр; 2 – колонна эрлифта; 3 – воздухопроводная колонна; 4 – резиновые диски; 5 – оголовок; 6 – сальник; 7, 8 – резиновые шланги; 9, 10, 11, 14 – запорные элементы; 12 – емкость; 13 – оголовок эрлифта; 15 – шахтный колодец

Регулирование размеров обрабатываемой зоны обеспечивается за счет изменения времени обработки, диаметра дисков, расхода циркуляции, причем могут быть изменены как все величины одновременно, так каждая из них в отдельности.

К недостаткам предложенной технологии циркуляционной регенерации можно отнести следующие:

- низкая эффективность обработки прифилтровой зоны, вызванная движением реагента во время циркуляции в пространстве между негерметичным диском и цементированным закольматиро-

ванным фильтром, а также разбавление реагента во время регенерации водой из скважины и пласта. Сопротивление, создаваемое закольматированным фильтром и прифильтровой зоной, может быть значительно больше, чем сопротивление, создаваемое негерметичным диском. В результате этого, циркуляционный поток будет выходить в прифильтровую зону над верхним диском, сразу же возвращаться в фильтр под ним, проходить в фильтре между дисками и вновь вытесняться в зону над нижним диском;

- необходимость в герметизации оголовка скважины;
- невозможность обеспечения требуемого расхода при обработке скважины с неглубокой установкой фильтра в условиях эрлифтной откачки.

Таким образом, известные технологические схемы циркуляционной регенерации могут применяться для очистки прифильтровой зоны скважины от продуктов бурения в период ее освоения, а также скважин, эксплуатировавшихся непродолжительный промежуток времени, не превышающий межремонтный период. За это время кольматирующий осадок не успевает дегидратироваться и упрочниться. Благодаря высокой проницаемости фильтра и гравийной обсыпки в начальный период эксплуатации скважины такие схемы обработки могут быть эффективны при удалении рыхлого кольматирующего осадка. Поэтому для длительно эксплуатируемых скважин при цементированности кольматирующего осадка и большой глубине его распространения, целесообразно применение циркуляционно-реагентного способа, предполагающего деление фильтра скважины в процессе поинтервальной регенерации горизонтальными и вертикальными пакерами на нагнетательные и всасывающие сектора.

*Циркуляционная регенерация при делении фильтра скважины на нагнетательные и всасывающие сектора (горизонтальная циркуляция)*

На рисунке 1.14 представлена схема циркуляции реагента от нагнетательных к всасывающим секторам, образованных делением фильтра скважины в процессе поинтервальной регенерации горизонтальными и вертикальными пакерами.

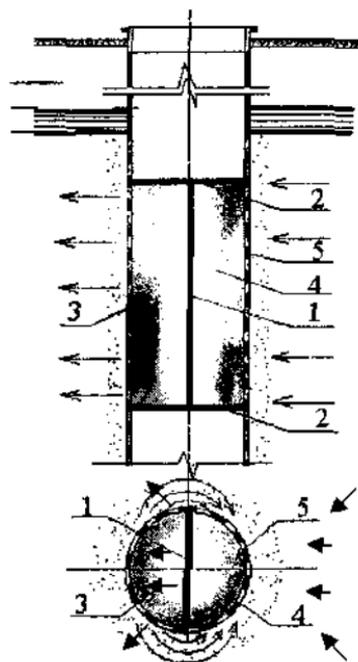


Рис. 1.14. Схема скважины при делении фильтра на сектора:  
 1, 2 – вертикальный и горизонтальный пакеры; 3, 4 – нагнетательный и всасывающий сектора; 5 – фильтр скважины

Осуществление циркуляции реагента в процессе регенерации скважины, разделенной на сектора, возможно с использованием секторного устройства циркуляционной регенерации (СУЦР). Данное устройство может быть выполнено на базе погружного электронасосного агрегата из коррозионно-стойких материалов.

Основными преимуществами предложенной схемы циркуляции являются:

- движение реагента от нагнетательных к всасывающим секторам через закольматированный фильтр в прифильтровую зону осуществляется равномерно по всей длине обрабатываемого интервала фильтра, что способствует одновременному взаимодействию кольматирующего осадка с реагентом по всей длине обрабатываемого интервала фильтра скважины в процессе регенерации;

- размеры обрабатываемой зоны не зависят от статического уровня в скважине; необходимость в герметизации оголовка скважины отсутствует;
- реагент в процессе обработки используется экономично, что достигается дозированием свежей порции реагента в обрабатываемый интервал фильтра скважины;
- обеспечение требуемого напора реагента, необходимого для продавливания реагента секторным устройством, выполненным на базе погружного электронасосного агрегата;
- простота в использовании компактного СУЦР, не требующего громоздкого технологического оборудования.

### *Выводы по главе I*

1. Традиционные высокоэнергетические импульсные методы не являются универсальными методами и по разрушающим факторам взаимно дополняют друга. Более широким спектром разрушающих факторов обладает газоимпульсный метод на основе ВКГС. Однако все известные методы недостаточно эффективны в длительно-эксплуатирующихся скважинах. Поэтому здесь более предпочтительно применение комбинированных импульсно-реагентных обработок.

2. Обработка скважин способом реагентной ванны в общем случае обеспечивает незначительное приращение удельных дебитов. Растворение кольматирующих соединений происходит в статических условиях, при которых продукты реакции кольматацта и реагента могут экранировать доступ поступающего реагента, что замедляет скорость процесса растворения, поэтому способ реагентной ванны является низкокэффективным.

3. Способ циклического задавливания реагента за контур фильтра имеет ряд недостатков. Максимальный размер обрабатываемой зоны ограничивается высотой столба жидкости от статического уровня до верха фильтра из условия недопущения прорыва воздуха в прифильтровую зону. В процессе задавливания сжатым воздухом реагент движется по наиболее проницаемым участкам прифильтровой зоны. Отсутствует возможность регулирования размеров обрабатываемых зон. В результате имеет место неравномерность реге-

нерации как по длине фильтра, так и глубине прифильтровой зоны скважины.

4. Способ, основанный на создании поля гидродинамических возмущений так же, как и при циклическом задавливании, предполагает проникновение реагента по наиболее проницаемым участкам прифильтровой зоны, что влечет за собой неравномерную ее очистку. Осадки, остающиеся после некачественной обработки скважины, представляют собой центры адсорбции соединений железа из подземных вод, и поэтому процессы кольматажа после обработки протекают достаточно интенсивно.

5. Представленные циркуляционные схемы и устройства для обработки скважин различного назначения в большинстве случаев не имеют теоретического обоснования выбора конструктивных и технологических параметров оборудования. Известные технологические схемы могут применяться с целью очистки прифильтровой зоны скважины от продуктов бурения в период освоения, а также скважин, эксплуатировавшихся непродолжительный промежуток времени, не превышающий межремонтный период. За это время кольматирующий осадок может находиться в рыхлом состоянии и не успеет дегидратироваться. Благодаря высокой проницаемости фильтра и гравийной обсыпки в начальный период эксплуатации скважины такие схемы обработки могут быть эффективны при удалении рыхлого или пластичного кольматирующего осадка.

6. Процесс растворения кольматирующих образований во многом интенсифицируется увеличением скорости движения потока реагента. Для равномерной очистки по всей длине фильтра и прифильтровой зоны скважины от цементированного кольматирующего осадка, целесообразно применять технологическую схему поинтервальной обработки с использованием СУЦР, предполагающего деление фильтра скважины в процессе регенерации горизонтальными и вертикальными пакерами на нагнетательные и всасывающие сектора.

7. Для повышения эффективности растворения отложений, реагентной регенерации должна предшествовать импульсная обработка фильтра, например газоимпульсная на основе ВКГС, т.е. обработка скважины должна быть комбинированной.

## Глава 2. ГИДРОДИНАМИКА ПОДВОДНОГО ГАЗОВОГО ВЗРЫВА В ЗАКОЛЬМАТИРОВАННОЙ ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЕ

### 2.1. Основные теоретические положения

Обычно, при реализации газомпульсной технологии на основе ВКГС фильтр обрабатывают поинтервально взрывами газовой смеси, которую накапливают в открытой снизу стальной взрывной камере [12]. Камера снабжена отражателем в нижней части для подвода энергии взрыва к поверхности фильтра. Недостатки применения подобной технологии: малый интервал активного воздействия на фильтр из-за ограниченной площади излучающей поверхности парогазового пузыря, расширяющегося вдоль оси фильтра, большие потери энергии из-за охлаждения перегретого пара в пузыре при прямом контакте с жидкостью и стальными стенками рабочей камеры.

Для создания равномерной нагрузки на фильтр, уменьшения напряжений на его локальных участках, подвода энергии взрыва нормально фильтру с наименьшими потерями энергии и исключения прямого контакта перегретого пара с жидкостью, перспективным представляется применение замкнутых цилиндрических и сферических взрывных камер с эластичными оболочками.

Целью исследования является выработка общего подхода к теоретическому расчету пульсаций продуктов взрыва в открытых снизу и замкнутых взрывных камерах, находящихся в закольматированных скважинах.

Теория пульсаций продуктов подводных взрывов твердых и газообразных взрывчатых веществ, а также расширение канала высоковольтного электрического разряда изучалась в условиях безграничной жидкости [9, 52]. При описании пульсаций продуктов газовых взрывов в условиях скважин имеют место другие граничные условия, нежели в безграничной жидкости. Рассмотрим газовый взрыв в скважине как процесс расширения продуктов взрыва во взрывной камере. Согласно первому закону термодинамики начальная энергия продуктов взрыва  $\mathcal{E}_0$  расходуется на увеличение их внутренней энергии  $W$  и на работу  $A$  над окружающей жидкостью.

Общее энергетическое уравнение, описывающее пульсации продуктов взрыва в скважине имеет вид

$$W + A = \mathcal{E}_1. \quad (2.1)$$

Работа продуктов взрыва  $A$  против сил внешнего давления при увеличении объема продуктов взрыва от  $V_1$  до  $V$  равна

$$A = \int_{V_1}^V p_I dV, \quad (2.2)$$

где  $p_I$  – давление на продукты взрыва со стороны жидкости в скважине в процессе пульсаций.

Давление  $p_I$  находим из уравнения Д. Бернулли на случай неустановившегося движения, записанного для сечений: I – I, проходящего по подвижной границе взрывной камеры, через которую передается давление на жидкость, и II – II, проходящего по уровню воды в скважине. При этом используем допущения: т.к. скорость расширения продуктов подводного газового взрыва в скважине невелика по сравнению со скоростью звука  $c$  в жидкости, жидкость можно считать несжимаемой; стенки скважины и закольматированного фильтра – абсолютно жесткими и непроницаемыми.

Выражение для определения давления  $p_I$  имеет вид

$$\frac{P_I}{\rho g} = (z_{II} - z_I) + \frac{P_{II}}{\rho g} + \left( \frac{\alpha_{II} v_{II}^2}{2g} - \frac{\alpha_I v_I^2}{2g} \right) + h_{тр I-II} + h_{ин I-II}, \quad (2.3)$$

где  $z_i$ ,  $p_i$ ,  $v_i$  – соответственно геометрическая высота положения центра тяжести сечения над плоскостью сравнения, давление в центре тяжести сечения, средняя скорость в сечении;  $h_{тр I-II}$  – потери напора на трение между сечениями;  $h_{ин I-II}$  – инерционный напор.

Для описания процесса взрывного превращения при детонации используем гипотезу «мгновенной детонации» [53,54], которая

предполагает, что в начальный момент времени перед расширением исходная газовая смесь превращается в газообразные продукты с некоторым средним и одинаковым по всему объему давлением  $p_1$ . Для взрывного горения, учитывая высокую скорость распространения взрыва, давление перед расширением  $p_1$  принимаем равным давлению, которое устанавливается в замкнутом объеме после взрыва. В общем случае для детонации и взрывного горения начальное давление продуктов взрыва перед расширением

$$p_1 = mp_0, \quad (2.4)$$

где  $m$  — степень повышения давления во взрывной камере, которая зависит от состава газовой смеси и вида химического превращения.

Предполагаем, что при дальнейшем расширении полости с продуктами взрыва изменение их состояния происходит по политропе со средним значением показателя  $n$ . Тогда связь между давлением газов  $p$  в полости и ее текущим объемом  $V$  имеет вид

$$p = p_1 \left( \frac{V_1}{V} \right)^n, \quad (2.5)$$

где  $V_1$  — начальный объем продуктов взрыва.

С учетом принятых допущений, упрощающих теоретическое решение, ниже рассмотрены основные гидродинамические задачи расчета пульсаций продуктов взрыва в скважине.

## *2.2. Гидродинамика подводного газового взрыва в полузамкнутой камере, находящейся в скважине*

Используя положения п. 2.1, рассмотрим процесс пульсаций продуктов взрыва газовой смеси в жесткой открытой снизу цилиндрической взрывной камере. Расчетная схема пульсаций представлена на рисунке 2.1.

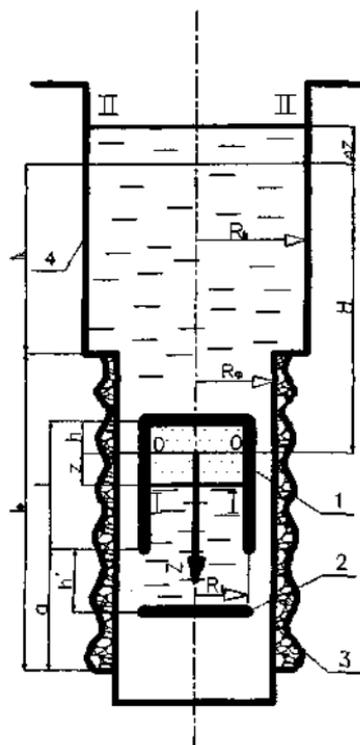


Рис. 2.1. Расчетная схема пульсаций продуктов газового взрыва в открытой снизу недеформируемой цилиндрической взрывной камере, находящейся в скважине: 1 – взрывная камера; 2 – отражатель; 3 – фильтр; 4 – колонна.

В фильтре скважины жестко закреплена взрывная камера с внутренним радиусом  $R_1$  и длиной  $l$ . Толщиной стенки камеры пренебрегаем по сравнению с ее радиусом. Полость взрывной камеры высотой  $h$  заполнена газообразным энергоносителем. Начальное давление  $p_0$  в полости равно абсолютному давлению  $p_{абс}$  в камере на границе газ-вода (плоскость 0-0) на глубине  $H$ , т.е.

$$p_0 = p_{абс} = p_{атм} + \rho g H.$$

Пусть в энергоносителе произошло быстрое химическое превращение – взрыв. Продукты взрыва аксиально расширяются, вытесняя жидкость по кольцевому зазору в ствол скважины.

Уравнение, описывающее движение продуктов взрыва в открытой снизу взрывной камере, имеет вид (2.1).

Начальная энергия  $\mathcal{E}_1$  продуктов взрыва равна внутренней энергии  $W_1$  продуктов взрыва перед расширением, т.е.

$$\mathcal{E}_1 = W_1 = \frac{mp_0\pi R_1^2 h}{n-1}. \quad (2.6)$$

Согласно (2.5) связь между давлением газов  $p$  в полости и ее текущей высотой  $h+z$  имеет вид

$$p = p_1 \left( \frac{h}{h+z} \right)^n. \quad (2.7)$$

Внутренняя энергия  $W$  в процессе расширения равна  $W = \frac{p\pi R_1^2 (h+z)}{n-1}$ . С учетом (2.4) и (2.7) получим

$$W = \frac{mp_0\pi R_1^2 (h+z)^{1-n} h^n}{(n-1)}. \quad (2.8)$$

Работа продуктов взрыва  $A$  согласно (2.2) равна

$$A = \int_{V_1}^V p_1 dV = \frac{\pi R_1^2 (h+z)}{\pi R_1^2 h} \int p_1 dV. \quad (2.9)$$

Давление  $p_1$  находим по выражению (2.3), записанному для сечений: I – I, проходящего по подвижной границе газ-вода в камере и II – II, проходящего по уровню воды в скважине (рисунок 2.1). Плоскость сравнения проводим через начало отсчета (плоскость 0-0).

Тогда

$$z_I = -z; v_I = \frac{dz}{dt}; z_{II} = H + \Delta z = H + z \frac{R_1^2}{R_K^2}; \quad (2.10)$$

$$p_{II} = p_{\text{атм}}; v_{II} = v_K = \frac{R_1^2}{R_K^2} \frac{dz}{dt},$$

где  $\Delta z$  – изменение уровня жидкости в скважине в процессе пульсаций;  $R_K$ ,  $v_K$  – радиус и скорость жидкости в обсадной колонне.

Инерционный напор  $h_{\text{ин.И-П}}$  на участке I-II равен сумме инерционных напоров соответственно в фильтре  $h_{\text{ин.Ф}}$ , обсадной колонне  $h_{\text{ин.К}}$ , кольцевом зазоре  $h_{\text{ин.К.З}}$  и взрывной камере  $h_{\text{ин.В.К}}$ .

$$h_{\text{ин.И-П}} = h_{\text{ин.Ф}} + h_{\text{ин.К}} + h_{\text{ин.К.З}} + h_{\text{ин.В.К}} = \\ = \frac{R_1^2}{g} \left( \frac{l_{\text{Ф}} - a - l}{R_{\text{Ф}}^2} + \frac{l_{\text{К}}}{R_{\text{К}}^2} + \frac{l}{R_{\text{Ф}}^2 - R_1^2} + \frac{l + h' - h - z}{R_1^2} \right) \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (2.11)$$

Потери на трение равны

$$h_{\text{тр.И-П}} = h_{\text{К.З.}} + h_{\text{К.П.}} + h_{\text{дл.Ф}} + h_{\text{дл.К}} + h_{\text{м.с.}},$$

где  $h_{\text{К.З.}}$  – соответственно потери напора в кольцевом зазоре;  $h_{\text{К.П.}}$  – на кольцевом повороте;  $h_{\text{дл.Ф}}$  – по длине фильтра;  $h_{\text{дл.К}}$  – в колонне;  $h_{\text{м.с.}}$  – на переходе колонны и фильтра.

Потери напора в кольцевом зазоре определим по известной формуле [55,56]

$$h_{к.з.} = \zeta_{к.з.} \frac{v_{\phi}^2}{2g} = k_{\Pi} \lambda_{\phi} \frac{l}{4R_{\phi}g} \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^4 \left( \frac{dz}{dt} \right)^2, \quad (2.12)$$

где  $v_{\phi}$  – средняя скорость потока в фильтре,  $v_{\phi} = \frac{R_1^2}{R_{\phi}^2} \frac{dz}{dt}$ ,  $k_{\Pi}$  – поправочный коэффициент,  $\zeta_{к.з.} = k_{\Pi} \lambda_{\phi} \frac{l}{2R_{\phi}}$  – коэффициент сопротивления кольцевого зазора, [56],  $\lambda_{\phi} = 0,11 \left( \frac{\Delta_{\phi}}{2R_{\phi}} \right)^{0,25}$  – коэффициент гидравлического трения стенок фильтра шероховатостью  $\Delta_{\phi}$ .

Потери напора на кольцевом повороте  $h_{к.п.}$  равны

$$h_{к.п.} = \zeta_{к.п.} \frac{1}{2g} \left( \frac{dz}{dt} \right)^2, \quad (2.13)$$

где  $\zeta_{к.п.}$  – коэффициент сопротивления кольцевого поворота на угол  $180^{\circ}$  [57].

Потери напора в фильтре и колонне определим по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{дл.\phi} = \lambda_{\phi} \frac{l_{\phi} - a}{2R_{\phi}} \frac{v_{\phi}^2}{2g} = \lambda_{\phi} \frac{(l_{\phi} - a)}{4gR_{\phi}} \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^4 \left( \frac{dz}{dt} \right)^2, \quad (2.14)$$

$$h_{\text{дл.к.}} = \lambda_{\text{к}} \frac{l_{\text{к}}}{2R_{\text{к}}} \frac{v_{\text{к}}^2}{2g} = \lambda_{\text{к}} \frac{l_{\text{к}}}{4gR_{\text{к}}} \left( \frac{R_1}{R_{\text{к}}} \right)^4 \left( \frac{dz}{dt} \right)^2, \quad (2.15)$$

где  $\lambda_{\text{к}}$  – коэффициент гидравлического трения обсадной колонны;  $v_{\text{к}}$  – средняя скорость потока в колонне,  $v_{\text{к}} = \frac{R_1^2}{R_{\text{к}}^2} \frac{dz}{dt}$ .

Потери напора на стыке колонны и фильтра найдем по формуле Борда

$$h_{\text{м.с.}} = \left( \frac{R_{\text{к}}^2}{R_{\phi}^2} - 1 \right)^2 \frac{v_{\text{к}}^2}{2g} = \left( \frac{R_{\text{к}}^2}{R_{\phi}^2} - 1 \right)^2 \cdot \frac{1}{2g} \left( \frac{R_1}{R_{\text{к}}} \right)^4 \left( \frac{dz}{dt} \right)^2. \quad (2.16)$$

При подстановке (2.10) – (2.16) в (2.3) получаем

$$\begin{aligned} \frac{p_l}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} + z \left\{ 1 + \left( \frac{R_1}{R_{\text{к}}} \right)^2 \right\} + \frac{\alpha}{2g} \left\{ \left( \frac{R_1}{R_{\text{к}}} \right)^4 - 1 \right\} \cdot \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 + \\ + \frac{1}{2g} \left( \zeta_{\text{к.п.}} + \frac{\lambda_{\phi}}{2R_{\phi}} \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^4 \right) (k_{\text{пл}} l + l_{\phi} - a - l) + \\ \left( \frac{\lambda_{\text{к}} l_{\text{к}}}{2R_{\text{к}}} + \left( \frac{R_{\text{к}}^2}{R_{\phi}^2} - 1 \right)^2 \right) \cdot \left( \frac{R_1}{R_{\text{к}}} \right)^4 \cdot \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 + \\ + \frac{1}{g} \left\{ l_{\text{к}} \left( \frac{R_1}{R_{\text{к}}} \right)^2 + (l_{\phi} - a - l) \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^2 + l \frac{R_{\phi}^2}{R_{\phi}^2 - R_1^2} + h' - h - z \right\} \frac{d^2 z}{dt^2}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Окончательно, подставив выражения (2.6), (2.8), (2.9) в (2.1), получим

$$\int_{\pi R_1^2 h}^{\pi R_1^2 (h+z)} p_1 dV + \frac{mp_0 \pi R_1^2 h^n (h+z)^{1-n}}{n-1} = \frac{mp_0 \pi R_1^2 h}{n-1}, \quad (2.18)$$

где  $p_1$  определяется по выражению (2.17).

Дифференцируя обе части выражения (2.18) по времени и сокращаем на  $\pi R_1^2 \rho g \frac{dz}{dt}$ . Вводим в рассмотрение безразмерную величину

$$\tilde{z} = \frac{h+z}{h}, \quad \frac{d\tilde{z}}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dz}{dt} \quad (2.19)$$

и после несложных преобразований получаем дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} (A - \tilde{z}) \frac{d^2 \tilde{z}}{dt^2} = & -B_0 - B_1 \cdot \tilde{z} + \frac{B_2}{\tilde{z}^n} + D_1 \cdot \left( \frac{d\tilde{z}}{dt} \right)^2 - \\ & - D_2 \cdot \left( \frac{d\tilde{z}}{dt} \right)^2 \cdot \text{sign} \frac{d\tilde{z}}{dt}, \end{aligned} \quad (2.20)$$

где

$$A = \frac{1}{h} \left( l_{\kappa} \left( \frac{R_1}{R_{\kappa}} \right)^2 + (l_{\phi} - a - l) \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^2 + l \frac{R_{\phi}^2}{R_{\phi}^2 - R_1^2} + h' \right),$$

$$B_1 = \frac{g}{h} \left( 1 + \left( \frac{R_1}{R_{\kappa}} \right)^2 \right), \quad B_0 = \frac{p_0}{\rho h^2} - B_1, \quad B_2 = \frac{mp_0}{\rho h^2},$$

$$D_1 = \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_{\kappa}} \right)^4 \right),$$

$$D_2 = \frac{1}{2} \left( \zeta_{к.п.} + \frac{\lambda_{\phi}}{2R_{\phi}} \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^4 (k_{\Pi l} + l_{\phi} - a - l) + \right. \\ \left. + \left( \frac{\lambda_{к} l_{к}}{2R_{к}} + \left( \frac{R_{к}^2}{R_{\phi}^2} - 1 \right)^2 \right) \cdot \left( \frac{R_1}{R_{к}} \right)^4 \right).$$

Множитель  $\text{sign} \frac{d\tilde{z}}{dt} = \begin{cases} -1 & \text{при } \frac{d\tilde{z}}{dt} < 0 \\ 1 & \text{при } \frac{d\tilde{z}}{dt} > 0 \end{cases}$  в уравнение (2.20) вве-

ден для учета того факта, что действие сопротивлений всегда направлено в сторону, противоположную направлению движения. Начальные условия для искомого решения  $\tilde{z}(0) = 1$ ,  $\frac{d\tilde{z}(0)}{dt} = 0$ . В силу (2.19) после решения уравнения (2.20) надо делать пересчет по формулам  $z(t) = h \cdot (\tilde{z}(t) - 1)$ ,  $\frac{dz}{dt} = h \frac{d\tilde{z}}{dt}$ .

Уравнение (2.20) не допускает решения в квадратурах. Так как коэффициенты  $A$ ,  $B_0$  и  $B_2$  могут быть очень велики (порядка  $10^4$  и выше), то для более эффективного применения методов численного интегрирования имеет смысл сделать еще одну замену

$$\tilde{z} = A \cdot Z, \quad \frac{d\tilde{z}}{dt} = A \frac{dZ}{dt}. \quad (2.21)$$

Уравнение (2.20) примет вид

$$(1-Z) \frac{d^2 Z}{dt^2} = -\bar{B}_0 - \bar{B}_1 \cdot Z + \frac{\bar{B}_2}{Z^n} + D_1 \cdot \left( \frac{dZ}{dt} \right)^2 - D_2 \cdot \left( \frac{dZ}{dt} \right)^2 \cdot \text{sign} \frac{dZ}{dt}, \quad (2.22)$$

где  $\bar{B}_0 = \frac{B_0}{A^2}$ ,  $\bar{B}_1 = \frac{B_1}{A}$ ,  $\bar{B}_2 = \frac{B_2}{A^{2+n}}$ . Начальные условия для искомого решения  $Z(0) = \frac{1}{A}$ ,  $Z'(0) = 0$ . Из (2.19) и (2.21) следует, что после решения уравнения (2.22) надо делать пересчет по формулам  $z(t) = h \cdot (A \cdot Z(t) - 1)$ ,  $\frac{dz}{dt} = Ah \frac{dZ}{dt}$ .

Результаты численных расчетов пульсаций полости по уравнению (2.22) представлены на рисунке 2.2.

Как видно из рисунка, на начальном этапе времени сразу после взрыва длина полости  $z$  в процессе расширения возрастает до некоторого значения  $z_{\max}$  (рисунок 2.2,а). При этом скорость  $v = \frac{dz}{dt}$  вначале растет до значения  $v_{\max}$  (для дальнейших выкладок значение  $z$ , при котором скорость принимает значение  $v_{\max}$ , обозначим  $z_M$ ), а затем уменьшается и к концу этапа расширения, т.е. в момент времени  $t_0$ , когда  $z(t_0) = z_{\max}$ , становится равной 0 (рисунок 2.2,б). Давление  $p$  в продуктах взрыва, вычисленное по формуле (2.7), при этом монотонно убывает и в момент времени  $t_0$  достигает минимального значения (рисунок 2.2,в). Далее мы видим, что вследствие потерь энергии, продукты взрыва совершают затухающие пульсации.

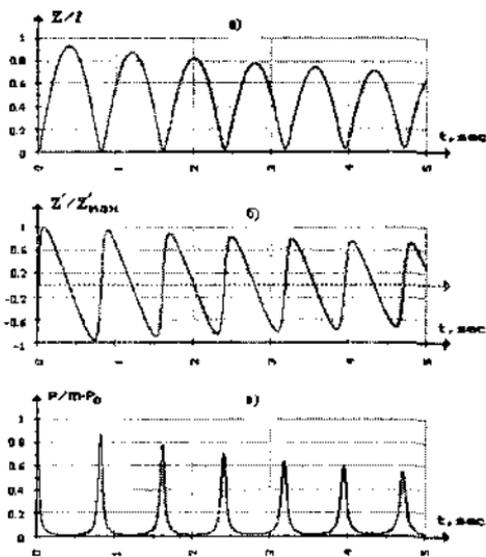


Рис. 2.2. Пульсации продуктов газового взрыва в открытой снизу недеформируемой цилиндрической взрывной камере:

а)  $z/l = f(t)$ ; б)  $z'/z'_{\max} = f(t)$ ; в)  $p/mp_0 = f(t)$ ; при  $R_1 = 0,10$  м,  $R_\phi = 0,12$  м,  $R_k = 0,12$  м,  $l_\phi = 10$  м,  $l_k = 60$  м,  $a = 0$ ,  $l = 1$  м,  $h = 0,10$  м,  $h_1 = 0,05$  м,  $m = 10$ ,  $n = 1,9$ .

Вычисленные значения:  $z'_{\max} = 3,87$  м/с при  $z_M = 22,7$  см,  $z_{\max} = 93,3$  см

Эффективность декольматации фильтра будет тем выше, чем больше будет величина импульса давления  $I$ , который определяется

как интеграл  $I = \int_0^{t_0} p(t) dt$ , где  $p(t)$  можно найти с использованием

формулы (2.7).

Обработка результатов численного интегрирования с использованием метода Рунге-Кутты-Мерсона уравнения (2.22) с точностью  $10^{-9}$  при различных геометрических размерах взрывных камер, скважин и условиях подводного взрыва с помощью метода наименьших квадратов позволила предложить следующие формулы для определения параметров  $z_M$ ,  $v_{\max}$ ,  $z_{\max}$  и  $I$ :

$$z_M = \frac{2,482 \cdot R_K^{0,145} \cdot (0,003 + 2,53h - 1,4h^2 + 6,2h^2 R_\phi)}{R_1^{0,18} \cdot R_\phi^{1,27} \cdot n^{1,61}}, \quad (2.23)$$

$$V_{\max} = \frac{21,9 \cdot R_\phi^{0,27} \cdot R_K^{0,88} \cdot h^{0,5} \cdot (1 - 0,035l)}{(l_K + l_\phi - a)^{0,068} \cdot R_1^{1,13} \cdot n^{0,67}}, \quad (2.24)$$

$$z_{\max} = \frac{2,02 \cdot R_\phi^{0,04} \cdot R_K^{0,11} \cdot (l_K + l_\phi - a)^{0,04}}{R_1^{0,15} \cdot n^{1,54}} \times \frac{(0,03 + 10,3h - 6h^2 + 19h^2 R_\phi)}{R_1^{0,15} \cdot n^{1,54}}, \quad (2.25)$$

$$I = \frac{0,1094 \cdot mp_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{R_1}{R_\phi}\right)^3\right) \cdot R_K^{0,787}}{R_\phi^{0,793} \cdot n^{0,966}} \times \frac{(l_K + l_\phi - a)^{0,074} \cdot h^{0,5} \cdot (1 + 0,03l)}{R_\phi^{0,793} \cdot n^{0,966}} \quad (2.26)$$

Использование формул (2.23)–(2.26) имеет смысл при следующих ограничениях на параметры скважины и взрывной камеры (все данные, кроме параметра  $n$ , указаны в метрах):

$$\begin{cases} R_\phi \in [0,1; 0,16], & 0,75R_\phi \leq R_1 \leq 0,93R_\phi, & 0,75R_K \leq R_\phi \leq R_K, \\ l \in [0,45; 1], & h \in [0,1; 0,4], & n \in [1,75; 2,05], \\ l_\phi \in [3; 15], & l_K \in [20; 100], & l_\phi \geq l + a, & l_\phi + l_K - a \geq 24. \end{cases} \quad (2.27)$$

При соблюдении данных ограничений относительная погрешность формул (2.23)–(2.26) по отношению к значениям соответ-

вующих параметров, найденных при численном решении уравнения (2.22) с точностью  $10^{-9}$ , не превышает 3,5% (причем для часто встречающихся конструкций скважин – менее чем на 2%). Эти же формулы можно использовать и при небольшом отклонении от грани изменения параметров, указанных в (2.27), и относительная погрешность не превысит 6-8%.

В рамках рассматриваемых здесь приближений можно считать, что давление на стенке фильтра между отражателем и нижним срезов камеры будет меньше давления в продуктах взрыва  $p$  на величину удельной кинетической энергии в этом сечении  $\alpha \rho v_z^2 / 2$ , в соответствующие моменты времени. Указанное имеет место, когда применяются взрывные камеры, радиус которых соизмерим с радиусом фильтра.

### *2.3. Расчет пульсаций продуктов газового взрыва в замкнутых эластичных оболочках, находящихся в скважине*

#### *2.3.1. Работа деформации тонких эластичных оболочек*

Если первоначальный объем газовой смеси заключить во взрывную камеру, образованную неразрушаемой эластичной оболочкой (например, выполненной из резины) и произвести поджиг смеси, продукты взрыва будут совершать пульсации вместе с упруго деформирующейся оболочкой.

В дальнейшем будем рассматривать тонкие оболочки, у которых отношение толщины  $\delta$  к наименьшему радиусу кривизны  $R_m$  средней поверхности оболочки не превышает  $1/20$ , т.е.  $\delta / R_m < 1/20$  [58]. Массой таких оболочек можно пренебречь и считать, что на динамику пульсаций продуктов взрыва оказывают влияние только упругие свойства оболочки.

Энергетическое уравнение (2.1), описывающее пульсации продуктов взрыва с учетом того, что часть энергии взрыва расходуется на работу  $A_{об}$  деформации оболочки, имеет вид

$$W + A + A_{об} = \mathcal{E}_1. \quad (2.28)$$

Работа  $A_{об}$  равна потенциальной энергии деформированного тела и ее найдем, как половину произведения силы давления  $P_1$  продуктов взрыва на радиальное перемещение  $\Delta R = R - R_1$  [59]

$$A_{об} = 0,5 P_1 (R - R_1). \quad (2.29)$$

В соответствии с законом Гука [60], радиальное перемещение оболочки равно

$$R - R_1 = \frac{R_1}{E} (\sigma_2 - \mu \sigma_1), \quad (2.30)$$

где  $E$  — модуль упругости материала оболочки;  $\sigma_1, \sigma_2$  — соответственно меридиональные и кольцевые напряжения в оболочке от действия равномерного внутреннего давления  $p_1$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Цилиндрическая оболочка. Для цилиндрической оболочки радиусом  $R_1$ , длиной  $l$  напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  можно определить из выражений

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{p_1 R_1}{2\delta}, \\ \sigma_2 &= \frac{p_1 R_1}{\delta}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Учитывая, что сила давления  $P_1 = p_1 2\pi R_1 l$ , после подстановки (2.30) и (2.31) в (2.29) и, приняв  $\mu = 0,5$  для резины, получим для цилиндрической оболочки

$$A_{об} = \frac{4\pi E l \delta (R - R_1)^2}{3 R_1}. \quad (2.32)$$

**Шаровая оболочка.** Возникающие в шаровой оболочке радиусом  $R_1$  меридиональные  $\sigma_1$  и кольцевые  $\sigma_2$  напряжения равны между собой

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p_1 R_1}{2\delta}. \quad (2.33)$$

Учитывая, что для сферы сила давления  $P_1 = p_1 4\pi R_1^2$ , после подстановки (2.30) и (2.33) в (2.29) и, приняв  $\mu = 0,5$  для резины, получим для шаровой оболочки

$$A_{06} = 8\pi E\delta(R - R_1)^2. \quad (2.34)$$

При расчете пульсаций также используются выражения (2.2)–(2.5).

### ***2.3.2. Расчет пульсаций продуктов цилиндрического подводного газового взрыва в скважине***

Рассмотрим процесс пульсаций в фильтре скважины цилиндрической взрывной камеры с продуктами взрыва [61]. Расчетная схема пульсаций представлена на рисунке 2.3.

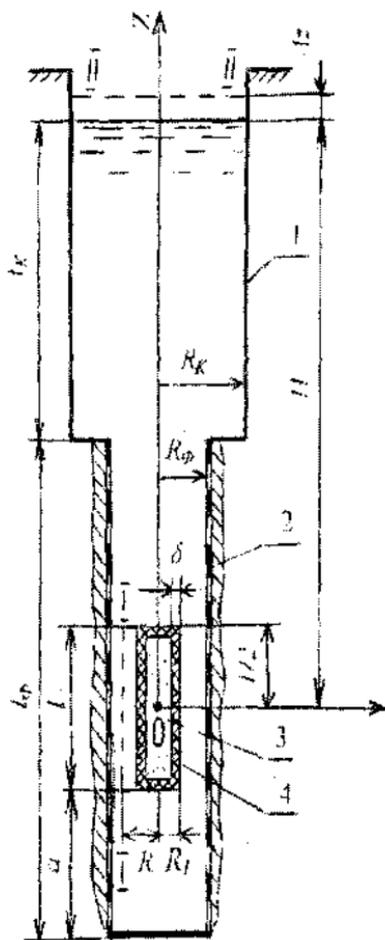


Рис. 2.3. Расчетная схема пульсаций цилиндрической взрывной камеры в фильтре скважины:

- 1 – обсадная колонна; 2 – фильтр; 3 – цилиндрическая взрывная камера; 4 – оболочка толщиной  $\delta$

Гидродинамические характеристики процесса расширения цилиндрической камеры в скважине зависят от соотношения между тремя пространственными масштабами: длиной камеры  $l$ , её начальным радиусом  $R_1$  и глубиной погружения  $H$ .

Будем рассматривать цилиндрическую камеру, длина которой  $R_1 \ll l \ll H$ . Согласно классификации [9], такую камеру можно

относительно «коротким цилиндрам», у которых длина  $l$  лежит на отрезке  $R_1 \ll l \ll \lambda$ , где величина  $\lambda$  равна произведению скорости волны  $c$  на длительность процесса расширения полости  $\tau$ , т.е.  $\lambda = c\tau$ .

Полость цилиндрической взрывной камеры радиусом  $R_1 - \delta$  заполнена газообразным энергоносителем. Так как в задаче рассматриваем «короткий цилиндр» у которого длина  $l \ll H$ , начальное давление  $p_0$  в полости принимаем одинаковым по всей длине и равным абсолютному давлению  $p_{абс}$  в жидкости на уровне центра цилиндра  $p_0 = p_{абс} = p_{атм} + \rho gH$ .

Пусть в энергоносителе произошло быстрое химическое превращение – взрыв. Камера радиально расширяется, вытесняя жидкость по кольцевому зазору в ствол скважины.

Уравнение, описывающее движение заполненной газом цилиндрической камеры в скважине, имеет вид (2.28).

Начальная энергия  $\mathcal{E}_1$  продуктов взрыва равна внутренней энергии  $W_{(R_1-\delta)}$  продуктов взрыва перед расширением, т.е.

$$\mathcal{E}_1 = W_{(R_1-\delta)} = \frac{mp_0\pi(R_1 - \delta)^2 l}{n-1}. \quad (2.35)$$

Связь между давлением газов  $p$  в полости и ее текущим радиусом  $R-\delta$  согласно (2-5) имеет вид

$$p = p_1 \left( \frac{R_1 - \delta}{R - \delta} \right)^{2n}. \quad (2.36)$$

Внутренняя энергия  $W = W_{(R-\delta)}$  в процессе расширения равна

$$W_{(R-\delta)} = \frac{p\pi(R-\delta)^2 l}{n-1}. \text{ С учетом (2.36) получим}$$

$$W_{(R-\delta)} = \frac{\pi p_0 \left( \frac{R_1 - \delta}{R - \delta} \right)^{2n} \pi (R - \delta)^2 l}{n - 1}. \quad (2.37)$$

Работа продуктов взрыва  $A$  против сил внешнего давления при увеличении объема взрывной камеры от  $V_1$  до  $V$  равна согласно (2.2) равна

$$A = \int_{V_1}^V p_I dV = l \int_{S_1}^S p_I dS, \quad (2.38)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения взрывной камеры;  $p_I$  – давление на оболочку со стороны жидкости в скважине в процессе движения.

Давление  $p_I$  найдем из уравнения (2.3), записанного для сечения I – I, совпадающего с наружной боковой поверхностью оболочки и сечения II – II, проходящего по уровню воды в скважине (рисунок 2.3). Плоскость сравнения проводим по нижнему днищу взрывной камеры. Давление продуктов взрыва по всему объему полости принимаем одинаковым, инерционными силами в кольцевом зазоре пренебрегаем.

Тогда

$$z_I = \frac{l}{2}; v_I = \frac{dR}{dt}; z_2 = \frac{l}{2} + H + \Delta z = \frac{l}{2} + H + l \frac{R^2 - R_1^2}{R_K^2};$$

$$p_{II} = p_{\text{атм}}; v_{II} = \frac{2Rl}{R_K^2} \cdot \frac{dR}{dt}. \quad (2.39)$$

Инерционный напор на участке I-II равен сумме инерционных напоров в фильтре  $h_{\text{ин.ф}}$  и обсадной колонне  $h_{\text{ин.к}}$

$$h_{инн.п} = h_{инн.ф} + h_{инн.к} = \frac{2l}{g} \left( \frac{l_{\phi} - l - a}{R_{\phi}^2} + \frac{l_K}{R_K^2} \right) \frac{d \left( R \frac{dR}{dt} \right)}{dt}, \quad (2.40)$$

Потери на трение равны  $h_{тр.п} = h_{дл.к.уч} + h_{дл.ф} + h_{дл.к} + h_{м.с.}$ , где  $h_{дл.к.уч}$  – потери напора на кольцевом участке.

Потери напора на участке кольцевого поперечного сечения неравномерно распределены по его длине  $l$ . Это обусловлено переменной скоростью жидкости  $v_{z'}$  по длине участка, которая линейно возрастает от  $v = 0$  при  $z = 0$  до  $v = v_{max}$  при  $z = l$ , где  $z$  – расстояние от основания цилиндра.

Связь осевой скорости  $v_{z'}$  в кольцевом зазоре на расстоянии  $z$  от основания цилиндра с радиальной скоростью цилиндрической камеры  $\frac{dR}{dt}$  найдем из уравнения неразрывности, записанного для цилиндрического и кольцевого сечений:

$$2\pi R z' \frac{dR}{dt} = \pi (R_{\phi}^2 - R^2) v_{z'}, \text{ откуда}$$

$$v_{z'} = \frac{2Rz'}{R_{\phi}^2 - R^2} \frac{dR}{dt}. \quad (2.41)$$

При  $z = l$

$$v_{z=l} = \frac{2Rl}{R_{\phi}^2 - R^2} \frac{dR}{dt}. \quad (2.42)$$

Вспользуемся известной формулой вида (2.12) для расчета потерь напора  $h'_{дл.к.уч}$  на участке кольцевого поперечного сечения

при постоянной скорости по длине участка, т.е. когда  $v = v_{к.с.} = const$ , имеем

$$h'_{дл.к.уч} = k_n \lambda_\phi \frac{l}{R_\phi - R} \frac{v_\phi^2}{4g}. \quad (2.43)$$

Выразив  $v_\phi$  через постоянную скорость в кольцевом сечении, получим

$$h'_{дл.к.уч} = k_n \frac{\lambda_\phi}{4g} \left( \frac{R_\phi^2 - R^2}{R_\phi^2} \right) \frac{l}{R_\phi - R} v_{к.с.}^2.$$

Учитывая, что на рассматриваемом участке кольцевого сечения длиной  $l$  (рисунок 2.3) происходит движение жидкости с переменной массой, т.е. наблюдается непрерывный приток жидкости по длине участка от нуля в начале до максимального значения в конце участка, определим потери напора  $dh_{дл.к.уч}$  на элементарном участке длиной  $dz$  на расстоянии  $z$  от основания цилиндра по формуле

$$dh_{дл.к.уч} = \frac{k_n \lambda_\phi}{4g} \left( \frac{R_\phi^2 - R^2}{R_\phi^2} \right) \frac{dz'}{(R_\phi - R)} v_{z'}^2. \quad (2.44)$$

Подставив выражение (2.41) в (2.44), получим

$$dh_{дл.к.уч} = \frac{k_n \lambda_\phi}{g} \frac{R^2}{R_\phi^4 (R_\phi - R)} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 (z')^2 dz'. \quad \text{Интегрируя от}$$

$z = 0$  до  $z = l$  (для всего кольцевого участка), получим

$$h_{дл.к.уч} = \frac{k_n \lambda_\phi}{g} \frac{R^2}{R_\phi^4 (R_\phi - R)} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \int_0^l (z')^2 dz', \quad \text{или}$$

$$h_{\text{дл.к.уч}} = \frac{k_H \lambda_\phi l^3}{3gR_\phi^4} \frac{R^2}{R_\phi - R} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.45)$$

Потери напора в фильтре определим по формуле Дарси-Вейсбаха  $h_{\text{дл.ф}} = \lambda_\phi \frac{l_\phi - a - l}{2R_\phi} \frac{v_\phi^2}{2g}$ . Из уравнения неразрывности

$v_\phi \cdot \omega_\phi = v_{\text{к.с.}z'=l} \cdot \omega_{\text{к.с.}}$ , где  $\omega_\phi$  и  $\omega_{\text{к.с.}}$  - площади сечений фильтра и кольцевого сечения. Тогда скорость  $v_{\text{к.с.}z'=l}$  определим по формуле (2.42). После преобразований получим

$$h_{\text{дл.ф}} = \lambda_\phi \frac{(l_\phi - a - l)l^2}{gR_\phi^5} R^2 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.46)$$

Потери напора в колонне также определяем по формуле Дарси-Вейсбаха:  $h_{\text{дл.к.}} = \lambda_k \frac{l_k}{2R_k} \frac{v_k^2}{2g}$ , или

$$h_{\text{дл.к.}} = \lambda_k \frac{l_k \cdot l^2}{gR_k^5} R^2 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.47)$$

Потери напора на переходе колонны и фильтра найдем по формуле Борда

$$h_{\text{м.с.}} = \left( \frac{\omega_k}{\omega_\phi} - 1 \right)^2 \frac{v_k^2}{2g} = \left( \frac{d_k^2}{d_\phi^2} - 1 \right)^2 \cdot \frac{2l^2}{gR_k^4} R^2 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.48)$$

При подстановке (2.39), (2.40), (2.45) - (2.48) в (2.3), получим

$$\begin{aligned}
p_l = \rho g \left\{ H + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} + l \frac{R^2 - R_1^2}{R_k^2} - \frac{\alpha}{2g} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \right. \\
+ \frac{2l}{g} \left( \frac{l_\phi - l - a}{R_\phi^2} + \frac{l_k}{R_k^2} \right) \frac{d \left( R \frac{dR}{dt} \right)}{dt} + \\
+ \frac{k_n \lambda_\phi l^3}{3gR_\phi^4} \frac{R^2}{(R_\phi - R)} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \left( \frac{\lambda_\phi (l_\phi - a - l) l^2}{gR_\phi^5} + \frac{2\alpha l^2}{gR_\phi^4} + \right. \\
\left. \left. + \frac{\lambda_k l_k l^2}{gR_k^5} + \frac{2l^2}{gR_k^4} \left( \frac{R_k^2}{R_\phi^2} - 1 \right)^2 \right) R^2 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right\}. \quad (2.49)
\end{aligned}$$

Окончательно, подставив выражения (2.35), (2.37), (2.32), (2.38) в (2.28), получим

$$\begin{aligned}
l \int_{\pi R_1^2}^{\pi R^2} p_l dS + \frac{4\pi E I \delta (R - R_1)^2}{3R_1} + \frac{m p_0 \pi (R_1 - \delta)^{2n} l}{n-1} (R - \delta)^{2(1-n)} = \\
= \frac{m p_0 \pi (R_1 - \delta)^2 l}{n-1}, \quad (2.50)
\end{aligned}$$

где  $p_l$  определяется по выражению (2.49).

Сокращая уравнение (2.50) на  $l$  и используя соотношения

$$S = \pi R^2, \quad \frac{dS}{dt} = 2\pi R \frac{dR}{dt}, \quad S_1 = \pi R_1^2, \quad S_k = \pi R_k^2, \quad S_\phi = \pi R_\phi^2,$$

приводим его к виду

$$\begin{aligned}
& \int_{S_1}^{S(t)} \left[ \frac{p_0}{l\rho} + \frac{g}{S_k} (S - S_1) + \frac{\alpha}{l} \left( \frac{l^2}{2S_k^2} - \frac{1}{8\pi S} \right) \left( \frac{dS}{dt} \right)^2 + \right. \\
& \left. + \left( \frac{l_\phi - l - a}{S_\phi} + \frac{l_k}{S_k} \right) \frac{d^2 S}{dt^2} + \frac{l}{4} \left( \frac{dS}{dt} \right)^2 \operatorname{sign} \frac{dS}{dt} \right. \\
& \left. \left( \frac{\lambda_k l_k}{R_k S_k^2} + \frac{\lambda_\phi (l_\phi - l - a)}{R_\phi S_\phi^2} + \frac{\lambda_\phi k_n l \sqrt{\pi}}{3 S_\phi^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{S_\phi} - \sqrt{S}} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{2}{S_k^2} \left( \frac{S_k}{S_\phi} - 1 \right)^2 \right) \right] dS = \frac{mp_0 \pi (R_1 - \delta)^{2n}}{l\rho \cdot (n-1)} \left( \sqrt{\frac{S(t)}{\pi}} - \delta \right)^{2-2n} - \\
& - \frac{4E\delta\sqrt{\pi}}{3l\rho} \cdot \frac{(\sqrt{S(t)} - \sqrt{S_1})^2}{\sqrt{S_1}} + \text{const},
\end{aligned}$$

$$\text{где } \operatorname{sign} \frac{dS}{dt} = \begin{cases} -1 & \text{при } \frac{dS}{dt} < 0; \\ 1 & \text{при } \frac{dS}{dt} > 0. \end{cases}$$

Дифференцируем это интегральное уравнение по времени и сокращаем на  $\frac{dS}{dt}$ . Вводим в рассмотрение безразмерную величину

$$\tilde{S} = \frac{S}{S_\phi}, \quad \frac{d\tilde{S}}{dt} = \frac{1}{S_\phi} \frac{dS}{dt} \quad (2.52)$$

и после несложных преобразований получаем дифференциальное уравнение

$$A \frac{d^2 \tilde{S}}{dt^2} = C_0 + \left( \frac{B_1}{\sqrt{\tilde{S}}} + B_2 \frac{1 - \frac{k_\delta}{\sqrt{\tilde{S}}}}{(\tilde{S} - k_\delta)^{2n}} - B_3 \tilde{S} \right) - \left( D_1 - \frac{D_2}{\tilde{S}} \right) \cdot \left( \frac{d\tilde{S}}{dt} \right)^2 - \left( D_3 + \frac{D_4}{1 - \sqrt{\tilde{S}}} \right) \cdot \left( \frac{d\tilde{S}}{dt} \right)^2 \cdot \text{sign} \frac{d\tilde{S}}{dt}, \quad (2.53)$$

где

$$A = l_\phi - l - a + l_k \frac{S_\phi}{S_k}, \quad C_0 = g \frac{S_1}{S_k} - \frac{p_0}{l\rho} - \frac{4E\delta}{3l\rho R_1}, \quad B_1 = \frac{4E\delta}{3l\rho R_\phi},$$

$$B_2 = \frac{mp_0}{l\rho} \left( \frac{R_1 - \delta}{R_\phi} \right)^{2n},$$

$$k_\delta = \frac{\delta}{R_\phi}, \quad B_3 = g \frac{S_\phi}{S_k}, \quad D_1 = \frac{\alpha l}{2} \left( \frac{S_\phi}{S_k} \right)^2, \quad D_2 = \frac{\alpha R_\phi^2}{8l},$$

$$D_3 = \frac{l}{4} \left( \lambda_\phi \frac{l_\phi - l - a}{R_\phi} + \lambda_x \frac{l_k}{R_k} \left( \frac{S_\phi}{S_k} \right)^2 + 2 \left( 1 - \frac{S_\phi}{S_k} \right)^2 \right),$$

$$D_4 = \lambda_\phi \frac{k_n l^2}{12 R_\phi}.$$

Начальные условия для требуемого решения:

$$\tilde{S}(0) = \frac{S_1}{S_\phi}, \quad \tilde{S}'(0) = 0. \quad \text{Из (2.51) и (2.52) следует, что реальный}$$

радиус и скорость его изменения пересчитываются по формулам

$$R(t) = R_\phi \sqrt{\tilde{S}(t)}, \quad \frac{dR}{dt} = \frac{R_\phi}{2\sqrt{\tilde{S}(t)}} \frac{d\tilde{S}}{dt}.$$

Уравнение (2.53) не допускает решения в квадратурах. Поэтому для нахождения решения  $\tilde{S}(t)$  использовались численные методы (а именно, метод Рунге-Кутты-Мерсона).

Надо также отметить, что уравнение (2.53) имеет стационарное решение  $\tilde{S} \equiv S_0$ , которое определяется из уравнения

$$\frac{B_1}{\sqrt{\tilde{S}}} + B_2 \frac{1 - \frac{k_8}{\sqrt{\tilde{S}}}}{(\tilde{S} - k_8)^{2n}} - B_3 \tilde{S} = -C_0.$$
 Это уравнение легко решается методом половинного деления.

Система в вариациях уравнения (2.53) для решения  $\tilde{S} \equiv S_0$  имеет чисто мнимые характеристические показатели. Поэтому точка  $(S_0; 0)$  для уравнения (2.53) может являться либо центром (вокруг которого вращаются точки  $(\tilde{S}(t), \tilde{S}'(t))$ ), либо фокусом. Численное моделирование показывает (см. рисунок 2.4), что эта точка является притягивающим фокусом (т.е.  $\tilde{S}(t) \rightarrow S_0$  и  $\tilde{S}'(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ ).

Рассмотрим вопрос получения оценки для  $R_{\max}$  — максимально возможного значения радиуса пузыря. Исследуем промежуток времени  $[0; t_1]$ , на котором  $\tilde{S}'(t) > 0$ , если  $0 < t < t_1$ , и  $\tilde{S}'(t_1) = 0$ . Момент времени  $t_1$  как раз соответствует значению  $R_{\max}$ . В урав-

нении (2.53) делаем подстановку  $\psi = \left(\frac{d\tilde{S}}{dt}\right)^2$ ,  $\frac{d^2\tilde{S}}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{d\psi}{d\tilde{S}}$  и получаем уравнение 1-го порядка

$$\frac{1}{2} \frac{d\psi}{d\tilde{S}} = c_0 + \frac{b_1}{\sqrt{\tilde{S}}} + b_2 \frac{1 - \frac{k_8}{\sqrt{\tilde{S}}}}{(\tilde{S} - k_8)^{2n}} - b_3 \tilde{S} -$$

$$-\psi \cdot \left( \tilde{a} - \frac{d_2}{\tilde{S}} + \frac{d_4}{1 - \sqrt{\tilde{S}}} \right)$$

где  $c_0 = C_0 / A$ ,  $b_1 = B_1 / A$  и т.д., а  $\tilde{d} = (D_1 + D_3) / A$ . Начальное значение для решения:  $\psi(\tilde{S}_0) = 0$ , где  $\tilde{S}_0 = S_1 / S_\phi$ .

Используя стандартные методы, находим искомое решение:

$\psi(\tilde{S}) = u(\tilde{S}) \cdot v(\tilde{S})$ , где  $u(\tilde{S}) = \tilde{S}^{2d_2} \cdot e^{-2\tilde{d} \cdot \tilde{S} + 4d_4 \sqrt{\tilde{S}}} \cdot (1 - \sqrt{\tilde{S}})^{4d_4}$  и

$$v(\tilde{S}) = 2 \int_{\tilde{S}_0}^{\tilde{S}} \left( c_0 + \frac{b_1}{\sqrt{y}} + b_2 \frac{1 - \frac{k_\delta}{\sqrt{y}}}{\left( y - 2k_\delta \sqrt{y} + k_\delta^2 \right)^n} - b_3 y \right) \frac{dy}{u(y)}. \quad (2.54)$$

Обозначим  $\tilde{S}_{\max} = \tilde{S}(t_1) = \left( \frac{R_{\max}}{R_\phi} \right)^2$ . Тогда  $\psi(\tilde{S}_{\max}) = 0$ . Бу-

дем считать, что  $\tilde{S}_{\max} < 1$  (т.е. пузырь не достигает стенки фильтра). Тогда  $u(\tilde{S}_{\max}) \neq 0$  и, следовательно,  $v(\tilde{S}_{\max}) = 0$ . Так как для реальных объектов значения  $\tilde{d}$ ,  $d_2$  и  $d_4$  малы ( $d_2$  и  $d_4$  имеют порядок  $10^{-3}$ , а  $\tilde{d}$  — порядок  $10^{-2}$ ), то в интеграле (2.54) можно считать, что  $u(y) \approx 1$ . Это дает возможность оценить этот интеграл в явном виде, и равенство  $v(\tilde{S}_{\max}) = 0$  превращается в уравнение

$$F(\tilde{S}_{\max}) = F(\tilde{S}_0), \quad (2.55)$$

где  $F(y) = c_0 y + 2b_1 \sqrt{y} + \frac{b_2}{1-n} \left( y - 2k_\delta \sqrt{y} + k_\delta^2 \right)^{1-n} - \frac{b_3 y^2}{2}$ . Решая уравнение (2.55) методом половинного деления, мы можем оценить значение  $R_{\max} = R_\phi \sqrt{\tilde{S}_{\max}}$ .

Погрешность при нахождении  $\tilde{S}_{\max}$  с помощью уравнения (2.55) возрастает, если истинное значение  $\tilde{S}_{\max} \approx 1$  (это происходит из-за того, что при  $y \approx 1$  нельзя считать, что  $u(y) \approx 1$ ). Но численный эксперимент показывает, что если истинное значение  $\tilde{S}_{\max} < 0,99$ , то относительная погрешность менее 3%.

Результаты численных расчетов по уравнению (2.53) пульсаций цилиндрической взрывной камеры, снабженной герметичной эластичной оболочкой представлены на рисунке 2.4.

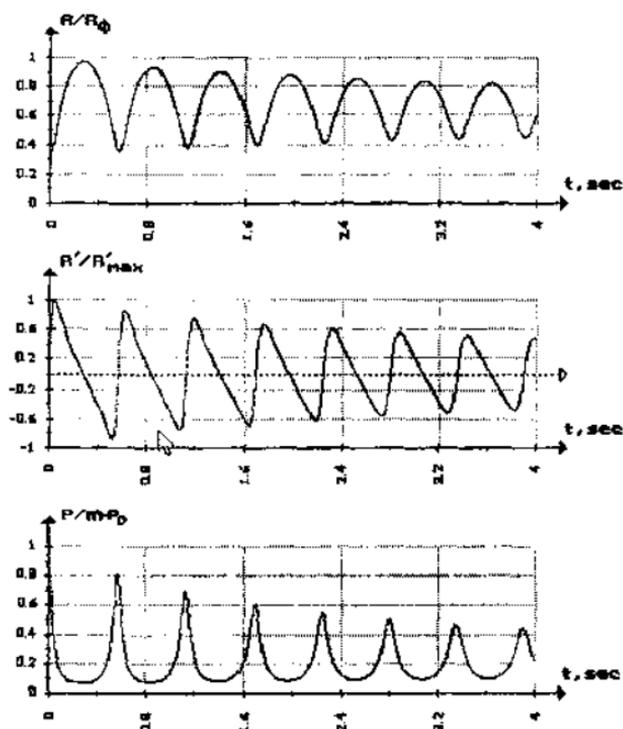


Рис. 2.4. Характер пульсаций цилиндрической взрывной камеры в фильтре скважины при  $R_1 = 0,04$  м,  $R_\phi = 0,125$  м,  $R_x = 0,25$  м,  $l = 2$  м,  $\delta = 2$  мм,  $l_\phi = 8$  м,  $L_x = 60$  м,  $m = 10$ ,  $n = 1,21$ : а -  $R/R_0 = f(t)$ ; б -  $R'/R'_{\max} = f(t)$ ; в -  $p/p_{\text{всп}} = f(t)$ .

Вычисленное значение  $R'_{\max} = 0,585$  м/с

Из рисунка 2.4 следует, что радиус оболочки в процессе расширения возрастает до  $R_{\max}$  (рисунок 2.4, а), при этом скорость вначале растет, а затем к концу расширения уменьшается до нуля (рисунок 2.4, б), давление  $p(t)$  в продуктах взрыва, вычисленное по формуле (2.36), при этом достигает минимального значения (рисунок 2.4, в). Вследствие потерь энергии пульсации продуктов взрыва имеют затухающий характер.

Характер изменения давления во времени на стенке фильтра будет таким же, как и в продуктах взрыва. В рамках рассматриваемых здесь приближений можно считать, что давление в сечении с координатой  $z$  на стенке фильтра напротив взрывной камеры будет меньше давления в продуктах взрыва  $p$  на величину удельной кинетической энергии в этом сечении  $\alpha v_z^2 / 2$ , в соответствующие моменты времени. Указанное имеет место, когда применяются взрывные камеры, радиус которых соизмерим с радиусом фильтра. Применение взрывных камер малых диаметров нецелесообразно из-за затухания давления в кольцевой зоне между наружной поверхностью камеры и фильтра. Предельной по диаметральному размеру взрывной камерой из условия недопущения ее касания стенки фильтра при максимальном расширении является камера, у которой  $R_{\max} \approx R_{\phi}$ .

Для определения величины импульса давления  $I$  с помощью программы решения уравнения (2.53) по формуле Симпсона вычислялось значение

$$I = \int_0^{t_1} p(t) dt, \quad (2.56)$$

где  $t_1$  — момент времени, когда радиус нузыря принимает максимальное значение  $R_{\max}$ , а  $p(t)$  определяется по формуле (2.36).

Обработка результатов вычислений при различных геометрических размерах взрывных камер, скважин и условиях подводного взрыва позволила предложить формулу для расчета импульса давления  $I$  для стадии расширения продуктов взрыва (при  $m = 10$  и  $E = 6$  МПа). Для получения формулы был использован метод наименьших квадратов.

Эта формула для импульса давления  $I$  имеет вид

$$I = 0,213 \cdot m \cdot p_0 \cdot \frac{l^{0,49} \cdot R_1^{1,09} \cdot (l_\phi + 8 - a)^{0,053}}{R_\phi^{0,26} \cdot R_K^{0,8} \cdot (2 + \delta)^{0,13}} \cdot \frac{(l_\phi + l_K - a)^{0,08} \cdot k_n}{R_\phi^{0,26} \cdot R_K^{0,8} \cdot (2 + \delta)^{0,13}}, \quad (2.57)$$

где  $k_n = 0,285 + 0,98 \cdot n^{-1,7}$  – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента политропы  $n$ . Значения переменных  $l, R_1, R_\phi, R_K, l_\phi$  и  $l_K$  следует задавать в метрах, толщину оболочки  $\delta$  – в миллиметрах. Ограничения на использование формулы следующие:  $l \in [0,2; 2]$ ,  $R_1 \in [0,02; 0,07]$ ,  $R_\phi \in [0,08; 0,25]$ ,  $R_K \in [0,08; 0,3]$ ,  $(l_\phi - a) \in [2; 18]$ ,  $l_K \in [25; 100]$ ,  $\delta \in [1; 5]$ ,  $n \in [1,2; 2]$ . При данных ограничениях результаты, полученные с использованием формулы (2.57), отличаются от соответствующих результатов вычисления интеграла полученных по (2.56) с использованием формулы Симпсона не более чем на 5% (а для часто встречающихся конструкций скважин – не более чем на 3%). Надо также отметить, что использование формулы (2.57) имеет смысл, если  $R_{\max} \leq R_\phi$ , что можно проверить, используя (2.55).

Анализ формулы (2.57) показывает, что импульс давления  $I$  линейно возрастает с увеличением давления взрыва  $p_{взр} = mp_0$ , практически пропорционален корню квадратному из длины взрывной камеры  $\sim \sqrt{l}$ , имеет рост порядка  $R_1^{1,09}$  при возрастании начального радиуса взрывной камеры, имеет практически линейный рост при возрастании длины фильтра и колонны (поскольку от них линейно зависит глубина  $H$  и, соответственно, давление  $p_0$ , а множители  $(l_\phi + 8 - a)^{0,053}$  и  $(l_\phi + l_K - a)^{0,08}$  вносят несущественный вклад) и уменьшается с увеличением  $R_\phi, R_K, n$  и  $\delta$ .

### 2.3.3. Расчет пульсаций продуктов сферического подводного газового взрыва в скважине

Рассмотрим процесс пульсаций в фильтре скважины сферической взрывной камеры с продуктами взрыва [62]. Расчетная схема пульсаций представлена на рисунке 2.5.

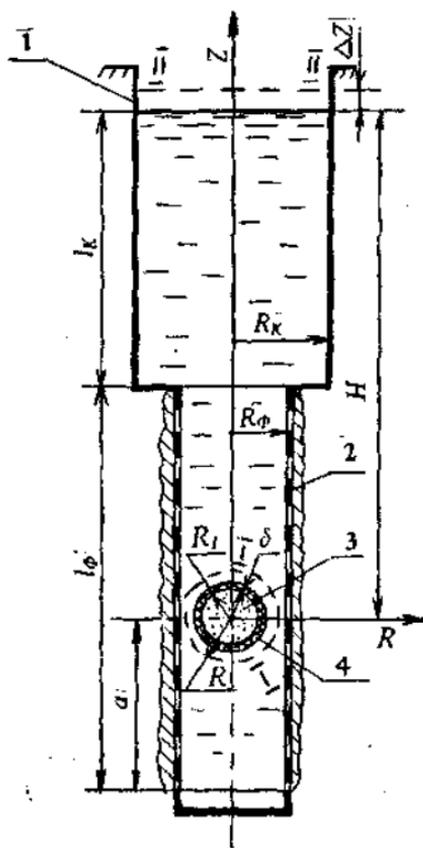


Рис. 2.5. Расчетная схема пульсаций сферической взрывной камеры в фильтре скважины:

1 – обсадная колонна; 2 – фильтр; 3 – сферическая взрывная камера; 4 – оболочка

Пусть в фильтре скважины имеется сферическая взрывная камера с наружным радиусом  $R_l$ , имеющая снаружи тонкостенную упругую оболочку толщиной  $\delta$ .

Полость сферической взрывной камеры радиуса  $R_1 - \delta$  заполнена газообразным энергоносителем. Начальное давление  $p_0$  в полости принимаем по всей полости одинаковым и равным абсолютному давлению  $p_{абс}$  в жидкости на уровне центра шара  $p_0 = p_{абс} = p_{атм} + \rho g H$ .

Связь между давлением газов  $p$  в полости и ее текущим радиусом  $R - \delta$  согласно (2.5) имеет вид

$$p = p_1 \left( \frac{R_1 - \delta}{R - \delta} \right)^{3n}. \quad (2.58)$$

Тогда уравнение (2.28), описывающее движение заполненной продуктами взрыва сферической камеры, имеет вид

$$\int_{4/3\pi R_1^3}^{4/3\pi R^3} p_1 dV + 8\pi E \delta (R - R_1)^2 + \frac{4mp_0 \pi (R_1 - \delta)^{3n}}{3(n-1)} (R - \delta)^{3(n-1)} = \frac{4mp_0 \pi (R_1 - \delta)^3}{3(n-1)}. \quad (2.59)$$

Давление  $p_1$  найдем из уравнения (2.3) при

$$z_I = 0; v_I = \frac{dR}{dt}; z_{II} = H + \Delta z = H + \frac{4(R^3 - R_1^3)}{3R_K^2};$$

$$p_{II} = p_{атм}; v_{II} = v_K = \frac{4R^2}{R_K^2} \cdot \frac{dR}{dt}. \quad (2.60)$$

Инерционный напор на участке I - II равен сумме инерционных напоров в фильтре  $h_{ин.ф}$  и обсадной колонне  $h_{ин.к}$ :

$$h_{\text{инт.п}} = h_{\text{инт.ф}} + h_{\text{инт.к}} = \frac{4}{g} \left( \frac{l_{\text{ф}} - a}{R_{\text{ф}}^2} + \frac{l_{\text{к}}}{R_{\text{к}}^2} \right) \frac{d \left( R^2 \frac{dR}{dt} \right)}{dt}. \quad (2.61)$$

Потери на трение равны  $h_{\text{тр.п}} = h_{\text{к.з.}} + h_{\text{дл.ф}} + h_{\text{дл.к}} + h_{\text{м.с.}}$ , где  $h_{\text{к.з.}}$  — потери напора в кольцевом зазоре (отверстии) между взрывной камерой и стенкой фильтра. Потери напора  $h_{\text{к.з.}}$  определим из известной формулы расхода  $Q$  при истечении через дроссельную диафрагму в трубопроводе [63]. Распространив формулу на кольцевое отверстие, получим

$$Q = \mu \omega_{\text{к.з.}} \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\text{к.з.}}}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{R_{\text{ф}}^2 - R^2}{R_{\text{ф}}^2} \right) \right]}}, \quad (2.62)$$

где  $\omega_{\text{к.з.}}$  — площадь кольцевого отверстия,  $\omega_{\text{к.з.}} = \pi(R_{\text{ф}}^2 - R^2)$ ;  $\Delta p_{\text{к.з.}}$  — потери давления в кольцевом зазоре,  $\Delta p_{\text{к.з.}} = \rho g h_{\text{к.з.}}$ ;  $\mu$  — коэффициент расхода отверстия.

Учитывая, что через отверстие протекает примерно половина расхода, проходящего через живое сечение фильтра, и выразив  $h_{\text{к.з.}}$  получим

$$h_{\text{к.з.}} = \frac{2R^4 \left[ 1 - \left( \frac{R_{\text{ф}}^2 - R^2}{R_{\text{ф}}^2} \right)^2 \right]}{g \mu^2 (R_{\text{ф}}^2 - R^2)^2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.63)$$

Потери напора по длине в фильтре и колонне определяются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{\text{дл.}\phi} = \lambda_{\phi} \frac{l_{\phi} - a}{2R_{\phi}} \frac{v_{\phi}^2}{2g} = \lambda_{\phi} \frac{4(l_{\phi} - a)}{gR_{\phi}^5} R^4 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2, \quad (2.64)$$

$$h_{\text{дл.к.}} = \lambda_{\kappa} \frac{l_{\kappa}}{2R_{\kappa}} \frac{v_{\kappa}^2}{2g} = \lambda_{\kappa} \frac{4l_{\kappa}}{gR_{\kappa}^5} R^4 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.65)$$

Потери напора на переходе колонны и фильтра найдем по формуле Борда:

$$h_{\text{м.с.}} = \left( \frac{\omega_{\kappa}}{\omega_{\phi}} - 1 \right)^2 \frac{v_{\kappa}^2}{2g} = \left( \frac{R_{\kappa}^2}{R_{\phi}^2} - 1 \right)^2 \cdot \frac{8}{gR_{\kappa}^4} R^4 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.66)$$

При подстановке (2.60)–(2.61), (2.63)–(2.66) в (2.3), получим

$$\begin{aligned} p_l = \rho g \left[ H + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} + \frac{4}{3} \frac{R^3 - R_1^3}{R_{\kappa}^2} + \frac{\alpha}{g} \left( \frac{8R^4}{R_{\kappa}^4} - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{2R^4 \left[ 1 - \left( \frac{R_{\phi}^2 - R^2}{R_{\phi}^2} \right)^2 \right]}{g\mu^2 (R_{\phi}^2 - R^2)^2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{4}{g} \left( \frac{l_{\phi} - a}{R_{\phi}^2} + \frac{l_{\kappa}}{R_{\kappa}^2} \right) \frac{d \left( R^2 \frac{dR}{dt} \right)}{dt} \right. \\ \left. + \frac{4}{g} \left( \lambda_{\phi} \frac{l_{\phi} - a}{R_{\phi}^5} + \lambda_{\kappa} \frac{l_{\kappa}}{R_{\kappa}^5} + \frac{2}{R_{\kappa}^4} \left( \frac{R_{\kappa}^2}{R_{\phi}^2} - 1 \right)^2 \right) \cdot R^4 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.67)$$

Используя соотношения

$$V = \frac{4\pi R^3}{3}, \quad \frac{dV}{dt} = 4\pi R^2 \frac{dR}{dt},$$

$$V_1 = \frac{4\pi R_1^3}{3}, \quad S_k = \pi R_k^2, \quad S_\phi = \pi R_\phi^2, \quad (2.68)$$

приводим уравнение (2.59) к виду (для сокращения записи положено  $K_\pi = \sqrt[3]{3/4\pi}$ )

$$\rho \int_{V_1}^{V(t)} \left[ \frac{p_0}{\rho} + g \frac{V - V_1}{S_k} + \frac{\alpha}{2} \cdot \left( \frac{1}{S_k^2} - \frac{V^{-4/3}}{6 \cdot \sqrt[3]{6\pi^2}} \right) \cdot \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{\ell_\phi - a}{S_\phi} + \frac{\ell_k}{S_k} \right) \cdot \frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{1}{4} \left( \frac{S_\phi^2}{2\mu^2} \left( \left( 1 - \left( \frac{K_\pi \sqrt[3]{V}}{R_\phi} \right)^2 \right)^{-2} - 1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\lambda_k \ell_k}{R_k S_k^2} + \frac{\lambda_\phi (\ell_\phi - a)}{R_\phi S_\phi^2} + \frac{2}{S_k^2} \left( \frac{S_k}{S_\phi} - 1 \right)^2 \right) \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 \cdot \text{sign} \frac{dV}{dt} \right] dV = \text{const} - 8\pi E \delta K_\pi^2 \left( \sqrt[3]{V} - \sqrt[3]{V_1} \right)^2 - \\ - \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{m p_0}{n-1} (R_1 - \delta)^{3n} \cdot \left( K_\pi \cdot \sqrt[3]{V} - \delta \right)^{3(1-n)},$$

$$\text{где } \text{sign} \frac{dV}{dt} = \begin{cases} -1 & \text{при } \frac{dV}{dt} < 0 \\ 1 & \text{при } \frac{dV}{dt} > 0 \end{cases}$$

Дифференцируем это интегральное уравнение по времени и сокращаем на  $\frac{dV}{dt}$ . Вводим в рассмотрение безразмерную величину

$$\tilde{V} = \frac{V}{V_1}, \quad \frac{d\tilde{V}}{dt} = \frac{1}{V_1} \frac{dV}{dt} \quad (2.69)$$

и после несложных преобразований получаем дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} A \frac{d^2 \tilde{V}}{dt^2} = & C_0 - B_1 \tilde{V} + B_2 \left( \frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{V}^2}} - \frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{V}}} \right) + B_3 \frac{\left( \sqrt[3]{\tilde{V}} - \frac{\delta}{R_1} \right)^{2-3n}}{\sqrt[3]{\tilde{V}^2}} - \\ & - \left( D_1 - \frac{D_2}{\sqrt[3]{\tilde{V}^4}} \right) \cdot \left( \frac{d\tilde{V}}{dt} \right)^2 - \\ & - \left[ D_3 + D_4 \left( \left( 1 - \left( \frac{R_1 \sqrt[3]{\tilde{V}}}{R_\Phi} \right)^2 \right)^{-2} - 1 \right) \right] \cdot \left( \frac{d\tilde{V}}{dt} \right)^2 \cdot \text{sign} \frac{d\tilde{V}}{dt}, \end{aligned} \quad (2.70)$$

где

$$A = \rho V_1 \left( \frac{\ell_\Phi - a}{S_\Phi} + \frac{\ell_K}{S_K} \right), \quad C_0 = \rho g \frac{V_1}{S_K} - p_0, \quad B_1 = \rho g \frac{V_1}{S_K},$$

$$B_2 = 4E \frac{\delta}{R_1},$$

$$B_3 = m p_0 \left( 1 - \frac{\delta}{R_1} \right)^{3n}, \quad D_1 = \frac{\rho \alpha}{2} \left( \frac{V_1}{S_K} \right)^2, \quad D_2 = \frac{\rho \alpha R_1^2}{18},$$

$$D_3 = \frac{\rho}{4} \left( \lambda_\phi \frac{\ell_\phi - a}{R_\phi} \left( \frac{V_1}{S_\phi} \right)^2 + \lambda_\kappa \frac{\ell_\kappa}{R_\kappa} \left( \frac{V_1}{S_\kappa} \right)^2 + 2 \left( \frac{V_1}{S_\kappa} \right)^2 \left( \frac{S_\kappa}{S_\phi} - 1 \right)^2 \right),$$

$$D_4 = \frac{\rho}{8\mu^2} \left( \frac{V_1}{S_\phi} \right)^2.$$

Начальные условия для требуемого решения:  $\tilde{V}(0) = 1$ ,  $\tilde{S}'(0) = 0$ . Из (2.68) и (2.69) следует, что реальный радиус и скорость его изменения пересчитываются по формулам

$$R(t) = R_1 \cdot \sqrt[3]{\tilde{V}}, \quad \frac{dR}{dt} = \frac{R_1}{3 \cdot \sqrt[3]{\tilde{V}^2}} \frac{d\tilde{V}}{dt}. \quad (2.71)$$

Уравнение (2.70) не допускает решения в квадратурах. Поэтому для нахождения решения  $\tilde{V}(t)$  использовался численный метод Рунге-Кутты-Мерсона. Уравнение (2.70) имеет стационарное решение  $\tilde{V} \equiv V_0$ , которое определяется из уравнения

$$-B_1 \tilde{V} + B_2 \left( \frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{V}^2}} - \frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{V}}} \right) + B_3 \frac{\left( \sqrt[3]{\tilde{V}} - \frac{\delta}{R_1} \right)^{2-3n}}{\sqrt[3]{\tilde{V}^2}} = -C_0.$$

Оно легко решается методом половинного деления. Численный эксперимент показывает, что точка  $(V_0; 0)$  для уравнения (2.67) является притягивающим фокусом (т.е.  $\tilde{V}(t) \rightarrow V_0$  и  $\tilde{V}'(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ ).

Рассмотрим вопрос получения оценки для  $R_{\max}$  — максимального возможного значения радиуса пузыря. Исследуем промежуток вре-

мени  $[0; t_1]$ , на котором  $\tilde{V}'(t) > 0$ , если  $0 < t < t_1$ , и  $\tilde{V}'(t_1) = 0$ . Момент времени  $t_1$  как раз соответствует значению  $R_{\max}$ . В уравнении (2.67) делаем подстановку  $\psi = \left(\frac{d\tilde{V}}{dt}\right)^2$ ,  $\frac{d^2\tilde{V}}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{d\psi}{d\tilde{V}}$  и получаем уравнение 1-го порядка

$$\frac{1}{2} \frac{d\psi}{d\tilde{V}} = c_0 - b_1\tilde{V} + b_2 \left( \frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{V}^2}} - \frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{V}}} \right) + b_3 \frac{\left( \sqrt[3]{\tilde{V}} - \frac{\delta}{R_1} \right)^{2-3n}}{\sqrt[3]{\tilde{V}^2}} -$$

$$-\psi \cdot \left[ \tilde{d} - \frac{d_2}{\sqrt[3]{\tilde{V}^4}} + d_4 \left( \left( 1 - \left( \frac{R_1 \sqrt[3]{\tilde{V}}}{R_\Phi} \right)^2 \right)^{-2} - 1 \right) \right],$$

где  $c_0 = C_0/A$ ,  $b_1 = B_1/A$  и т.д., а  $\tilde{d} = (D_1 + D_3)/A$ . Надо найти решение с начальным значением  $\psi(1) = 0$ .

Используя стандартные методы, находим это решение:

$$\psi(\tilde{V}) = u(\tilde{V}) \cdot v(\tilde{V}),$$

где

$$u(\tilde{V}) = e^{2(d_4 - \tilde{d})\tilde{V} - 6d_2\tilde{V}^{-1/3}} \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \sqrt[3]{\tilde{V}}}{1 - k \cdot \sqrt[3]{\tilde{V}}} \right)^{\frac{3d_4}{2k^3}} \cdot e^{\frac{2d_4}{k^2} \frac{\sqrt[3]{\tilde{V}}}{1 - k^2 \sqrt[3]{\tilde{V}^2}}},$$

$$k = \frac{R_1}{R_\Phi},$$

$$v(\tilde{V}) = 2 \int_1^{\tilde{V}} \left( c_0 - b_1 y + b_2 \left( \frac{1}{\sqrt[3]{y}} - \frac{1}{\sqrt[3]{y}} \right) + \right. \\ \left. + b_3 \frac{\left( \sqrt[3]{y} - \frac{\delta}{R_1} \right)^{2-3n}}{\sqrt[3]{y^2}} \right) u(y) dy. \quad (2.72)$$

Обозначим  $\tilde{V}_{\max} = \tilde{V}(t_1) = \left( \frac{R_{\max}}{R_1} \right)^3$ . Тогда  $\psi(\tilde{V}_{\max}) = 0$ . Будем считать, что  $R_{\max} < R_\phi$  (т.е. пузырь не достигает стенки фильтра). Тогда  $u(\tilde{V}_{\max}) \neq 0$  и, следовательно,  $v(\tilde{V}_{\max}) = 0$ . Так как для реальных объектов значения  $\tilde{d}$ ,  $d_2$  и  $d_4$  малы ( $d_2$  и  $d_4$  имеют порядок  $10^{-4}$ , а  $\tilde{d}$  — порядок  $10^{-3}$ ), то в интеграле (2.72) можно считать, что  $u(y) \approx 1$ . Это дает возможность оценить этот интеграл в явном виде, и равенство  $v(\tilde{V}_{\max}) = 0$  превращается в уравнение

$$F(\tilde{V}_{\max}) = F(1), \quad (2.73)$$

где

$$F(y) = C_0 y - \frac{B_1 y^2}{2} + B_2 \cdot \left( 3 \cdot \sqrt[3]{y} - 1,5 \cdot \sqrt[3]{y^2} \right) + \frac{B_3}{1-n} \left( \sqrt[3]{y} - \frac{\delta}{R_1} \right)^{3(1-n)}$$

Решая уравнение (2.73) методом половинного деления, мы можем оценить значение  $R_{\max} = R_1 \cdot \sqrt[3]{\tilde{V}_{\max}}$ . При этом, если получено значение  $R_{\max} > R_\phi$ , то следует положить  $R_{\max} = R_\phi$ . Численный

эксперимент показывает, что относительная погрешность при нахождении  $R_{\max}$  с использованием уравнения (2.73) и при непосредственном интегрировании уравнения (2.70) менее 2%.

Результаты численных расчетов по уравнению (2.70) пульсаций сферической взрывной камеры, снабженной герметичной эластичной оболочкой при  $R_{\max} < R_{\phi}$ , представлен на рисунке 2.6.

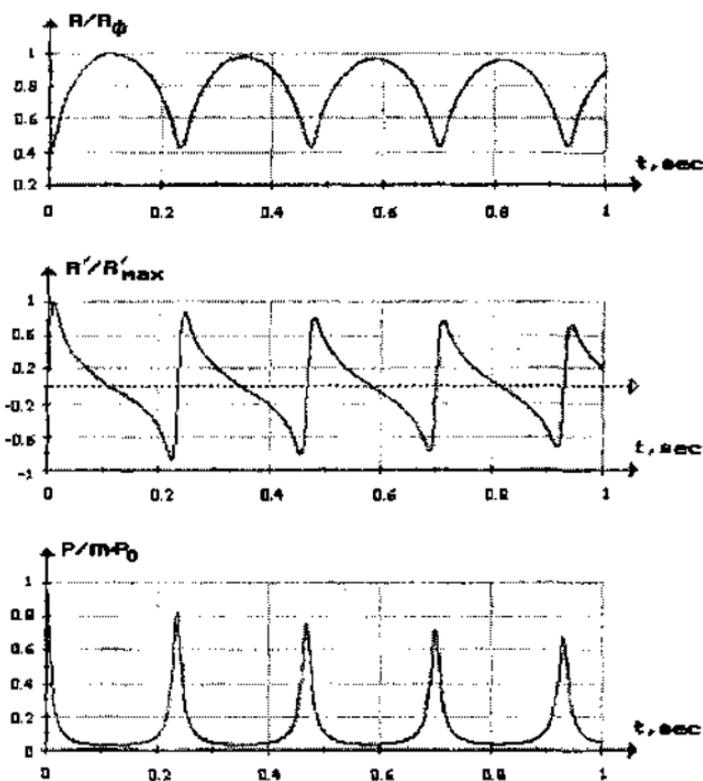


Рис. 2.6. Характер пульсаций сферической взрывной камеры в фильтре скважины при  $R_{\max} < R_{\phi}$ :  $R_1 = 3,9$  см,  $R_{\phi} = 10$  см,  $R_k = 15$  см,  $a = 0$  м,  $L_{\phi} = 4$  м,  $L_k = 30$  м,  $m = 10$ ,  $n = 1,21$ ,  $\mu = 0,62$ ,  $\delta = 1$  мм. Вычисленное значение  $R'_{\max} = 1,457$  м/с. Стационарное решение  $R = 6,8$  см. Радиус шара достигает максимального значения  $R_{\max} = 9,97$  см, что меньше  $R_{\phi}$ .

Из рисунка 2.6 следует, что при  $R_{\max} < R_{\phi}$ , радиус оболочки в процессе расширения возрастает до  $R_{\max}$  (рисунок 2.6,а), при этом скорость вначале растет, а затем к концу расширения уменьшается до нуля (рисунок 2,6,б), давление  $p$  в продуктах взрыва, вычисленное по формуле (3) при этом достигает минимального значения (рисунок 2,6,в). Вследствие потерь энергии пульсации продуктов взрыва имеют затухающий характер.

Предельной по диаметральному размеру взрывной камерой, из условия недопущения ее касания стенки фильтра при максимальном расширении, является камера, у которой  $R_{\max} \approx R_{\phi}$ .

Для определения величины импульса давления  $I$  с помощью программы решения уравнения (2.67) по формуле Симпсона вычислялось значение

$$I = \int_0^{t_1} p(t) dt, \quad \text{где } t_1 - \text{ момент времени, когда}$$

радиус пузыря принимает максимальное значение  $R_{\max}$ , а  $p(t)$  определяется по формуле (2.58). Обработка результатов вычислений при различных геометрических размерах взрывных камер, скважин и условиях подводного взрыва позволила предложить формулу для расчета импульса давления  $I$  для стадии расширения продуктов взрыва (при  $m = 10$  и  $E = 4$  мПа). Для получения формулы был использован метод наименьших квадратов.

Эта формула для импульса давления  $I$  имеет вид:

$$I = m p_0 \cdot k_n \cdot k_{\phi} \cdot \left( \frac{R_1}{R_{\phi}} \right)^{0,7} \cdot \frac{(l_{\phi} - a)^{0,015} \cdot (l_{\phi} + l_K - a)^{0,08} \cdot (1 + \delta)^{20}}{R_K^{0,79}}, \quad (2.74)$$

где  $k_n = 1,57 - 0,51 \cdot n + 0,032 \cdot n^2$  - коэффициент, учитывающий влияние коэффициента политропы  $n$ ,  
 $k_{\phi} = 0,00164 - 0,006 \cdot R_{\phi} + 0,43 \cdot R_{\phi}^2 - 0,86 \cdot R_{\phi}^3$ . Значения пере-

менных следует задавать в метрах. Ограничения на использование формулы следующие:  $R_{\phi} \in [0,08; 0,25]$ ,  $0,35R_{\phi} \leq R_1 \leq 0,55R_{\phi}$ ,  $R_{\phi} \leq R_K \leq 2R_{\phi}$ ,  $(l_{\phi} - a) \in [2; 18]$ ,  $l_K \in [20; 100]$ ,  $\delta \in [0,001; 0,005]$ ,  $n \in [1,17; 1,81]$ . При данных ограничениях результаты, полученные с использованием формулы (2.74), отличаются от соответствующих результатов вычисления  $I$  как интеграла с использованием формулы Симпсона не более чем на 6% (а для часто встречающихся конструкций скважин – менее чем на 3%). Ограничения на величину  $R_1$  вполне естественны, так как при  $R_1 < 0,35R_{\phi}$  значение  $I$  очень мало (что малоинтересно с точки зрения практического приложения), а при  $R_1 > 0,55R_{\phi}$  происходит «залипание» пузыря на стенке фильтра, и он не совершает колебаний.

Анализ формулы (2.74) показывает, что импульс давления  $I$  имеет практически линейный рост при возрастании длины фильтра и колонны (поскольку от них линейно зависит глубина  $H$  и, соответственно, давление  $p_0$ , а множители  $(l_{\phi} - a)^{0,015}$  и  $(l_{\phi} + l_K - a)^{0,08}$  вносят несущественный вклад), уменьшается с увеличением  $R_K$  и  $n$ , но увеличивается с ростом  $\delta$ .

#### **2.4. Влияние конденсации водяных паров на величину второго пика давления**

В общем случае решением энергетического уравнения, описывающего процесс пульсаций продуктов взрыва, является периодическая затухающая (вследствие потерь энергии) функция  $p=f(t)$ . Расчетная амплитуда второго пика давления  $A_{II}$  несколько меньше амплитуды первого пика  $A_I$ . В то же время в опытах с ВКГС (особенно это характерно для полужамкнутых камер) второй пик давления может в несколько раз превышать первый пик.

Это происходит вследствие того, что на стадии схлопывания продуктов взрыва, из-за тепловых потерь происходит частичная конденсация водяных паров. Оставшийся в схлопывающихся продуктах взрыва водяной пар, оказывает меньшее противодействие

сжатию полости окружающей жидкостью, поток которой устремляется во взрывную камеру, обладая высокой кинетической энергией. В торце камеры происходит резкое торможение потока и переход кинетической энергии в потенциальную (энергию давления). Подобное явление возникает при кавитации, когда захлопываются пузырьки пара, и в жидкости генерируются импульсы высокого давления.

Чтобы приближенно оценить давление  $p_{Г(V_{\min})}$  в продуктах взрыва в конце 1-го периода пульсации, когда их объем составит  $V_{\min}$ , воспользуемся подходом [65]. Будем считать, что давление в газовой полости  $p_{Г(V_{\max})}$  при максимальном объеме продуктов  $V_{\max}$  можно представить в виде суммы 2-х газообразных компонент:

$$p_{Г(V_{\max})} = p_{Г(V_{\max})} + p_{\text{Конд}}, \quad (2.75)$$

где  $p_{Г(V_{\max})}$  — парциальное давление газообразной компоненты при  $V_{\max}$ , способной к адиабатному сжатию с коэффициентом адиабаты  $k$  в процессе схлопывания;  $p_{\text{Конд}}$  — парциальное давление газообразной компоненты, способной к мгновенной конденсации в процессе схлопывания полости.

Приближенно, для процесса адиабатического схлопывания энергетическое уравнение для (2.75) имеет вид:  $A_{Г(V_{\max})} = W_{Г(V_{\min})}$ , где  $A_{Г(V_{\max})}$  — работа расширения против гидростатического давления  $p_0$  при создании полости с объемом  $V_{\max}$ ,  $W_{Г(V_{\min})}$  — потенциальная энергия продуктов взрыва при  $V_{\min}$ . После подстановки имеем

$$V_{\max} p_0 = \frac{p_{Г(V_{\min})} V_{\min}}{k-1}, \quad (2.76)$$

Отсюда

$$V_{\min} = V_{\max} \frac{p_0 (k-1)}{p_{Г(V_{\min})}}. \quad (2.77)$$

Из уравнения адиабатического процесса следует

$$P_{\Gamma(V_{\min})} V_{\min}^k = P_{\Gamma(V_{\max})} V_{\max}^k. \quad (2.78)$$

Отсюда давление внутри полости при  $V_{\min}$  равно

$$P_{\Gamma(V_{\min})} = P_{\Gamma(V_{\max})} V_{\max}^k / V_{\min}^k. \quad (2.79)$$

После подстановки (2.78) в (2.76) получим

$$P_{\Gamma(V_{\min})} = \frac{P_{\Gamma(V_{\max})}^{\frac{1}{1-k}}}{(p_0(k-1))^{\frac{k}{1-k}}}. \quad (2.80)$$

Обозначим через  $P_{\Gamma(V_{\min})}^*$  и  $P_{\Gamma(V_{\max})}^*$  давления в полости соответственно при ее объемах  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$  в отсутствии конденсации водяных паров при схлопывании.

Если при  $V_{\max}$  произошла конденсация  $\xi\%$  продуктов взрыва, тогда давление в полости составит  $P_{\Gamma(V_{\max})} = (1-0,1\xi)P_{\Gamma(V_{\max})}^*$ , и степень  $m_1$  увеличения давления при достижении  $V_{\min}$  с учетом (2.80) будет равна

$$m_1 = \frac{P_{\Gamma(V_{\min})}}{P_{\Gamma(V_{\min})}^*} = \left( \frac{(1-0,1\xi)P_{\Gamma(V_{\max})}^*}{P_{\Gamma(V_{\max})}^*} \right)^{\frac{1}{1-k}} = (1-0,1\xi)^{\frac{1}{1-k}}. \quad (2.81)$$

Так, например, при детонационном взрыве ВКГС ( $k=1,21$ ) и конденсации 10% продуктов взрыва ( $\xi=10\%$ ), согласно (2.81), степень увеличения давления составит:  $m_1=1,65$ , а при  $\xi=20\%$  получим  $m_1=3,45$ . При взрывном горении ( $k=1,17$ ) и  $\xi=10\%$  -  $m_1=1,86$ ; для  $\xi=20\%$  -  $m_1=3,71$ .

Сравнение экспериментальных и расчетных данных свидетельствуют о том, что измеренные значения периодов пульсации намного меньше расчетных, полученных из предположения о том, что

расширение и схлопывание продуктов взрыва происходит без теплообмена.

### Выводы по главе 2

1. Наряду с применением для газоимпульсной регенерации открытых снизу стальных взрывных камер, предложено также использование герметичных цилиндрических и сферических взрывных камер с тонкими эластичными оболочками.

2. Для описания гидродинамики подводного газового взрыва в закольцованном фильтре скважины, составлено энергетическое уравнение для процесса расширения газовой полости в открытой снизу взрывной камере, герметичных цилиндрических и сферических взрывных камерах с эластичными оболочками, находящихся внутри заполненной жидкостью скважины, с учетом сил трения и инерции при движении жидкости.

3. Полученные нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка решались численными методами. Составлены программы расчета, которые позволяют получить зависимости  $z(t)$ ,  $v(t)$ ,  $R(t)$ ,  $\frac{dR}{dt}$ ,  $p(t)$  и значения импульса давления  $I$  для перечисленных взрывных камер при различных параметрах скважин и камер. Для расчета импульса давления  $I$  также получены теоретические формулы.

Для определения максимальных размеров пузыря  $z_{\max}$  и  $R_{\max}$  (камеры с оболочками) получены выражения, которые решаются численным методом.

### **Глава 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕБИТА СКВАЖИН**

#### **3.1. Лабораторные исследования эффективности декольматации комбинированными методами**

Как показали натурные эксперименты, комбинированное импульсно-реагентное воздействие на кольматирующие отложения является достаточно эффективным [65–67]. Применение пневмообработок в реагенте на скважинах в некоторых случаях позволяет достигнуть увеличения удельных дебитов до 70–75% от первоначальных [18], а последовательное проведение электрогидроударной и реагентной обработок – вначале в 1,5–2 раза, а затем дополнительно в 1,5 раза [4].

Интенсивность снижения дебита скважин, обработанных комбинированными методами, оказалось в 1,5–2,5 раза ниже, чем по скважинам, фильтры которых были обработаны только импульсными способами. Стабильность работы скважин после электровзрывной и реагентной обработок возросла до 18–24 месяцев [4].

Цель исследований заключалась в том, чтобы в лабораторных условиях оценить эффективность декольматации старого скважинного фильтра комбинированным газоимпульсно-реагентным воздействием на всех ступенях его осуществления, и на этой основе выбрать оптимальный способ очистки фильтра скважины [68].

Для детального исследования был взят фрагмент закольматированного фильтра, извлеченного буровой компанией «Дельта» из водозаборной скважины водозабора «Неманица» г. Борисова.

Опытный фильтр имел значительную кольматацию осадками химического происхождения. Для изучения состава отложений пробы осадка отдельно отбирались с внутренней поверхности фильтра (из перфорационных отверстий) и наружной его поверхности (проволочной обмотки). Осадок представлял собой корку бледно-рыжего цвета на внутренней поверхности фильтра с наростами в районе перфорационных отверстий и сплошную беловатую корку на наружной поверхности. Наружная корка с частицами песка и гравия представляла собой единую с проволочной обмоткой фильтра неоднородную железобетонную конгломеративную структуру, в которой роль вяжущего играют кольматирующие отложения,

заполнителя – песок и гравий и арматуры – проволочная обмотка с продольными опорными стержнями. Поэтому проба с наружной поверхности содержала большое количество  $\text{SiO}_2$ .

Сравнительный анализ полученных данных по 2-м пробам показал, что качественный состав проб одинаков, но имеются существенные отличия по количественному составу. В кольматанте с наружной поверхности фильтра значительно меньше содержалось оксидов железа, но больше оксидов кальция, магния, калия и натрия. В то же время, в кольматанте, взятом из перфорационных отверстий, больше содержалось сульфатов и особенно сульфидов. На внутренней поверхности фильтра доминировали карбонаты, гидроксиды, сульфаты и сульфиды железа, а на наружной поверхности – карбонаты кальция, магния, соединения калия, натрия и алюминия, входящие в состав глин. Это указывает на неоднородность кольматанта по химическому составу.

Тестирование реагентов для растворения осадка позволило рекомендовать 20% соляную кислоту с добавками «Дескама» в количестве 2,5% по массе с временем обработки 16 часов.

Принципиальная схема опытного стенда для регенерации скважинных фильтров представлена на рисунке 3.1.

Стенд состоял из цилиндрического бака диаметром  $D = 0.7$  м и высотой  $H = 1$  м, грузоподъемного устройства, кольцевого бьефа с перфорированным цилиндром диаметром  $D = 0.43$  м, внутрь которого устанавливался фрагмент закольматированного скважинного фильтра диаметром  $D = 0.2$  м (8").

Фильтр предварительно взвешивали на весах и устанавливали в центральной части бака 1. Затем обсыпали песком, состоящим из фракции 1 - 1,8 мм согласно ТУ РБ 1000 16844-241-2001. После этого проводились гидравлические испытания модельной скважины. Строились индикаторные кривые связи понижения  $S$  в функции притока воды  $Q$  к фильтру, т.е.  $S = f(Q)$ . Понижение  $S$  определялось как разность напоров в кольцевом бьефе  $H_1$  и скважине  $H_2$ , т.е.  $S = H_1 - H_2$ . Приток  $Q$  определялся объемным методом, а удельный дебит  $q$  модельной скважины находили по формуле  $q = Q/S$ .

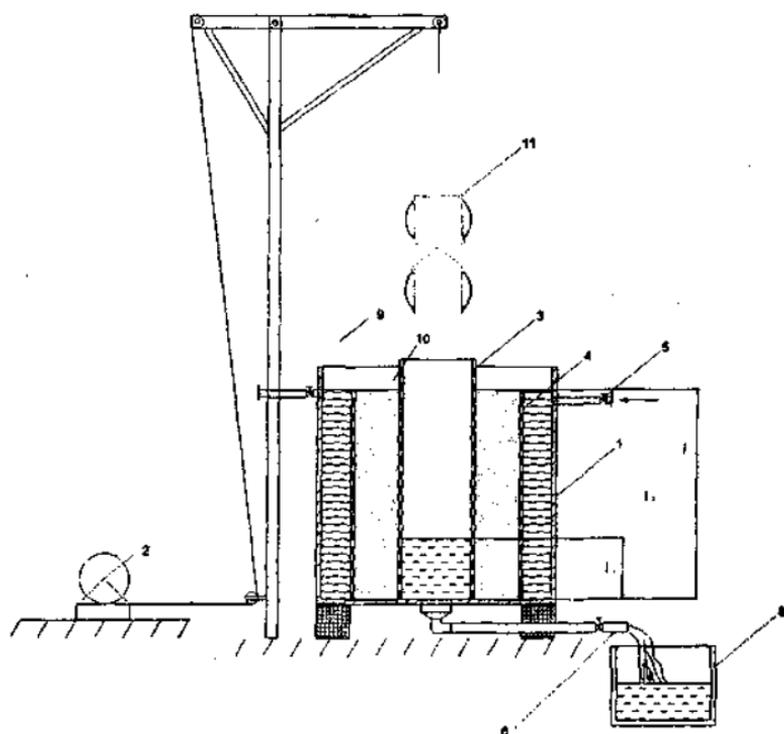


Рис 3.1. Принципиальная схема опытного стенда для регенерации скважинных фильтров:

- 1 – емкость; 2 – грузоподъемное устройство с поворотной стрелой;  
 3 – фрагмент фильтра; 4 – перфорированный цилиндр;  
 5 – подводящий патрубок; 6 – отводящий патрубок; 7 – холостой слив;  
 8 – мерный бак; 9 – игольчатый уровнемер; 10 – прифильтровой пьезометр;  
 11 – скважинное газодинамическое устройство

Эффективность регенерации фильтра модельной скважины определялась как отношение удельного дебита  $q_i$  – после  $i$ -й обработки, к удельному дебиту до обработки  $q_0$ , т.е.  $\mathcal{E} = (q_i / q_0)$ .

Лабораторные исследования проводились в следующем порядке. Внутри фильтра опускали скважинное газодинамическое устройство и производили обработку взрывами ВКГС нижней части фильтра длиной 0,5 м. Взрывы ВКГС осуществляли в режиме взрывного горения в открытой снизу цилиндрической взрывной камере с внутренним диаметром  $d = 150$  мм, геометрическим объемом  $V_k = 3$  дм<sup>3</sup>. Взрывы производились полной камерой с интервалом, равным

по высоте расстоянию от нижнего среза камеры до отражателя  $h = 0,07$  м. Каждая серия включала 8 импульсов.

На первом этапе применялось взрывная камера, снабженная манжетным пакером (рисунок 3.2, а), который автоматически при взрыве отделял участок обрабатываемого фильтра от выше и ниже лежащего ствола скважины. Это достигалось установкой эластичных резиновых манжет на взрывной камере и отражателе. Манжеты при расширении и схлопывании продуктов взрыва прижимались к внутренней поверхности фильтра.

На втором этапе использовались пневматические пакеры, которые перед взрывом надувались сжатым воздухом от компрессора (рисунок 3.2, б).

На следующем этапе в фильтр заливали  $120 \text{ дм}^3$  20% раствора HCl с 2,5% добавкой кислотного чистящего средства «Дескам», что обеспечивало реагентную обработку нижней части фильтра длиной 0,5 м в режиме реагентной ванны. Время реагентной обработки составляло 16 часов.

После каждой обработки производилась оценка эффективности регенерации по изменению притока воды  $Q$  в фильтр, удельного дебита  $q_i$ , а также посредством визуального осмотра фильтра до и после обработки и определением качества очистки путем замера площади очищенной поверхности  $S_i$  и сравнения ее с общей площадью очищаемой поверхности  $S_{\text{общ}}$ , по формуле  $n = \frac{S_i}{S_{\text{общ}}} \cdot 100\%$ .

Отдельно определялось значения  $n_{\text{вн}}$  для внутренней поверхности фильтра и  $n_{\text{нар}}$  для наружной поверхности.

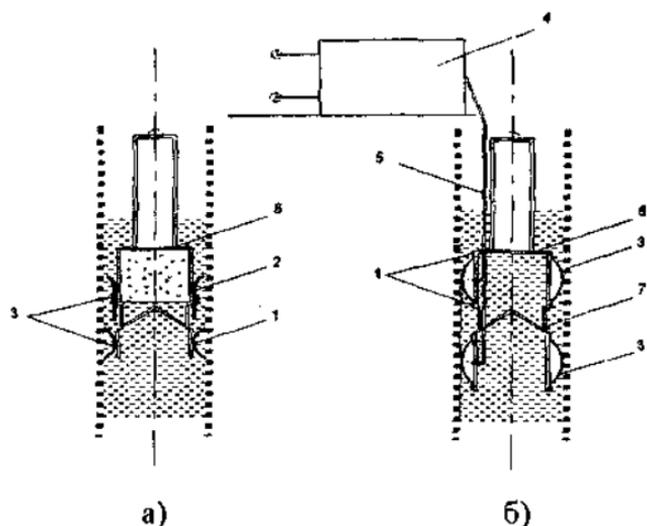


Рис. 3.2. Схемы пакеров:

а) манжетный пакер; б) пневматический пакер;

- 1 – металлический хомут; 2 – резиновая манжета; 3 – уплотнительный элемент с защитной крышкой; 4 – компрессор; 5 – шланг; 6 – взрывная камера; 7 – отражатель

Основные результаты гидравлических исследований приведены в таблице 3.1. Из анализа результатов следует, что 1-я импульсная обработка взрывами ВКГС позволила увеличить удельный дебит модельной скважины в среднем в 2,8 раза (удельный дебит сравнивался при равных водопонижениях  $S$ ), т.е.  $q_1 = 2,8 q_0$ . Однако визуальный осмотр фильтра показал, что его поверхность осталась полностью покрытой кольматирующими отложениями и полученный прирост удельного дебита можно объяснить образованием трещин в результате радиальных растягивающих нагрузок от взрывов ВКГС.

Давление взрыва в камере составляло  $p_{взр} = 1$  МПа, что меньше по величине предела прочности кольматирующих отложений и значения II-ого предельного давления  $p_{II}$  при котором образуются сквозные трещины шириной более 0,2 мм, не обладающие эффектом «самозалечивания» при снятии нагрузок [69].

Дальнейшие опыты показали, что полученные трещины оказались недолговечными, произошло их частичное закрытие и быстрая кольматация фильтра по свежим сколам. Это подтвердили результаты 2-й обработки, которая обеспечила сохранение удельного

дебита только на уровне  $q_2 = 1,4 q_0$  (см. таблицу 3.1). Третья импульсная обработка с применением пневмопакеров позволила частично вернуть удельный дебит к уровню первой обработки:  $q_3 = 2,3 q_0$ . При этом по результатам внешнего осмотра качественных изменений в удалении отложений не произошло.

После реагентной обработки в режиме реагентной ванны в течение 16 часов, удалось достигнуть значительного прироста удельного дебита:  $q_5 = 137 q_0$ . В то же время визуальный осмотр фильтра показал, что на внешней поверхности фильтра и каркаса с внутренней стороны осталось соответственно и (25–30)% отложений. Оставшиеся отложения необходимо удалять импульсной или виброимпульсной обработкой, что доказывает необходимость их проведения на заключительном этапе восстановительных работ.

Таблица 3.1. Результаты исследований по определению эффективности регенерации фильтра

№ опыта	Условия эксперимента	№ измерения	Приток $Q$ , $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	$S$ , м	$q$ , $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	Средняя эффективность $\mathcal{E} = \frac{q_i}{q_0}$	Качество очистки $n = \frac{S_i}{S_{\text{общ}}}$
1	До декольматации. Вес фильтра $G = 56,2 \text{ кг}$	1	5,22	0,068	76,8		—
		2	7,87	0,112	70,26		
		3	11,8	0,191	61,8		
		4	17,5	0,328	53,35		
2	После 1-ой серии импульсов $V_r = 3 \text{ дм}^3$ $h' = 0,07 \text{ м}$ с манжетным пакером	1	22	0,114	193,0	2,8	$n_{\text{ан}} = 5\%$ $n_{\text{нар}} = 0$
		2	32,6	0,188	173,4		
		3	43,0	0,294	146,3		
		4	54,0	0,416	129,8		
		5	60	0,498	120,5		

3	После 2-й серии импульсов через 5 дней после первой обработки $V_r = 3 \text{ дм}^3$ $h' = 0,07 \text{ м}$ с манжетным пакером	1	11	0,101	108,9	1,4	-
		2	23	0,318	72,3		
		3	27	0,423	63,8		
		4	30	0,52	57,7		
4	После 3-й серии импульсов через 30 дней после второй обработки $V_r = 3 \text{ дм}^3$ $h' = 0,07 \text{ м}$ с пневмопакером	1	37	0,288	128,47	2,3	$\eta_{\text{ви}} = 15\%$
		2	40	0,361	110,8		$\eta_{\text{нар}} = 0$
5	После реagentной ванны (объем 20% HCl-120 дм <sup>3</sup> ) в течение 16 часов. Вес фильтра $G = 54,2 \text{ кг}$	1	590	0,052	11346	137	$\eta_{\text{ви}} = 75\%$
		2	800	0,072	11111		$\eta_{\text{нар}} = 70\%$

На рисунке 3.3 представлен фрагмент внутренней и внешней части фильтра до и после проведения регенерации.

а)



б)

до

после



Рис. 3.3. Фрагмент внутренней (а) и внешней (б) части фильтра до и после проведения регенерации

### **Выводы по разделу 3.1**

Несмотря на хорошие количественные результаты по увеличению удельного дебита модельной скважины после комбинированной обработки ( $q_5 = 137 q_0$ ), качественные показатели степени очистки каркаса фильтра и водоприемной поверхности соответственно составили (70–75)%. Это указывает на необходимость проведения последующих импульсной или виброимпульсной обработок после реагентной.

Опыт применения газоимпульсной обработки скважинного фильтра взрывом ВКГС при давлениях  $p_{взр}$  менее второго предельного давления  $p_{II}$  ( $p_{взр} < p_{II}$ ) подтвердил образование мелких трещин, которые обладают эффектом «самозалечивания».

Ширина созданных при таких давлениях взрыва ВКГС трещин оказалась недостаточной для последующего внесения туда обратным гидротоком относительно крупных частиц песка и их расклинивания с обеспечением устойчивой фильтрации воды.

Применение пневматического пакера подтвердило его более высокую эффективность по сравнению с манжетным пакером.

### **3.2. Теоретический расчет удельных затрат кислотных реагентов**

Опыт подбора реагентов показывает, что универсальным средством для растворения многокомпонентных кольматантов, характерных для зоны активного водообмена Республики Беларусь, является соляная кислота [12].

Количество соляной кислоты, заливаемой в скважину, обычно оценивается по формуле [1]

$$M_{HCl} = 1,2 K_c \cdot M_k, \quad (3.1)$$

где  $M_{HCl}$ ,  $M_k$  – массы соответственно соляной кислоты (в пересчете на хлористый водород 100%-й концентрации) и кольматанта  $K_c$  – коэффициент удельного расхода реагента.

Коэффициент удельного расхода реагента  $K_c$  характеризует собой удельные затраты реагента на растворение кольматанта единичной массы и представляет собой соотношение количеств, вступа-

падающих в реакцию кольматанта и реагента, его можно рассчитать по формуле

$$K_c = \frac{m_{\text{HCl}}}{m_k}, \quad (3.2)$$

где  $m_{\text{HCl}}$  — масса хлористого водорода (100% концентрации), необходимого для растворения кольматанта единичной массы  $m_k$ .

При ошибочно заниженной величине  $K_c$ , кислоты может не хватить, что приведет к выпадению из раствора хлопьев хлорида железа  $\text{FeCl}_3$  и вызовет вторичную кольматацию пород прифильтровой зоны. При ошибочно завышенной величине  $K_c$  возрастет расход кислоты. Это приведет к удорожанию восстановительных работ как по затратам на материалы, так и в части затрат на увеличение продолжительности откачки после реакции.

Коэффициент  $K_c$ , ввиду сложного состава кольматанта, определяют лабораторным путем по фактическому расходу реагента на растворение проб кольматирующих отложений, взятых из фильтра скважины.

Однако при отсутствии проб и технической возможности проведения таких исследований, а также при предварительном расчете величины  $K_c$  на стадии планирования восстановительных работ, возникает необходимость в определении этого коэффициента по уже имеющимся данным о химическом составе кольматанта.

Определив величину  $K_c$  теоретически, можно вычислить по формуле (3.1) потребное количество реагента для обработок и сметную стоимость восстановительных работ [70].

Поэтому целью исследований являлась разработка методики теоретического расчета коэффициента удельного расхода реагента  $K_c$  по известному химическому составу кольматанта и экспериментальная проверка полученного результата.

В работе использовали кольматанты ряда скважин Минских водозаборов, каптирующих днепровско-сожский водоносный горизонт. Скважины имели глубины 50–70 м и были оснащены проволочными фильтрами диаметром  $D = 325$  мм длиной 15–20 м. Срок эксплуатации скважин 15–30 лет. Образцы кольматанта отбирали в специальную ловушку при газоимпульсной обработке фильтра.

Химический состав определяли в лаборатории ПО «Белгеология» (см. таблицу 3.2).

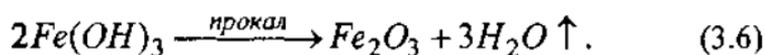
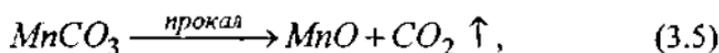
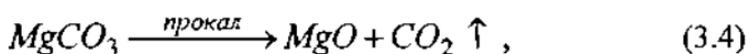
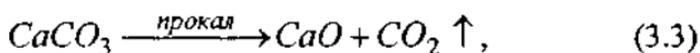
Таблица 3.2

Химический состав кольматантов

Скв.18 «Зеленовка»	Скв.56 «Боровляны»	Скв.286 «Новинки»	Скв.296 «Дражня»	Место отбора кольматанта	Содержание по весу, %
3,93	4,55	7,72	4,92	SiO <sub>2</sub>	
0,02	<0,01	0,01	<0,01	TiO <sub>2</sub>	
0,43	0,31	0,57	0,29	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
79,5	70	68,73	63,89	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
0,40	5	1,5	0,92	MnO	
0,37	3,47	3,86	7,72	CaO	
<0,8	<0,02	0,56	<0,2	MgO	
0,12	0,1	0,1	0,03	K <sub>2</sub> O	
0,20	0,21	0,15	0,15	Na <sub>2</sub> O	
0,2	1,12	2,88	7,63	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
0,25	0,34	0,2	0,24	SO <sub>3</sub>	
13,21	15,37	14,22	14,71	ППП*	
0,53	0,78	0,84	0,36	FeO	

Примечание\* ППП – потери при прокаливании.

В таблице 3.2 результаты химического анализа представлены в виде оксидов основных элементов, хотя кольматант представляет собой многокомпонентную систему, включающую в себя соли кальция, магния, марганца (карбонаты), соединения железа в виде гидроксида, оксида, сульфида, фосфата. Например, содержание  $Fe_2O_3$  в анализе дает количественную характеристику суммы всех железосодержащих соединений:  $Fe(OH)_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FePO_4$ ,  $FeS$ , а процент  $CaO$ ,  $MnO$ ,  $MgO$  – карбонатов:  $CaCO_3$ ,  $MnCO_3$ ,  $MgCO_3$ . Потери при прокаливании ( $900^\circ C$ ) характеризуют то количество веществ, которые удаляются при разложении карбонатов – углекислый газ  $CO_2$  и прокаливании гидроксида железа – пары воды  $H_2O$  согласно реакциям:



Необходимо отметить относительно высокое содержание в кольматанте  $SiO_2$ , обусловленное включениями частиц песка и глины, которые не взаимодействуют с кислотой  $HCl$  и будут находиться в откачиваемой жидкости в виде шлама.

Произведем теоретический расчет затрат соляной кислоты 100% концентрации на растворение 100 кг кольматанта известного химического состава (в дальнейшем удельная масса кислоты). Все количественные расчеты произведем на 100 кг кольматанта, т.е. при  $m_k = 100$  кг. Введем обозначение  $M.B.$  – молекулярный вес.

Будем исходить из того, что полная потребная масса соляной кислоты  $m_{HCl}$  равна массе кислоты  $m'_{HCl}$ , пошедшей на растворение карбонатовосодержащего кольматанта, плюс масса кислоты  $m''_{HCl}$ , пошедшей на растворение железосодержащего кольматанта, т.е.

$$m_{HCl} = m'_{HCl} + m''_{HCl}. \quad (3.7)$$

Определяем массу карбонатовосодержащего кольматанта  $m_{кар}$  в 100 кг кольматанта и величину  $m'_{HCl}$ .

Разложение карбонатов при прокаливании представим уравнениями реакций (3.3)–(3.5).

Согласно уравнению (3.3), зная процентное содержание оксидов кальция  $CaO$  в кольматанте, которое численно равно массе  $CaO$  в 100 кг кольматанта –  $m_{CaO}$ , находим массу карбоната кальция  $m_{CaCO_3}$  из выражения

$$m_{CaCO_3} = \frac{m_{CaO} \cdot M.B. CaCO_3}{M.B. CaO}. \quad (3.8)$$

Аналогично выражению (3.8) определяем массы карбонатов магния –  $MgCO_3$  и марганца  $MnCO_3$  и суммарное значение карбонатов  $m_{кар}$

$$m_{кар} = m_{CaCO_3} + m_{MgCO_3} + m_{MnCO_3}. \quad (3.9)$$

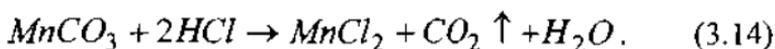
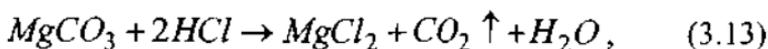
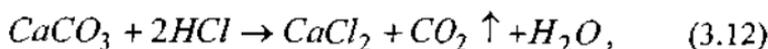
Массу выделившегося углекислого газа  $m_{(CO_2)}$ , при разложении  $CaCO_3$  по уравнению (3.3) определим из выражения

$$m_{(1)CO_2} = \frac{m_{CaO} \cdot M.B.CO_2}{M.B.CaO}. \quad (3.10)$$

Аналогично выражению (3.10) определим массу углекислого газа  $m_{(2)CO_2}$ , выделяющегося при разложении карбоната магния и массу углекислого газа  $m_{(3)CO_2}$ , выделяющегося при разложении карбоната марганца согласно уравнениям (3.4)-(3.5), а также суммарную массу углекислого газа  $m_{CO_2}$

$$m_{CO_2} = m_{(1)CO_2} + m_{(2)CO_2} + m_{(3)CO_2}. \quad (3.11)$$

Реакция взаимодействия карбонатов с соляной кислотой происходит согласно уравнениям



По уравнению реакции (3.12) определяем массу хлорида кальция  $m_{CaCl_2}$  с учетом ранее найденного значения  $m_{CaCO_3}$  по формуле

$$m_{CaCl_2} = \frac{m_{CaCO_3} \cdot M.B.CaCl_2}{M.B.CaCO_3}. \quad (3.15)$$

Далее аналогично по уравнениям (3.13) – (3.14) находим массы:  $m_{MgCl_2}$  и  $m_{MnCl_2}$ , и общую массу хлоридов  $m_{хл}$

$$m_{хл} = m_{CaCl_2} + m_{MnCl_2} + m_{MgCl_2}. \quad (3.16)$$

Расход кислоты  $m'_{(1)HCl}$  для получения хлоридов кальция массой  $m_{CaCl_2}$  с учетом уравнения реакции (3.12) находим из выражения

$$m'_{(1)HCl} = \frac{m_{CaCl_2} \cdot 2M.B.HCl}{M.B.CaCl_2}. \quad (3.17)$$

Аналогично (3.17) находим потребные массы кислоты  $m'_{(2)HCl}$  и  $m'_{(3)HCl}$  для растворения карбоната магния массой  $m_{MgCl_2}$  и карбоната марганца массой  $m_{MnCl_2}$  согласно уравнениям реакции (3.13) (3.14) и суммарное количество кислоты  $m'_{HCl}$  для растворения карбонатов

$$m'_{HCl} = m'_{(1)HCl} + m'_{(2)HCl} + m'_{(3)HCl}. \quad (3.18)$$

Определяем массу железосодержащего кольтманта  $m_{ж.к.}$  и потребное количество соляной кислоты  $m''_{HCl}$  для его растворения.

Разложение гидроксида железа  $Fe(OH)_3$  при прокаливании представляем уравнением реакции (3.6).

Массу воды  $m_{H_2O}$ , пошедшей на испарение, определяем как разность между значением массы потерь при прокаливании —  $m_{п.п.}$  (см. таблицу 3.2) и массы найденного ранее углекислого газа  $m_{CO_2}$

$$m_{H_2O} = m_{п.п.} - m_{CO_2}. \quad (3.19)$$

Используя уравнение реакции (3.18) с учетом (3.19) определяем сначала массу гидроксида железа  $m_{Fe(OH)_3}$ , а затем соответствующую ему по уравнению (3.18) массу оксида железа  $m'_{Oж.}$

$$\begin{cases} m_{Fe(OH)_3} = \frac{m_{H_2O} \cdot 2M.B. Fe(OH)_3}{3M.B. H_2O}, \\ m'_{OЖ} = \frac{m_{Fe(OH)_3} \cdot M.B. Fe_2O_3}{2M.B. Fe(OH)_3}. \end{cases} \quad (3.20)$$

Затем, зная по химическому анализу (см. таблица 3.2) общее содержание оксидов железа  $\sum m_{OЖ}$  (численно равное процентному содержанию  $Fe_2O_3$  в таблице 3.2) вычитаем из него найденную массу  $m'_{OЖ}$  и получаем массу соединений железа  $m''_{OЖ}$ , соответствующих соединениям кольматанта ( $Fe_2O_3$ ,  $FePO_4$ ,  $FeS$ ), т.е.

$$m''_{OЖ} = \sum m_{OЖ} - m'_{OЖ}. \quad (3.21)$$

По данным химического анализа кольматанта и найденному значению  $m''_{OЖ}$  рассчитываем массы химических элементов:  $m_{Fe_{общ}}$ ,

$m_{Fe^{3+}}$ ,  $m_{Fe^{2+}}$  и  $m_P$  в 100 кг кольматанта.

Величину  $m_{Fe_{общ}}$  находим по формуле

$$m_{Fe_{общ}} = \frac{m''_{OЖ} \cdot M.B. Fe_2}{M.B. Fe_2O_3}. \quad (3.22)$$

Массу  $m_{Fe^{2+}}$  находим по формуле

$$m_{Fe^{2+}} = \frac{m_{FeO} \cdot M.B. Fe}{M.B. FeO}, \quad (3.23)$$

где  $m_{FeO}$  — масса  $FeO$  в 100 кг кольматанта, численно равная содержанию  $FeO$  в пробе (таблица 3.2).

Массу фосфора  $m_P$  находим аналогично

$$m_P = \frac{m_{P_2O_5} \cdot M.B.P_2}{M.B.P_2O_5} \quad (3.24)$$

где  $m_{P_2O_5}$  – масса  $P_2O_5$  в 100 кг кольтманта, численно равная содержанию  $P_2O_5$  в пробе (таблица 3.2).

Масса  $m_{Fe^{3+}}$  равна

$$m_{Fe^{3+}} = m_{Fe_{общ}} - m_{Fe^{2+}} \quad (3.25)$$

Рассчитываем массу сульфида железа  $m_{FeS}$  в 100 кг кольтманта с учетом (3.23)

$$m_{FeS} = \frac{m_{Fe^{2+}} \cdot M.B.FeS}{M.B.Fe} \quad (3.26)$$

Масса фосфата железа  $m_{FePO_4}$  в 100 кг кольтманта с учетом (3.24) равна

$$m_{FePO_4} = \frac{m_P \cdot M.B.FePO_4}{M.B.P} \quad (3.27)$$

Масса трехвалентного железа  $m'_{Fe^{3+}}$  в данной массе фосфата железа  $m_{FePO_4}$  равна

$$m'_{Fe^{3+}} = \frac{m_{FePO_4} \cdot M.B.Fe}{M.B.FePO_4} \quad (3.28)$$

Масса трехвалентного железа  $m''_{Fe^{3+}}$  в дегидратированной массе железосоставляющих соединений кольматанта равна

$$m''_{Fe^{3+}} = m_{Fe^{3+}} - m'_{Fe^{3+}}. \quad (3.29)$$

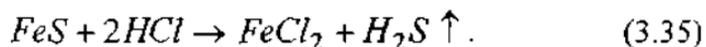
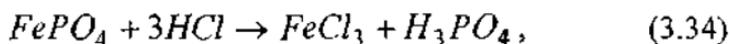
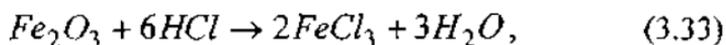
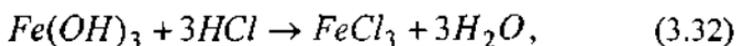
Тогда масса  $Fe_2O_3$  -  $m_{Fe_2O_3}$  в 100 кг кольматанта равна

$$m_{Fe_2O_3} = \frac{m''_{Fe^{3+}} \cdot M.B. Fe_2O_3}{M.B. Fe}. \quad (3.30)$$

Определяем общую массу железосоставляющих соединений кольматанта  $m_{жк}$ :

$$m_{жк} = m_{Fe(OH)_3} + m_{FeS} + m_{FePO_4} + m_{Fe_2O_3}. \quad (3.31)$$

Эти соединения реагируют с соляной кислотой в соответствии со следующими уравнениями



Согласно уравнению (3.32) и ранее определенному значению  $m_{Fe(OH)_3}$  находим массу хлорида железа  $m_{FeCl_3}$  и потребное количество соляной кислоты  $m''_{(1)HCl}$  из следующих выражений.

$$\left\{ \begin{aligned} m_{\text{FeCl}_3} &= \frac{m_{\text{Fe}(\text{OH})_3} \cdot M_{\text{FeCl}_3}}{M_{\text{Fe}(\text{OH})_3}} \\ m_{(1)\text{HCl}}^n &= \frac{m_{\text{FeCl}_3} \cdot 3M_{\text{HCl}}}{M_{\text{Fe}(\text{OH})_3}} \end{aligned} \right. \quad (3.36)$$

Аналогично, используя уравнения реакций (3.33) – (3.35), зная массы:  $m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ ,  $m_{\text{FePO}_4}$ ,  $m_{\text{FeS}}$ , находим соответствующие им потребности массы соляной кислоты  $m_{(2)\text{HCl}}^n$ ,  $m_{(3)\text{HCl}}^n$  и  $m_{(4)\text{HCl}}^n$ .

Находим полную массу солей  $m_{\text{сол}}$ , как сумму образующихся хлоридов железа  $\sum m_{\text{FeCl}_3}$ ,  $m_{\text{FeCl}_2}$  и массу слабодиссоциированной ортофосфорной кислоты  $m_{\text{H}_3\text{PO}_4}$ .

$$m_{\text{сол}} = \sum m_{\text{FeCl}_3} + m_{\text{FeCl}_2} + m_{\text{H}_3\text{PO}_4}. \quad (3.37)$$

Потребное количество соляной кислоты для растворения железосодержащего кольматанта составит

$$m_{\text{HCl}}^n = m_{(1)\text{HCl}}^n + m_{(2)\text{HCl}}^n + m_{(3)\text{HCl}}^n + m_{(4)\text{HCl}}^n. \quad (3.38)$$

По формуле (3.7) определяем полную массу соляной кислоты  $m_{\text{HCl}}$ , необходимую для растворения 100 кг кольматанта.

Определяем теоретическую величину коэффициента удельного расхода реагента  $K_{\text{с теор}}$  по формуле

$$K_{\text{с теор}} = \frac{m_{\text{HCl}}}{100}. \quad (3.39)$$

Находим теоретическую величину коэффициента образования солей  $K_{\text{сол теор}}$ , как отношение полной массы образовавшихся солей  $m_{\text{сол}}$  к 100 кг кольматанта

$$K_{\text{сол теор}} = \frac{m_{\text{сол}}}{100} \quad (3.40)$$

В таблице 3.3 представлены значения коэффициентов  $K_{\text{с теор}}$  и  $K_{\text{сол теор}}$  для приведенных в таблице 3.2 химических составов кольматантов.

Таблица 3.3. Теоретические значения  $K_{\text{с теор}}$  и  $K_{\text{сол теор}}$  кольматантов скважин

Место отбора кольматанта	$K_{\text{с теор}}$	$K_{\text{сол теор}}$
Скв. №18 «Зеленовка»	1,109	1,636
Скв. №296 «Дражня»	0,984	1,51
Скв. №286 «Новинки»	1,01	1,51
Скв. №56 «Боровляны»	1,058	1,59

Для сравнения теоретических значений коэффициентов  $K_c$  с экспериментальными данными, производились лабораторные исследования по растворению кольматанта скважины №18 «Зеленовка» по следующей методике.

Мелкоизмельченный воздушно-сухой кольматант взвешивался на электронных весах с точностью до 0,001 грамма и помещался в раствор соляной кислоты плотностью  $\rho = 1,164 \text{ г/см}^3$  массовой концентрацией 33%.

Объем реагента в опытах был постоянен и составлял 12 мл, что соответствовало  $m_{\text{HCl}} = 4,609 \text{ г}$ . Массу кольматанта брали с избытком, чтобы вся кислота прореагировала без остатка. С этой целью опыт проводился в течение 5 суток и отсутствие остаточной кислоты контролировалось по  $pH$  раствора в конце опыта.

После реакции продукты реакции разбавляли в 20–30 раз водой и фильтровали через предварительно взвешенный бумажный фильтр:

фильтрат отбрасывали, твердую массу высушивали на воздухе до постоянного веса, взвешивали.

Масса кольматанта  $m_k$ , пошедшая на реакцию, определялась в выражения

$$m_k = m_{k_1} - m_{k_2}, \quad (3.41)$$

где  $m_{k_1}$ ,  $m_{k_2}$  — массы кольматанта соответственно до и после реакции.

Результаты экспериментов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Результаты лабораторных опытов

№ опыта	Масса соляной кислоты $m_{HCl}$ , г	Масса кольматанта, г				$K_c = \frac{m_{HCl}}{m_k}$
		до реакции $m_{k_1}$	после реакции $m_{k_2}$	вступившего в реакцию $m_k$		
1	4,609	6,039	1,932	4,107	1,122	
2		5,932	1,776	4,156	1,109	
3		5,768	1,696	4,072	1,132	
4		5,133	1,209	3,924	1,175	
5		7,144	3,013	4,131	1,116	
6		6,291	2,210	4,081	1,129	
7		5,654	1,719	3,935	1,171	
8		6,018	1,988	4,030	1,144	
					$K_{c,ср} = 1,137$	

Степень совпадения вычисленного ( $K_c = 1,109$ ) и экспериментального ( $K_c = 1,137$ ) значений коэффициента стехиометрии реакции растворения кольматанта характеризуется величиной относительного отклонения, равной 2,7%, что не превышает допустимое значение для инженерных исследований (5%).

## **Выводы по разделу 3.2**

На основе учета баланса веществ, вступающих в реакции взаимодействия основных компонентов кольматирующих отложений с соляной кислотой, и имеющихся данных о процентном содержании компонентов в кольматанте единичной массы, получены теоретические зависимости для расчета удельных затрат соляной кислоты на растворение кольматанта.

Проведены лабораторные эксперименты по растворению отложений скважины №18 «Зеленовка», выполнено сравнение опытных и расчетных данных, относительное отклонение не превысило 3%.

Разработанная методика расчета удельных затрат реагента позволяет рассчитать его полный расход на скважину при планировании ее текущего ремонта.

## **3.3. Полевые испытания комбинированной технологии**

Целью полевых испытаний являлась отработка и совершенствование комбинированной технологии восстановления дебита скважин в производственных условиях.

**Предлагаемые технологические схемы.** При отработке технологии исследовалась эффективность в двух технологических схемах: 1) газоимпульсная обработка фильтра с последующей его реагентной очисткой в режиме реагентной ванны в негерметизированной скважине и далее - виброволновая обработка при одновременной откачке эрлифтом; 2) газоимпульсная обработка фильтра с последующей его реагентной очисткой в режиме циклического задавливания сжатым воздухом в герметизированной скважине и виброволновая обработка при одновременной откачке эрлифтом [71].

Основное отличие 1-й технологической схемы от второй заключается в проведении реагентной обработки в незагерметизированной скважине, но с использованием кислотной флейты, которая позволяет адресно обрабатывать наиболее закольматированные участки фильтра и экономить кислоту по сравнению со 2-й схемой обработки, где при задавливании реагента сжатым воздухом он может поглощаться наиболее проницаемыми участками фильтра. Вторая схема требует применения несколько более сложного

технологического оборудования для герметизации скважины, однако является особенно эффективной при регенерации длительно эксплуатирующихся скважин, имеющих фильтры большого диаметра со значительным контуром гравийной обсыпки.

Для реализации 2-й технологической схемы разработано специальное технологическое оборудование, отличительной особенностью которого является совмещение эрлифтного водоподъемника с герметизированным оголовком, смонтированным на устье скважины (рисунк 3.4).

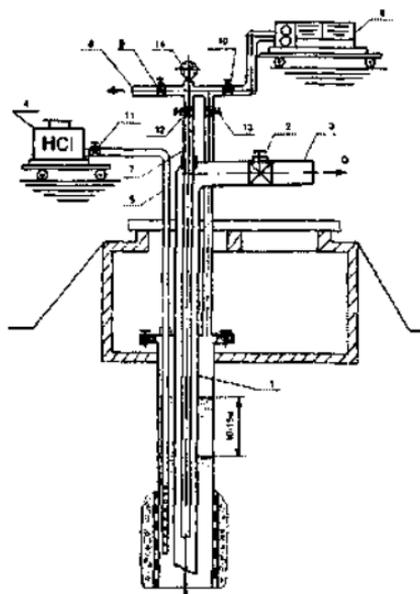


Рис. 3.4. Схема обвязки скважины при циклической реагентной обработке:  
 1 – эрлифт; 2 – вентиль эрлифта; 3 – сбросной шланг эрлифта; 4 – емкость с кислотой; 5 – заливочный шланг; 6 – компрессор; 7 – воздухопроводная труба;  
 8 – воздухосбросной патрубок; 9 – 13 – запорно-регулирующая арматура;  
 14 – манометр

Оборудование позволяет производить циклическое задавливание реагента в прифильтровую зону до полного окончания растворения отложений и откачивать продукты реакции без дополнительных монтажных операций, что способствует снижению трудозатрат и повышает безопасность ведения работ.

**Испытания технологических схем.** Сравнительные испытания в двух технологических схем производились на высокодебитных скважинах водозаборов г. Минска: «Зеленовка», «Дражня», «Новинки», «Боровляны» и г. Слонима («Рыщицы»), которые каптируют межморенный днепровско-сожский водоносный горизонт. Они имеют глубины 50–70 м, оборудованы проволочными фильтрами из нержавеющей стали D 325 мм и длиной 10–20 м с гравийной обсыпкой толщиной  $\delta = (150-300)$  мм.

В качестве реагента при обработках скважин использовался реагент оптимального состава -20%-й раствор синтетической соляной кислоты со стабилизирующей добавкой триполифосфата натрия концентрацией 0,01% и кислотного средства «Дескам» 5%-й концентрации в качестве антикоррозионной добавки.

Данные о скважинах и параметрах газоимпульсно – реагентно-виброволновой декольматации при 1-й и 2-й технологических схемах приведены в таблицах 3.5 и 3.6 соответственно.

Таблица 3.5. Параметры скважин и условия проведения обработок газои́мпульсно-реагентно-ви́броволновой технологией с использованием реагентной ванны

№ скважин	Месторасположение скважины (срок эксплуатации, лет)	Глубина, м	Количество импульсов ( $E_0=70$ кДж)	Время реагентной обработки, час	Масса 35% $HCl$ , кг	Время виброобработки, мин
		длина фильтра, м				
№18 (08.2003)	«Зеленовка» (17)	78/13,5	56	20	1600 кг $HCl$ + 2кг триполифосфата натрия	173
№286 (07.04)	— " — (20)	61/19	76	22	1500 кг $HCl$ + 100кг «Дескам»	60
№196 (08.04)	— " — (29)	66,7/10.4	40	24	1536 кг $HCl$ + 100кг «Дескам»	90
№7 (08.04)	«Рыщицы»	75/20	100	24	1800 кг $HCl$ + 100кг «Дескама»	—

Таблица 3.6. Данные об условиях применения газомпульсно-реагентно-виброволновой технологии с использованием циклического задавливания реагента

№ скважин (дата работ)	Месторасположение (возраст, лет)	Глубина, м	Количество им- пульсов ( $E_0=70$ кДж), шт	Продолжительность газомпульсной обра- ботки, час	Характери- стика цикла		Коли- чество цик- лов, шт	Общая продолжитель- ность реагентной об- работки, час	Масса 35% HCl, кг	Продол- житель- ность вибро- волновой обра- ботки, час
		Длина фильтра, м			задавливание, мин	сброс давления, мин				
06 (12.04)	«Драж- ня» (13)	74,8/20,7	80	6	15	15	4	20	1777 кг HCl +200 кг «Дескам»	
296 (08.05)	«Драж- ня» (29)	70/12	72	9	8	10	5	24	1885 кг HCl +86 кг «Дескам»	2
28 (08.05)	«Новин- ки» (18)	55/18	90	10	8	8	7	20	1800 кг HCl +100 кг «Дескам»	2
56 (11.05)	«Боров- ляны» (27)	55/12	60	10	8	8	8	24	1600 кг HCl +100 кг «Дескам»	0,5

Таблица 3.7. Эффективность восстановления скважин  
газоимпульсно-реагентно-виброволновой технологией

№ скважин	Первоначальный удельный дебит, м <sup>2</sup> /ч	Газоимпульсная обработка		Увеличение удельного дебита раз	Реагентная обработка		Виброволновая обработка		Общее увеличение удельного дебита, раз	Восстановление удельного дебита относительно первоначального, %
		удельный дебит до обработки, м <sup>2</sup> /ч	удельный дебит после обработки, м <sup>2</sup> /ч		удельный дебит после обработки, м <sup>2</sup> /ч	увеличение удельного дебита, раз	удельный дебит после обработки, м <sup>2</sup> /ч	увеличение удельного дебита, раз		
18	21,7	+6	11,7	1,95	13,5	1,15	15	1,11	2,5	69
286	13,3	2,2	2,8	1,27	5,76	2,06	8,57	1,5	3,9	30
196	4,8	1,7	1,9	1,11	2,7	1,42	3,64	1,35	2,4	50
76	3	0,3	0,4	1,33	1,2	3,00	-	-	4	40
06	20	4	6	1,5	11,3	1,90	-	-	2,8	57
296	25,5	3,3	12	3,6	16	1,3	18,9	1,2	5,7	74
28	10,2	0,84	1,9	2,3	3,6	1,9	4,5	1,25	5,4	53
56	24	6,4	9,8	1,5	16	1,6	18	1,13	2,8	79

*Анализ применения технологических схем.* Анализ эффективности обработок скважин показывает, что наибольшая степень восстановления удельного дебита (53–79)% достигнута при использовании циклического задавливания реагента, и несколько меньшая (30–69)% – при растворении отложений методом реагентной ваины (см. таблицу 3.7). Наилучшие результаты были получены на скважине №56. Здесь помимо обычных замеров удельного дебита производились геофизические исследования фильтра и прифильтровой зоны партией скважинных методов (РУП «Белгеология») до обработки 14.11.05 и после полного цикла работ 24.11.05, а также телеметрия камерой, принадлежащей УП «Минскводоканал».

*Результаты геофизических исследований.* Геофизические исследования включали в себя радиометрию посредством гаммо и гаммо-гаммокаротажа (прибор КУРА 2), кавернометрию (прибор КМ-2); расходометрию (прибор РС-70), акустический каротаж (прибор «Парус-4»). Сигналы со скважинных приборов поступали в пульт управления каротажной станции, записывались самописцем на специальной бумаге и расшифровывались.

Результаты геофизических исследований представлены в виде соответствующих диаграмм. Сравнительный анализ диаграмм до и после восстановительных работ показал следующее.

*Расходометрия (рисунок 3.5).* До обработки, по данным расходометрии, фильтр работал в интервале 43–50 м. Причем большая часть притока (77%) имела место в верхней части фильтра на участке длиной 2,7 м (в интервале 43.0–45.7 м). Максимальный приток воды из фильтра, при загрузке эрлифта до его верха, составил 18 м<sup>3</sup>/час. Удельный дебит скважины был 5,6 м<sup>2</sup>/ч.

После обработки произошло увеличение работающей части фильтра на 2,8 м, что составило 28% от общей обеспечивающей приток поверхности в интервале 42.2–52 м. Дебит скважины при той же глубине загрузки эрлифта вырос с 18 до 36 м<sup>3</sup>/час, а удельный дебит возрос с 5,6 м<sup>2</sup>/ч до 18 м<sup>2</sup>/ч. Произошло перераспределение притока воды через фильтр: если до обработки нижняя половина фильтра обеспечивала 23.1% общего притока, то после обработки ее приток составил 36.1% (см. рисунок 3.5).

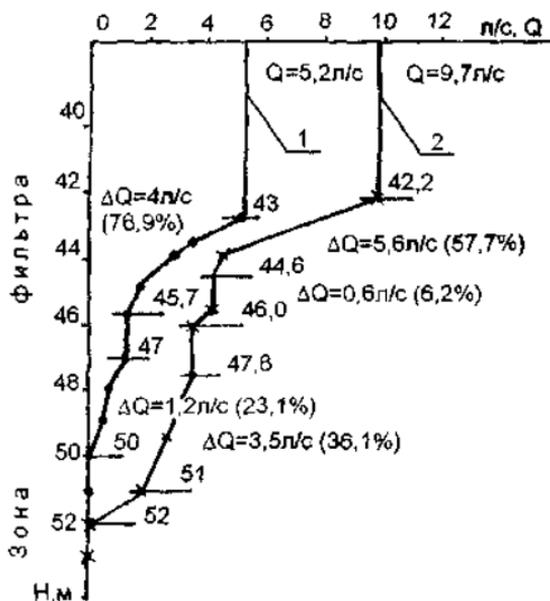


Рис. 3.5. График изменения расхода по длине фильтра:  
1 – до обработки скважины; 2 – после обработки скважины

**Акустический картаж (рисунок 3.6а).** За счет удаления сцементированного кольматанта из прифильтровой зоны, уменьшилось «заземление» фильтра в горных породах и амплитуда акустических колебаний увеличилась практически в 3 раза.

**Кавернометрия (рисунок 3.6,б).** Из сравнительных данных кавернометрии видно, что после обработки произошло увеличение и выравнивание внутреннего диаметра фильтровой колонны, что указывает на удаление кольматанта с внутренней поверхности дырчатого каркаса. Это отразилось на увеличении удельного дебита скважины и улучшении распределения притока по фильтру (см. расходомерию).

**Радиометрия. (рисунок 3.6,с).** Сравнение кривых показывает, что после обработки произошло уменьшение радиоактивности в интервале фильтра, что указывает на удаление кольматанта, имеющего повышенную радиоактивность (соединения калия, урана, тория).

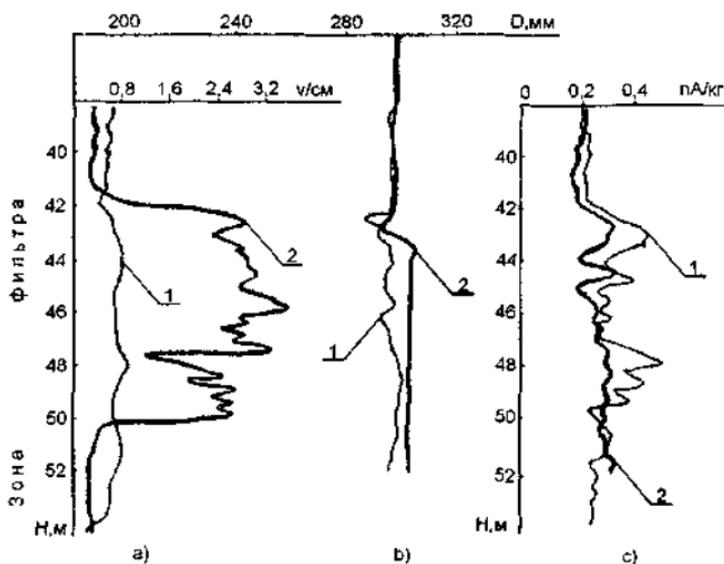


Рис. 3.6. Диаграммы изменения параметров фильтра скважины при применении технологии комплексного газонимпульсно-реагентно-виброволнового воздействия на фильтр и прифилтровую зону (1 – до обработки скважины; 2 – после обработки скважины): а) изменение акустических параметров фильтра (акустический каротаж); б) кавернометрия зоны фильтра; в) нейтронный каротаж зоны фильтра

**Гамма-гамма каротаж.** Методом гамма-гамма каротажа никаких изменений не отмечено.

В целом, по данным геофизических исследований, уверенно отмечается освобождение фильтра и прифилтровой зоны от кольматанта.

**Расчет затрат реагента.** К основным технологическим параметрам реагентной обработки относится удельное количество реагента, необходимое для растворения единицы массы кольматанта и расход реагента на 1 м.п. фильтра. Эти параметры разработанной комбинированной технологии определялись по результатам обработок скважин на основе анализов проб жидкости, откачиваемой из скважин после окончания реакции.

Расчетная масса  $M_{HCl}$  хлористого водорода  $HCl$  оценивалась по известной формуле (3.1). Теоретическое значение коэффициента

$K_{с_{теор}}$  рассчитывалось согласно уравнениям реакции по известному химическому составу кольтманта и вычислялось по формуле (3.39). Также теоретически по формуле (3.40) рассчитывался коэффициент образования солей  $K_{сол теор}$ .

Представляло интерес найти опытные значения коэффициентов:  $K_{с.оп}$ ,  $K_{сол оп}$  и найти массу  $M_k$  растворенного кольтманта в скважине.

Определив по (3.1) величину  $M_{HCl}$ , необходимый объем реагента  $V_{HCl}$  заданной концентрации для обработки скважины вычислялся из формулы

$$V_{HCl} = \frac{M_{HCl}}{\rho C_{HCl}}, \quad (3.42)$$

где  $C_{HCl}$  – массовая концентрация реагента;  $\rho$  – плотность реагента.

После обработки фильтра реагентом в течение (20–24) часов проводилась опытная откачка скважины эрлифтом с взятием проб жидкости в определенные моменты времени. По замеренным данным определяли следующие исходные характеристики.

Объем  $\Delta V_i$  жидкости, пошедшей на выброс за промежуток времени  $\Delta t_i$  между взятием проб

$$\Delta V_i = Q_3 \cdot \Delta t_i, \quad (3.43)$$

где  $Q_3$  – производительность эрлифта.

Концентрацию  $C_{(сол)i}$  солей в пробах определяли по методике анализа природной воды выпариванием [72]. Массу  $\overline{M}_{(сол)i}$  откачанных солей за промежуток времени  $\Delta t_i$  определяли из выражения

$$\overline{M}_{(сол)i} = \Delta V_i \cdot C_{(сол)i}. \quad (3.44)$$

Концентрацию  $C_{(HCl)}$  избытка соляной кислоты в пробах рассчитывали по формуле

$$C_{(\text{HCl})i} = 10^{-\text{pH}}. \quad (3.45)$$

Массу откачанной соляной кислоты  $\Delta \overline{M}_{(\text{HCl})i}$  за промежутки времени  $\Delta t_i$  определяем из выражения

$$\Delta \overline{M}_{(\text{HCl})i} = C_{(\text{HCl})i} \cdot \Delta V_i. \quad (3.46)$$

Суммарные массы солей  $\overline{M}_{\text{сол}}$ , весь откачанный объем жидкости  $V$ , массу откачанной соляной кислоты  $\Delta \overline{M}_{\text{HCl}}$  определяли из выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{M}_{\text{сол}} = \sum_{i=1}^n \Delta \overline{M}_{(\text{сол})i} \\ \Delta \overline{M}_{\text{HCl}} = \sum_{i=1}^n \Delta \overline{M}_{(\text{HCl})i} \\ V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i \end{array} \right. \quad (3.47)$$

где  $n$  – число замеров (проб).

На ряде скважин дополнительно определялось количество остаточного кольматанта, удаляемого в процессе виброволновой обработки, осуществляемой после откачки продуктов реакции. При этом в заданные промежутки времени отбирали определенное количество жидкости, которую фильтровали через предварительно взвешенный бумажный фильтр [73]. Фильтрат отбрасывали: твердую фазу высушивали до постоянного веса при  $85^{\circ}\text{C}$ , взвешивали и относили к единице объема ( $1 \text{ дм}^3$ ). Умножением этой величины на объем откачиваемой жидкости получали массу остаточного кольматанта  $M_x$  при работе виброволнового генератора.

В таблице 3.8 представлены результаты расчетов по определению количества откаченных солей  $\overline{M}_{\text{сол}}$  и остаточной соляной

кислоты  $\Delta \bar{M}_{\text{HCl}}$  из скважины №56, при этом для кольтманта этой скважины теоретические значения коэффициентов составили:  $K_{\text{с.теор.}} = 1,058$ ;  $K_{\text{сол.теор.}} = 1,59$ .

Таблица 3.8. Опытные данные откачки из скважины №5Б водозабора «Боровляны» после реагентной обработки

№ пробы	$\Delta t$ , мин	$\Delta V_{\text{н}}$ , м <sup>3</sup>	$C_{(\text{соли})}$ , г/л	$\bar{M}_{(\text{соли})}$ , кг	pH	$C_{\text{HCl}}$ , г/л	$\Delta \bar{M}_{(\text{HCl})}$ , кг
1	2	1,2	28,356	34,027	1,2	2,309	2,770
2	2	1,2	34,460	43,750	1,4	1,457	1,748
3	2	1,2	38,796	46,555	2,0	0,365	0,438
4	3	1,8	30,026	54,047	5,0	0,0003	0,0007
5	5	3,0	19,474	58,422	5,6	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,00027
6	7	4,2	16,520	69,384	5,8	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,00023
7	10	6,0	13,314	79,884	6,0	$3,6 \cdot 10^{-5}$	0,00022
8	12	7,2	8,760	63,072	6,2	—	—
9	15	9,0	7,077	63,693	6,4	—	—
10	30	18,0	5,934	106,812	6,4	—	—
11	30	18,0	4,783	86,094	7,0	—	—
12	30	18,0	2,937	52,866	7,0	—	—
13	30	18,0	1,857	33,426	7,4	—	—
14	30	18,0	1,015	18,270	7,6	—	—
15	30	18,0	0,278	5,004	7,6	—	—
Итого		$V \approx 142,2$		$\bar{M}_{\text{сол}} \approx 815$			$\Delta \bar{M}_{\text{HCl}} \approx 5$

Согласно полученным данным:  $\Delta \bar{M}_{\text{HCl}} = 5$  кг,  $\bar{M}_{\text{сол}} = 815$  кг. С учетом загрузки в скважину 1600 кг 35% соляной кислоты и 100 кг «Дескама» (см. таблицу 3.6), что составило  $M_{\text{HCl}} = 580$  кг, на реакцию израсходовано

$$M_{\text{HCl}} = M_{\text{HCl}} - \Delta \bar{M}_{\text{HCl}} = 580 - 5 = 575 \text{ кг.}$$

Теоретическое значение коэффициента  $K_{\text{сол.теор}} = 1,59$ , тогда теоретическая масса солей, образовавшаяся при разложении кольматанта массой  $M_{\text{к(НСI)}} = 575:1,058=543$  кг (полученной по фактическим затратам кислоты) будет равна

$$M_{\text{сол.теор}} = K_{\text{сол.теор}} \cdot M_{\text{к}} = 543 \cdot 1,59 = 863 \text{ кг.}$$

После обработки скважины объем откачанной жидкости составил  $V = 142,2 \text{ м}^3$ , а опытная масса солей  $M_{\text{сол}} = 815$  кг (см. таблицу 3.8).

Учитывая, что концентрация природных солей в объеме  $V$  составила  $C_0 = 0,270 \text{ кг/м}^3$ , то общая масса природных солей равна

$$M_{(\text{сол})0} = C_0 \cdot V = 142,2 \cdot 0,279 = 38 \text{ кг.}$$

Тогда масса солей, полученных в результате обработки равна

$$M_{\text{сол}} = \bar{M}_{\text{сол}} - M_{(\text{сол})0} = 815 - 38 = 777 \text{ кг.}$$

Тогда расчетная масса кольматанта  $M_{\text{к(сол)}}$  по количеству откачанных солей равна

$$M_{\text{к(сол)}} = \frac{M_{\text{сол}}}{K_{\text{сол.теор}}} = \frac{777}{1,59} = 488 \text{ кг.}$$

Значения масс кольматанта, полученных по фактическим затратам кислоты ( $M_{\text{к(НСI)}} = 543$  кг) и по количеству откачанных солей из скважины ( $M_{\text{к(сол)}} = 488$  кг), отличаются между собой на 10%, что обусловлено переменным расходом эрлифта ( $Q \neq \text{const}$ ) первые 5 – 10 минут откачки.

Среднее значение расчетной массы кольматанта, удаленной из скважины равно

$$M_{\text{к}} = \frac{M_{\text{к(НСI)}} + M_{\text{к(сол)}}}{2} = \frac{543 + 488}{2} = 515 \text{ кг.}$$

Фактические затраты 100%-го хлористого водорода составили  $M_{HCl} = 575$  кг. Отсюда, опытные значения коэффициентов стехиометрии реакции и  $K_{(сол)оп}$  равны

$$K_{с.оп.} = \frac{\overline{M}_{HCl}}{M_{к(HCl)}} = \frac{575}{515} = 1,12,$$

$$K_{(сол)оп} = \frac{\overline{M}_{(сол)оп}}{M_{к}} = \frac{815}{543} = 1,5.$$

По аналогичной методике был рассчитан ряд скважин, данные по которым приведены в сводной таблице 3.9.

Из анализа данных, представленных в таблице 3.9, следует, что с одного погонного метра фильтра с помощью комбинированных технологий удалось извлечь в среднем от 40 до 63 кг кольматанта в растворенном виде и затем в виде шлама в процессе виброволновой обработки. Во всех случаях применения технологии, соляная кислота израсходовалась практически полностью, ее остаток составлял от 5 до 20 кг в пересчете на 100%-й хлористый водород. Фактические затраты 100%-й  $HCl$  на 1 м.п. фильтра составили от 28 до 57 кг.

Уточненное значение массы кольматанта в фильтре получено, как среднее арифметическое его количества, рассчитанного по фактическим затратам хлористого водорода и массы растворенных этой кислотой солей.

Таблица 3.9. Результаты расчетов количества реагента и кольтманта по откачкам

Номер скважины	Исходная масса 100%-й HCl $M_{(0)HCl}$ , кг	Коэффициент стехиометрии реакции (теор.) $K_{ст}$	Коэффициент образования солей (теор) $K_{солят}$	Объем откачанной жидкости $V$ , м <sup>3</sup>	Остаток 100%-й HCl после реакции $\Delta M_{HCl}$ , кг	Масса откачанных солей $M_{сол}$ , кг	Масса прореагировавшей 100%-й HCl $M_{HCl}$ , кг	Масса кольтманта, рассчитанная по затратам HCl $M_{K(HCl)}$ , кг	Масса кольтманта, рассчитанная по образованию солей $M_{K(сол)}$ , кг	Расчетная масса кольтманта $M_{к}$ , кг	Коэффициент стехиометрии реакции (факт.) $K_{сф}$	Масса шлама $M$ , кг
№18	389,3	1,109	1,646	280	9,5	—	379,8	342	—	342	1,109	217
№19	560,7	0,907	1,35	56	19,7	—	541	596	—	596	0,907	61
№286	548	0,709	1,08	97,92	15	—	533	751	—	751	0,709	16
№296	679,8	0,984	1,51	98,5	7,2	1003	672,3	683	664	674	1	42
№28	650	1,01	1,51	12,96	13	929,7	637	630	615	633	1	73
№56	580	1,058	1,59	142,2	5	777	575	543	488	515	1,12	58

### **Выводы по разделу 3.3**

Разработано технологическое оборудование для подачи реагента в фильтр, циклического его задавливания в пласт сжатым воздухом и эрлифтной откачки продуктов реакции, отличающееся простотой и безопасностью ведения работ.

Сравнительные испытания 2-х технологических схем проведения комбинированных обработок показали, что наибольшая степень восстановления удельного дебита достигается при использовании циклического задавливания реагента (53–79)% и несколько меньшая – (30–69)% при использовании реагентной ванны. К тому же после реагентной ванны больше остается непрореагировавшего хлористого водорода (9,5–19,7) кг, нежели при использовании циклического задавливания – (5–13) кг при одинаковом времени обработки.

Геофизические и телеметрические исследования, проведенные на скважине №56, до и после восстановительных работ, показали высокую эффективность разработанной в БНТУ комбинированной технологии.

### **3.4. Технология виброволнового воздействия на призабойную зону скважин**

Разработка и применение виброволновых методов воздействия на фильтр и прифильтровую зону водозаборных скважин началась в СССР в 70–80-х годах, когда стал вопрос реанимации большого количества ранее пробуренных и разглинизации вновь сооружаемых скважин.

Были созданы и прошли промысловые испытания метод ультразвукового воздействия на фильтр [74], метод электровибрационной регенерации скважин, предложенный Ивано-Франковским институтом нефти и газа [75], метод низкочастотной вибрации, разработанный совместно ВНИИГС и трестом «Промбурвод» [76], метод виброреагентной регенерации фильтров скважин, предложенный учеными ВНИИВОДГЕО [77].

Однако эти методы не нашли широкого применения в настоящее время, т.к. все они в той или иной степени не позволяют достигнуть высокого уровня восстановления производительности скважин из-за малой глубины воздействия на пласт (ультразвук, электровибра-

ция), или из-за громоздкости оборудования и неудобства использования на скважинах (виброреагентная регенерация).

Еще более пристальное внимание методам виброволнового воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) уделялось в нефтедобывающей промышленности. Начало использованию этих методов было положено еще в 60-х годах прошлого века, когда на нефтепромыслах стали применять погружные генераторы, генерирующие упругие колебания на забое скважины при прокачке через них различных технологических жидкостей (вода, растворы ПАВ, кислоты и др.). Наибольшее распространение получили вибратор ГВЗ золотникового типа и клапанно-ударный вибратор КУВ-100 конструкции МИНГ и ГП [78], вставной пульсатор ПВ-54 клапанного типа конструкции ТатНИПИнефть [79], и целый ряд других конструкций. С применением только вибратора ГВЗ-108 было проведено более 6000 обработок скважин. Успешность работ составила 70%, дополнительно добыто 5 млн т нефти и закачано более 15 млн м<sup>3</sup> воды.

По конструкции все эти генераторы колебаний представляли собой сложные устройства с большим количеством подвижных или вращающихся частей. При тяжелых условиях работы в нефтяных скважинах, где присутствуют высокое давление и температура, агрессивная рабочая среда с абразивными частицами, такие генераторы быстро выходили из строя уже после 1-3 обработок.

В середине 80-х в НПО «Союзнефтеотдача» (г. Уфа) под руководством канд. техн. наук В.П. Дыбленко были разработаны высокоэффективные технологии виброволнового и виброреагентного воздействия на ПЗП добывающих и нагнетательных скважин. Одновременно, на основе проведенных научных, лабораторных и промысловых исследований, была поставлена задача по созданию генераторов нового типа, не имеющих подвижных частей и генерирующих колебания в низкочастотном диапазоне 20–300 Гц с амплитудой колебания давления 3–5 МПа.

При создании таких генераторов было использовано явление автоколебательной работы, обнаруженное при испытаниях двухкаскадной центробежной форсунки с общей камерой смещения, предназначенной для жидкостного ракетного двигателя [80].

На основе проведенных исследований автоколебательных режимов двухступенчатой центробежной форсунки был разработан

новый способ генерирования низкочастотных колебаний и гидродинамический генератор колебаний [81], схема которого показана на рисунке 3.7.

При генерации жидкость, поступающая по напорной магистрали, разделяется на основной поток, поступающий в тангенциальные каналы форсунки и образующий жидкостный вихрь, и дополнительный поток, поступающий через узкие каналы-жиклеры в дополнительный канал устройства.

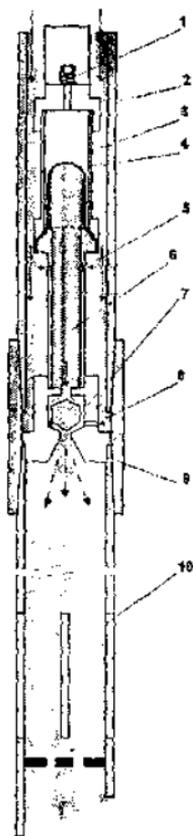


Рис 3.7. Гидродинамический генератор колебаний:

- 1 – направляющий клапан; 2 – труба НКТ; 3 – напорная магистраль;  
 4 – мембрана; 5 – жиклеры дополнительного потока; 6 – канал дополнительного потока; 7 – кольцевой зазор; 8 – тангенциальные каналы форсунки;  
 9 – форсунка; 10 – резонатор

В первой фазе процесса происходит запираание дополнительного потока жидкости основным закручивающим потоком, что приводит к росту давления в нем (при этом вихревое движение жидкости развивается от форсунки вглубь дополнительного канала) и усилению энергообмена между основным и дополнительным потоками вследствие разницы окружных составляющих скоростей. Во второй фазе при возрастании давления в дополнительном потоке до значения, соизмеримого со значением центробежного давления, на периферии жидкостного вихря, в кольцевом зазоре форсунки происходит разрушение вихря, сопровождающегося выбросом жидкости из дополнительного канала и резким увеличением расхода. После выброса жидкости давление в дополнительном потоке опять падает, образуется жидкостный вихрь основного потока, который запирает дополнительный поток, и процесс автоколебаний повторяется. Таким образом, благодаря усилительным свойствам вихря, небольшие колебания давления в дополнительном канале (второй ступени), составляющие 1–5% от перепада давления на закрученном слое жидкости, вызывают сильные колебания скорости течения через генератор, достигающие 50% от средней скорости. При разрывах сплошности потока коэффициент усиления существенно возрастает. Изменяя упругость жидкости дополнительного канала введением в него газа, отделенного гибкой мембраной, можно также изменять время возрастания давления в первой фазе и регулировать частоту генерируемых колебаний. Резонатор служит для преобразования колебаний расхода в колебания давления.

Дальнейшие исследования, проведенные с двухсупловой двухступенчатой центробежной форсункой, позволили создать более совершенные и мощные генераторы типа ГД2В-3. Были также созданы генераторы вставного типа ГД2В-3В, которые можно применять совместно с колтюбинговыми технологиями реанимации скважин.

По заявке кафедры «Гидравлика» БНТУ был разработан и изготовлен на опытном производстве УП «Минскводоканал» лабораторный образец генератора ГД2В-0,2-20Л с расходом 0,2 л/с и давлением на входе 2 МПа. С помощью данного генератора проводятся лабораторные исследования по изучению виброволнового воздействия на прифилтровую зону водозаборных скважин.

На рисунке 3.8 представлены все три упомянутые выше типы генераторов.

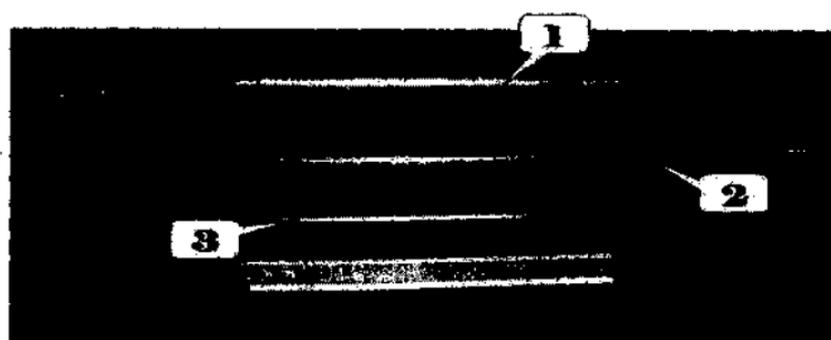


Рис. 3.8. Внешний вид генераторов колебаний: скважинные: 1 – ГД2В-3; 2 – ГД2В – 3В; лабораторный: 3- ГД2В-0,2-20Л

В настоящее время на кафедре «Гидравлика» БНТУ совместно с российской фирмой «Oil-Engineering» (г. Уфа) разработаны новые технологии комплексного гидроимпульсного и виброреагентного воздействия на фильтр и призабойную зону скважины и технология гидроимпульснoвиброволнового воздействия [82].

На первом этапе фильтр может обрабатываться традиционными импульсными способами (электрогидравлическими разрядами, импульсами сжатого воздуха, гидродинамическими импульсами с использованием горения ВКГС). Цель этих обработок – создать трещины в цементированных отложениях на фильтре и в прифильтовой зоне. Наибольшего результата, как показывает практика, можно достичь, используя для этих целей взрыв ВКГС. При таком взрыве фильтр подвергается не только динамическому воздействию ударных волн и гидропотока, но также и вакууметрическому воздействию на кольматант, что приводит к выносу последнего на забой скважины.

После того, как фильтр подвергся импульсному воздействию, в скважину опускается эрлифт и производится прокачка скважины. В результате эрлифтной прокачки из прифильтовой зоны скважины выносятся мелкие частицы разрушенного кольматанта.

Но очень часто производительности эрлифта не хватает (низкие статические уровни, большая длина фильтра), чтобы в призабойной зоне создать необходимые скорости фильтрации для выноса частиц кольматанта из удаленных прифильтровых зон. В результате большая часть разрушенного кольматанта остается в прифильтровой зоне, что приводит к быстрому снижению ее проницаемости и необходимости повторного проведения ремонтно-восстановительных работ. В среднем эффект от импульсного воздействия сохраняется в течение 6–12 месяцев.

Повысить эффективность очистки прифильтровой зоны можно путем виброволнового воздействия на призабойную зону скважины (ПЗС) при одновременном создании длительной депрессии на пласт с возможностью управления ее величиной.

Воздействие на фильтр и ПЗС достигается за счет возбуждения с помощью гидродинамического генератора, установленного в фильтре, высокоамплитудных колебаний давления, которые передаются через фильтр в пласт и трансформируются в ПЗС в упругие колебания большой интенсивности, что обеспечивает разрушение кольматанта и вынос его в скважину. Технологическая схема виброволнового воздействия представлена на рисунке 3.9.

Для реализации метода на водозаборных скважинах применяется гидродинамическая машина на базе автомобиля ЗИЛ-433362 для промывки водоводов, эрлифт и скважинный генератор колебаний, который опускается в скважину на шланге гидродинамической машины. Поршневой насос высокого давления, установленный на автомобиле, обеспечивает рабочее давление до 15 МПа и расход до 10–12 м<sup>3</sup>/час, что достаточно для работы генератора в расчетном режиме и обеспечения необходимых параметров воздействия на ПЗС.

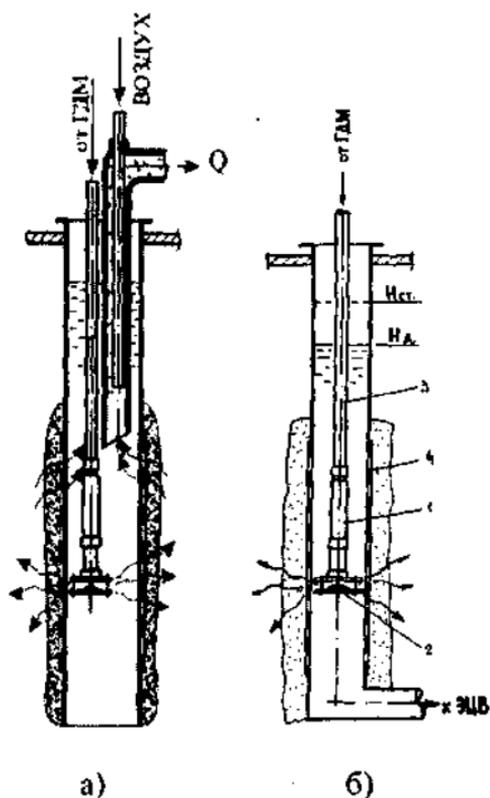


Рис. 3.9. Схема проведения опытно-восстановительных работ виброволновым способом:

*а* – при совместной работе генератора с эрлифтом; *б* – при откачке воды насосом ЭЦВ (при двухколонной конструкции скважины); 1 – генератор; 2 – отражатель; 3 – шланг высокого давления от ГДМ; 4 – фильтр скважины

На рисунке 3.10 представлена гидродинамическая машина с подсоединенным к шлангу высокого давления генератором ГД2В-3, который помещен в трубу высокого давления.

В последнее время вместо генератора типа ГД2В-3, который необходимо было для обеспечения рабочего процесса помещать в НКТ диаметром 76 мм, что создавало определенные трудности при одновременной работе с эрлифтом, на скважинах применяется генератор типа ГД2В-3В.



Рис. 3.10. Гидродинамическая машина с подсоединенным к шлангу высокого давления генератором ГД2В-3

Этот тип генератора имеет небольшие размеры ( $d = 45$  мм, вес – 8 кг), что позволяет применять его без трубы высокого давления, присоединяя непосредственно к шлангу гидродинамической машины. Малые размеры генератора позволяют его использовать для обработок скважин любого диаметра при одновременном использовании эрлифта. В то же время этот генератор обеспечивает все необходимые параметры виброволнового воздействия на ПЗС. Перед спуском в скважину генератор проверяется на поверхности на нескольких рабочих режимах (рисунок 3.11).

Впервые технология виброволнового воздействия была опробована на скважине № 2 водозабора «Дражня» УП «Минскводоканал» в ноябре 2001 года.



Рис 3.11. Проверка работы генератора ГД2В-3В перед спуском в скважину №25 водозабора «Дражня»

Генератор виброволнового воздействия был опущен в зону фильтра на глубину 67 м на НКТ диаметром 42 мм. Эрлифт диаметром 76 мм располагался на отметке 50 м. Статический уровень составлял 25 м. С помощью гидродинамической машины в скважину было закачано 10 м<sup>3</sup> чистой воды при давлении 8-9 МПа. Одновременно с работой ГДМ производилась эрлифтная откачка воды из скважины. Но в связи с тем, что динамический уровень опускался до отметки 26-27 м, а диаметр эрлифтных труб был только 76 мм, производительность эрлифта достигала 3-5 м<sup>3</sup>/час, тем самым не обеспечивался качественный вынос кольматанта из призабойной зоны. После обработки удельный дебит увеличился в 1,23 раза и составил 13,5 м<sup>3</sup>/час.

В результате дальнейших промысловых испытаний было усовершенствовано технологическое оборудование и условия его применения. Стало очевидным, что виброволновое воздействие целесообразно проводить на скважинах со сроком эксплуатации 5-7 лет, где кольматирующие отложения не прошли стадию минерализации. На скважинах, эксплуатирующихся 10 и более лет, необходимо применять комплексную технологию: на первом этапе фильтр обрабатывается импульсами от взрыва ВКГС, а после создания трещиноватости в кольматанте, фильтр и ПЗС подвергаются виброволновому

вому воздействием с одновременной прокачкой скважины эрлифтом. Таким образом, достигается качественная очистка ПЗС от раздробленного гидроимпульсами кольматанта и увеличение межремонтного срока работы скважины.

Следующим этапом усовершенствования технологии импульсного и виброволнового воздействия стало применение реагентов для растворения кольматирующих отложений в ПЗС. Последовательная обработка фильтра скважины взрывами ВКГС или электрогидравлическими разрядами, обработка ПЗС специально подобранными реагентами, и на последнем этапе виброволновое воздействие с эрлифтной прокачкой, позволяют достичь степени восстановления скважины, близкой к новой.

Впервые технология комплексного воздействия была применена при проведении восстановительных работ на скважине № 18 водозабора «Зеленовка» в сентябре 2003 г. До обработки удельный дебит составлял 3,67 м<sup>2</sup>/час, при этом 4,4 м нижней части фильтра было засыпано гравием. После последовательной обработки ПЗС взрывами ВКГС, реагентного воздействия соляной кислотой со специальными добавками, на последнем этапе скважина подверглась виброволновому воздействию с эрлифтной прокачкой. В результате совместной работы эрлифта и генератора виброволнового воздействия, удалось дополнительно извлечь из ПЗС 217 кг твердых, не растворенных реагентами частиц кольматанта. Следует отметить, что вынос твердых частиц различной крупности наблюдается только при совместной работе эрлифта и генератора. При выключении генератора и работе только одного эрлифта, прекращается вынос частиц и наступает осветление воды в течение 5 -10 минут. В результате проведенных мероприятий удельный дебит скважины увеличился до 15 м<sup>2</sup>/час.

Повторные замеры, проведенные в мае 2004 г., показали, что при производительности скважины 70 м<sup>3</sup>/час удельный дебит составил 14,6 м<sup>2</sup>/час, т.е. оставался практически без изменения в течение 9 месяцев.

Замеры, проведенные на других восстановленных скважинах, показывают, что эти результаты сохраняются с небольшим уменьшением в течение нескольких лет. С использованием технологий виброимпульсного и комплексного импульсовиброреагентного воздействия на водозаборах г.Минска ежегодно проводится обра-

ботка 12-15 скважин. Результаты применения технологий импульсно-виброволнового и комплексного импульсно-виброреагентного воздействия на нескольких скважинах водозаборов г. Минска приведены в таблице 3.7

На рисунке 3.12 представлена диаграмма изменения степени увеличения удельного дебита скважин в зависимости от применяемых технологий. Диаграмма построена по результатам обработки более 3-х десятков скважин на различных водозаборах г. Минска. Из диаграммы видно, что максимальная степень восстановления удельного дебита достигается при комплексном импульсно-виброреагентном воздействии.

Степень увеличения удельного дебита скважин при использовании различных технологий.

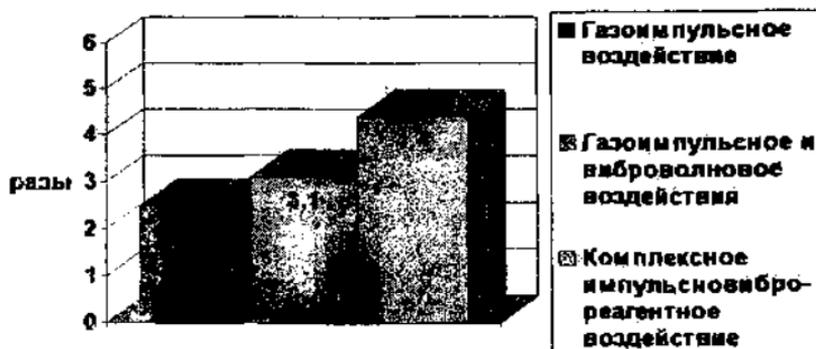


Рис 3.12. Диаграмма изменения степени увеличения удельного дебита скважин в зависимости от вида технологий

Проведенные опытно-восстановительные работы на скважинах УП «Минскводоканал» показали, что применение технологий импульсно-волнового и импульсно-виброреагентного воздействия с оптимально подобранными параметрами воздействия на фильтр и прифильтровую зону, позволяет добиться восстановления удельного дебита до величины 85-95% от первоначального удельного дебита скважины. С учетом того, что затраты на восстановительные работы составляют порядка 4-8% от стоимости бурения новой сква-

жины, эти работы можно считать вполне приемлемой альтернативной бурению новой скважины.

### *3.5. Использование импульсных методов при восстановлении дебита нефтяных скважин*

Опыт, накопленный при создании генераторов гидроимпульсного воздействия на фильтр и прифильтровую зону водозаборных скважин, вследствие взрыва ВКГС, был в дальнейшем применен при конструировании и изготовлении более мощных генераторов для использования в нефтяных скважинах [83].

С 1985 г. кафедра «Гидравлика» БНТУ была включена в Координационную Программу работ по вибрационному и волновому воздействию на ПЗП Миннефтепрома СССР. В результате выполнения работ по этой Программе совместно с НПО «Союзнефтеотдача» (г. Уфа) была разработана технология гидроимпульсного воздействия на призабойную зону нефтяных скважин и устройство для ее осуществления [84].

Разработанный способ гидроимпульсного воздействия на ПЗС предназначен для очистки перфорационных отверстий от солей и асфальто-смолистых отложений и для развития имеющихся и создания новых трещин в призабойной зоне за счет взрыва ВКГС в зоне перфорации.

Способ гидроимпульсного воздействия может быть применен на скважинах, соответствующих следующим признакам, определяющим целесообразность обработки ПЗС по данной технологии:

- снижение текущего дебита скважины в процессе работы при неизменном пластовом давлении и обводненности продукции;
- пониженное значение коэффициента продуктивности (приемистости) скважины по сравнению с близлежащими скважинами;
- ухудшение фильтрационных свойств ПЗС в процессе эксплуатации скважин;
- склонность скважины к гипсообразованию в ПЗС.

К основным достоинствам этого способа относятся:

- возможность создания импульсов большой энергоемкости в таком количестве, которое необходимо для полной очистки скважины в течение рабочей смены;
- небольшой расход электроэнергии;
- простота устройства и экологическая чистота рабочего процесса;
- безопасность и безвредность для обслуживающего персонала.

Гидроимпульсное воздействие может применяться на эксплуатационных и нагнетательных скважинах.

При взрыве ВКГС излучается ударная волна с амплитудой  $38p_0$  ( $p_0$  – исходное давление газовой смеси, в условиях скважины  $p_0 = p_{г.с.}$ , где  $p_{г.с.}$  – гидростатическое давление). Ударная волна наиболее эффективно воздействует на твердые отложения солей в ПЗС и саму породу пласта, вызывая в них образование трещин. За ударной волной следуют знакопеременные волны давления и гидропоток, вызванные пульсациями парогазовой полости. Амплитуда волн давления достигает  $10 p_0$ , а скорость гидропотока 8-10 м/с.

Совместное воздействие волн давления и гидропотока приводит к расклиниванию в породе старых трещин и образованию новых. Кроме гидроимпульсного воздействия, ПЗС при взрыве подвергается и значительному тепловому прогреву. При сгорании  $1 \text{ дм}^3$  смеси при н.у. выделяется 7,1 кДж энергии, а при детонации того же количества с учетом диссоциации продуктов взрыва – 4,64 кДж, что приводит к повышению температуры жидкости в зоне взрыва на  $35-40^\circ \text{C}$  за один импульс.

Таким образом, основными разрушающими факторами при взрыве газовой смеси будут являться: ударная волна, гидропоток знакопеременного давления, волны сжатия, тепловое воздействие. При использовании режима горения газовой смеси ударная волна отсутствует.

Для подтверждения эффективности воздействия на ПЗС данным способом проведем расчет по определению тепловых и разрушающих параметров воздействия. Определим радиус распространения трещины в породе коллектора при взрыве полной камеры газовой смеси геометрическим объемом  $3 \text{ дм}^3$ .

Исходные данные:

Гидростатическое давление в зоне перфорации  $p_0 = 10$  МПа; пластовое давление  $p_{пл.} = 10$  МПа; диаметр скважины  $D = 0,146$  м; коллектор – известняк.

Механические характеристики коллектора [85]:

Напряжение сжатия  $\sigma_{сж} = 50$  МПа; модуль Юнга  $E = 4 \cdot 10^4$  МПа.

Для расчета используем теорию Гриффитса [86]. Гриффитсов критерий разрушения хрупкого материала:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{E \cdot \gamma}{\pi \cdot C}\right)},$$

где  $\sigma$  – среднее напряжение для образования трещины;  $E$  – модуль Юнга;  $C$  – радиус трещины;  $\gamma$  – поверхностная энергия на единицу площади.

Зададимся радиусом трещины  $C=1$  м и определим ее площадь:

$$S = \pi \cdot \left(C^2 - \frac{D^2}{4}\right) = 3,14 \cdot \left(1^2 - \frac{0,146^2}{4}\right) = 3,12 \text{ м}^2.$$

Величину поверхностной энергии, необходимой для образования трещины, найдем из зависимости

$$\gamma = \frac{\sigma^2 \cdot \pi \cdot C}{E} = \frac{50^2 \cdot 3,14 \cdot 1}{40000} = 0,196 \text{ МПа} \cdot \text{м} = 196 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}.$$

Полная энергия  $\mathcal{E}$  необходимая для образования трещины площадью  $S$  будет равна

$$\mathcal{E} = \gamma \cdot S = 196 \cdot 3,12 = 612 \text{ кДж}.$$

Учитывая, что при взрыве 1 дм<sup>3</sup> ВКГС при и. у. выделяется 7,1 кДж энергии, а в работу разрушения перейдет 28% энергии, т.е. КПД взрыва  $\eta = 0,28$ , то для получения энергии  $\mathcal{E}$  необходимо взорвать объем газа  $V$ :

$$V = \frac{Э}{\eta \cdot 7,1} = \frac{612}{0,28 \cdot 7,1} = 307 \text{ дм}^3.$$

Во взрывную камеру геометрическим объемом 3 дм<sup>3</sup> при  $p_0 = 10$  МПа входит 300 дм<sup>3</sup> газовой смеси. Таким образом, при разовом взрыве, при полностью заполненной газом взрывной камере, в ПЗС может образоваться трещина радиусом до 1 м. При последующих взрывах эта трещина может удлиняться, или будут образовываться новые трещины.

Наряду с ударными гидроимпульсами, призабойная зона подвергается и значительному тепловому воздействию. При проведении обработки скважина заполнена водой, поэтому все тепловые расчеты проведем для воды. При взрыве во взрывной камере 300 дм<sup>3</sup> газа (при  $p_0 = 10$  МПа) с учетом затрат энергии на работу разрушения остается  $Q = 1534$  кДж энергии, которая, в основном, переходит в тепло. Это приведет к повышению температуры жидкости в скважине в зоне взрыва на  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{Q}{c \cdot m},$$

где  $m = V \cdot \rho = 0,785\rho((D^2 - d^2) \cdot L + D^2 \cdot l)$ ,  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $c = 4,19$  кДж/кг·град;  $m$ ,  $V$  – масса и объем нагреваемой жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости в скважине, для воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $D = 0,127$  м – внутренний диаметр скважины;  $d = 0,108$  м – диаметр генератора;  $L = 2$  м – высота зоны воздействия взрыва;  $l = 0,25$  м – высота выхлопных окон во взрывной камере. Расчеты показывают, что после одного взрыва температура жидкости в зоне выхлопных окон во взрывной камере может возрасти на  $\Delta t = 36-40^\circ\text{C}$ .

При производстве на одном месте 3-4 взрывов температур жидкости в зоне взрыва может достигать  $100^\circ\text{C}$  и более. Благодаря этому, прогревается близлежащая к скважине зона и происходит плавление асфальтосмолистых отложений в перфорационных

отверстиях и в трещинах, т.к. температура плавления этих отложений не превышает  $70-90^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 3.13 показана принципиальная схема скважинного генератора.

Рабочее напряжение  $-50...320\text{ В}$ . Рабочий ток (постоянный) — А 15–25. Производительность электролизера —  $10-20\text{ дм}^3/\text{мин}$ . Амплитуда ударной волны — до  $100\text{ МПа}$ .

Генератор имеет следующие технические характеристики:

Энергия импульса, кДж	до 3000.
Период следования импульсов, мин	20...40.
Объем рабочей камеры, $\text{дм}^3$	3.
Диаметр генератора, мм	116.
Длина генератора, м	5,2.
Диаметр скважин, мм	127.

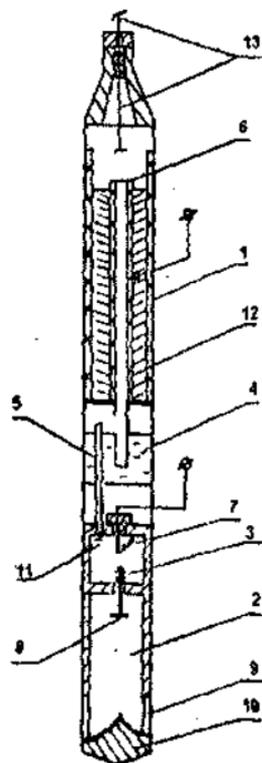


Рис. 3.13. Схема скважинного газодинамического генератора импульсов ГДГ-116. 1 – биполярный электролизер; 2 – взрывная камера; 3 – камера предварительного поджига; 4 – взрывозащитная камера; 5, 6 – газоотводные трубки; 7 – камера предварительного поджига взрывная камера; 8, 11 – обратные клапаны; 9 – выхлопные окна; 10 – отражатель; 12 – электроды; 13 – электроввод

Технологическое оборудование включало скважинный генератор ГДГ-116, пульт управления и питающий трансформатор (см. рисунок 3.14).

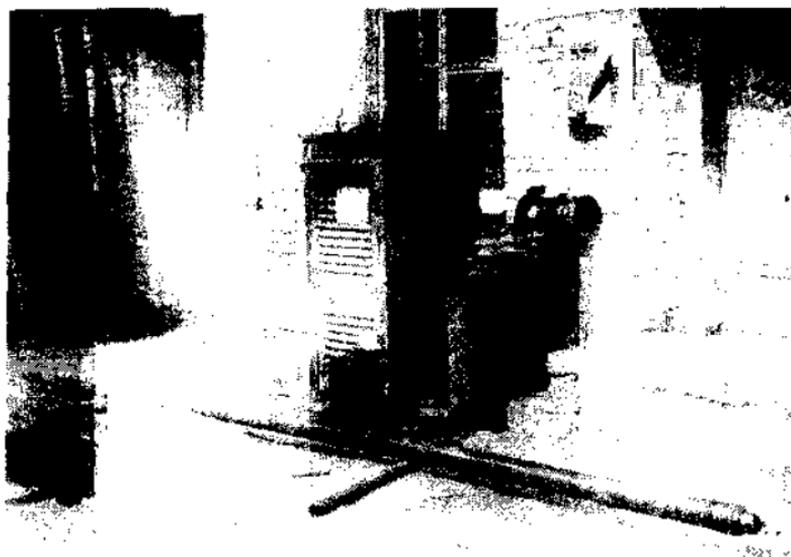


Рис. 3.14. Скважинный генератор ГДГ-116 с пультом управления и трансформатором

Промысловые испытания газодинамического генератора проводились на скважине №8080 Калегинского месторождения НГДУ «Арланнефть» 21 августа 1990 г.

Обработка проводилась с использованием геофизической станции и подъемника. Привязка интервала перфорации была осуществлена с помощью гаммакаротажа. Данная добывающая скважина пущена в эксплуатацию в сентябре 1978 года с дебитом 3,0 т/сут при обводненности 3%. Текущий дебит 2 т/сут нефти при обводненности 1,5 т/сут воды, пластовое давление – 9 МПа. Интервал перфорации: II пласт – 1550,4–1553,6 м, IY пласт – 1562,2–1563,6 м. Небольшой интервал перфорации объясняется тем, что скважина находится на краю Калегинского месторождения.

По данным химического анализа, изменению обводненности и удельного веса пластовой воды установлено, что в скважине в 1981–1984 гг. произошло отложение гипса, поэтому было решено провести гидроимпульсное воздействие на ПЗС.

Генератор был установлен в нижней части II-го пласта. Подаваемое напряжение на электролизер равнялось 290 В. Рабочий ток электролизера – от 15 до 25 А. Расчетная производительность элек-

тролизера 15...20 дм<sup>3</sup>/мин. Было произведено 5 импульсов воздействия через 0,5 м. Суммарное время работы составило 3 часа. В связи с увеличением рабочего тока больше 25 А, что выходит за рабочие режимы генератора, работа генератора была прекращена.

Перед обработкой скважины и после обработки проводились геофизические исследования по снятию АКЦ, СГДТ и контрольный замер термометром.

После обработки скважина была пущена в эксплуатацию 16 сентября 1990 г. Средний дебит при этом составил 2,3 т/сут нефти и 2,7 т/сут воды, давление на зеркало воды возросло до 12,2 МПа.

Проведенные промысловые испытания метода гидроимпульсного воздействия на ПЗС с использованием взрыва ВКГС показали, что данный метод можно с успехом использовать для восстановления производительности скважин, у которых произошло отложение твердых солей в зоне перфорации. Также этот метод можно использовать на скважинах, имеющих небольшие рабочие интервалы, воздействие на которые с помощью традиционных технологий затруднено или вообще невозможно, так как может привести к увеличению обводненности и нецелесообразности дальнейшей эксплуатации скважины.

Разработанный метод и технологическое оборудование могут быть успешно применены и для восстановления дебита глубоких водозаборных скважин и скважин на минеральную воду, так как до сих пор мало уделяется внимания вопросам восстановления дебита таких скважин.

## Глава 4. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ФИЛЬТРА СКВАЖИНЫ НА СЕКТОРА

### 4.1. Математическое моделирование установившегося циркуляционного движения жидкости при разделении фильтра скважины на ряд нагнетательных и всасывающих секторов

Существующие установки циркуляционного типа предполагают разделение фильтра скважины в процессе регенерации с помощью горизонтального пакера на отдельные секции, одна из которых является откачной, а другая – закачной. Для равномерной очистки прифильтровой зоны скважины целесообразно применять технологическую схему обработки с использованием секторного устройства, предполагающего деление фильтра скважины в процессе регенерации на сектора.

Теоретические и экспериментальные исследования такой схемы циркуляции жидкости в прифильтровой зоне скважины в литературе отсутствуют. Поэтому возникла необходимость в изучении циркуляционного движения с целью исследования параметров потока жидкости и обоснования оптимальных конструктивных параметров секторного устройства циркуляционно-реагентной регенерации фильтров водозаборных скважин.

Рассмотрим установившуюся напорную фильтрацию жидкости в прифильтровой зоне скважины, фильтр которой разделен вертикальными пакерами на ряд нагнетательных и всасывающих секторов [87, 88]. Скважина предполагается совершенной по степени и характеру вскрытия водоносного горизонта мощностью  $M$  (рисунок 4.1).

Циркуляция жидкости осуществляется за счет того, что в каждый нагнетательный сектор подается жидкость с расходом  $Q_{\text{сн}}$ , а из каждого всасывающего сектора происходит отбор жидкости с расходом  $Q_{\text{св}}$ .

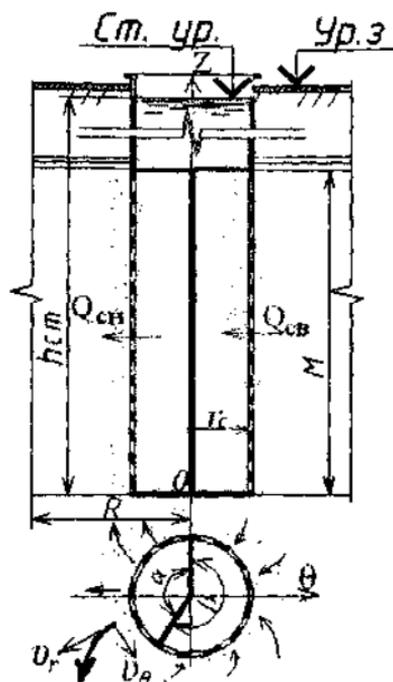


Рис. 4.1. Расчетная схема скважины

Введем цилиндрическую систему координат  $OR\theta Z$ , ось  $OZ$  которой направим вдоль оси скважины. Движение жидкости считаем плоскопараллельным, т.е. давление  $p$  не зависит от координаты  $Z$ . В этом случае давление и соответственно скорость будут зависеть от двух переменных: радиуса  $r$  и угла  $\theta$ , т.е.  $p = p(r, \theta)$ ,  $v = v(r, \theta)$ . Для описания процесса установившейся фильтрации запишем уравнение Лапласа, которое для случая плоскопараллельного движения жидкости в цилиндрической системе координат будет иметь вид [89, 90]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} = 0, \quad (4.1)$$

$$r_c < r < R, \quad 0 < \theta < \alpha + \beta,$$

где  $R$  – радиус контура питания;

$\alpha$  – угол нагнетательного сектора;

$\beta$  – угол всасывающего сектора; необходимое условие:

$$(\alpha + \beta)m = 2\pi;$$

$m$  – число нагнетательных секторов, равное числу всасывающих секторов;

$n = 2m$  – общее количество секторов.

Согласно закону Дарси составляющие вектора скорости будут равны [80]:

$$v_r = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (4.2)$$

$$v_\theta = -\frac{K}{\mu \cdot r} \frac{\partial p}{\partial \theta}, \quad (4.3)$$

где  $v_r$  – радиальная составляющая вектора скорости;  $K$  – проницаемость водовмещающей породы;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости;  $v_\theta$  – угловая составляющая вектора скорости.

Для нахождения давления в прифильтровой зоне скважины необходимо решить уравнение (4.1) при следующих граничных условиях.

Дебит нагнетательного сектора на стенке скважины считается известным

$$r \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = -\frac{Q_{\text{сн}} \mu}{M \alpha K}, \quad 0 \leq \theta < \alpha. \quad (4.4)$$

Дебит всасывающего сектора на стенке скважины

$$r \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=r_c} = \frac{Q_{св} \mu}{M \beta K}, \quad \alpha \leq \theta < \alpha + \beta. \quad (4.5)$$

Условие на контуре питания пласта примет вид

$$p|_{r=R} = p_{нп}, \quad 0 < \theta < \alpha + \beta, \quad (4.6)$$

где  $p_{нп}$  – давление на забое скважины, равное пластовому.

Условие периодичности

$$p(r, \theta) = p(r, \theta + (\alpha + \beta)). \quad (4.7)$$

Таким образом, получена смешанная задача для уравнения Лапласа (4.1), (4.4) – (4.7), решая которую методом разделения переменных [90]

и учитывая, что  $K = \frac{\kappa \mu}{\rho g}$  и  $p = \rho g h$ , находим напор  $h(r, \theta)$

$$h(r, \theta) = h_{св} - \frac{(Q_{сн} - Q_{св})}{(\alpha + \beta) M \kappa} \ln \frac{r}{R} + \frac{(\alpha + \beta)}{2\pi^2 M \kappa} \left( \frac{Q_{сн}}{\alpha} + \frac{Q_{св}}{\beta} \right) \times \\ \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \frac{\left( \frac{r}{R} \right)^{km} - \left( \frac{R}{r} \right)^{km}}{\left( \frac{r_c}{R} \right)^{km} + \left( \frac{R}{r_c} \right)^{km}} \left( \sin(mk\theta) + \sin(mk(\alpha - \theta)) \right), \quad (4.8)$$

где  $\kappa$  – коэффициент фильтрации водовмещающей породы;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Распределения скоростей, соответствующих распределению напора  $h(r, \theta)$ , согласно (4.2) и (4.3) будут равны:

$$v_r = -\frac{(Q_{CH} - Q_{CB})}{(\alpha + \beta)Mr} - \frac{1}{\pi M} \left( \frac{Q_{CH}}{\alpha} + \frac{Q_{CB}}{\beta} \right) \frac{1}{r} \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{\left( \frac{r}{R} \right)^{km} + \left( \frac{R}{r} \right)^{km}}{\left( \frac{r_c}{R} \right)^{km} + \left( \frac{R}{r_c} \right)^{km}} (\sin(mk\theta) + \sin(mk(\alpha - \theta))), \quad (4.9)$$

$$v_{\theta} = -\frac{1}{\pi Mr} \left( \frac{Q_{CH}}{\alpha} + \frac{Q_{CB}}{\beta} \right) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{\left( \frac{r}{R} \right)^{km} - \left( \frac{R}{r} \right)^{km}}{\left( \frac{r_c}{R} \right)^{km} + \left( \frac{R}{r_c} \right)^{km}} \times$$

$$\times (\cos(mk\theta) - \cos(mk(\alpha - \theta))). \quad (4.10)$$

Большой практический интерес представляет исследование циркуляционного движения в прифилтровой зоне с проницаемостью меньшей, чем водоносный горизонт. Уменьшение проницаемости есть результат проявления химического, биологического либо механического коагулянта [91,92]. В зависимости от конкретных условий может наблюдаться и увеличение проницаемости прифилтровой зоны, что может быть связано с проведением декоагуляционных работ или с устройством гравийной обсыпки в процессе бурения скважины. В работе [93] приводится расчет установившейся радиальной фильтрации воды к скважине с измененной проницаемостью в призабойной зоне при сохранении закона Дарси и отклонении от него.

Рассмотрим циркуляционное движение жидкости в прифилтровой закоагулированной зоне скважины с постоянной проницаемостью  $K_1$  и радиусом  $r_0$  и проницаемостью водоносного горизонта  $K_2$  (рисунок 4.2).

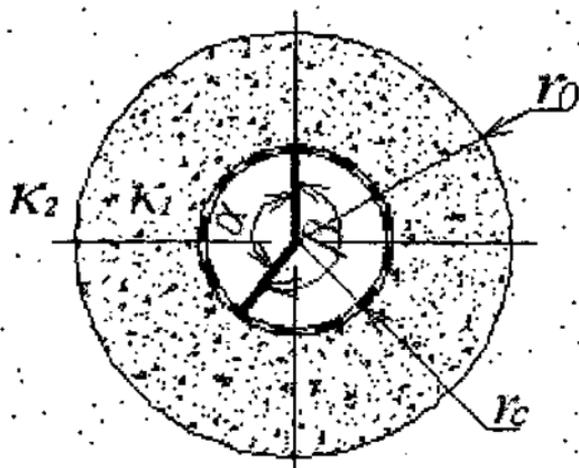


Рис. 4.2. Расчетная схема скважины с измененной проницаемостью прифилътовой зоны

Для случая плоскопараллельного движения жидкости (давление  $P$  не зависит от координаты  $Z$ ) процесс установившейся фильтрации описывается следующими уравнениями Лапласа:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial \theta^2} = 0, \quad r_c < r < r_0, \quad 0 < \theta < \alpha + \beta, \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_2}{\partial \theta^2} = 0, \quad r_0 < r < R, \quad 0 < \theta < \alpha + \beta. \quad (4.12)$$

Граничные условия примут вид.

На контуре питания пласта

$$p_2|_{r=R} = P_m, \quad 0 < \theta < \alpha + \beta. \quad (4.13)$$

Дебит нагнетательного сектора на стенке скважины считается известным

$$r \frac{\partial p_1}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = -\frac{Q_{\text{св}} \mu}{M \alpha K_1}, \quad 0 \leq \theta < \alpha. \quad (4.14)$$

Дебит всасывающего сектора на стенке скважины

$$r \frac{\partial p_1}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = \frac{Q_{\text{св}} \mu}{M \beta K_1}, \quad \alpha \leq \theta < \alpha + \beta. \quad (4.15)$$

Условия на границе смены проницаемостей:

$$p_1 \Big|_{r=r_0} = p_2 \Big|_{r=r_0}. \quad (4.16)$$

$$K_1 \frac{\partial p_1}{\partial r} \Big|_{r=r_0-0} = K_2 \frac{\partial p_2}{\partial r} \Big|_{r=r_0+0}. \quad (4.17)$$

$$p_1(r, \theta) = p_1(r, \theta + (\alpha + \beta)), \quad r_c < r < r_0, \quad (4.18)$$

$$p_2(r, \theta) = p_2(r, \theta + (\alpha + \beta)), \quad r_0 < r < R. \quad (4.19)$$

Решая уравнения (4.11) и (4.12) при вышеперечисленных граничных условиях (4.13)–(4.19) и учитывая, что  $K = \frac{\kappa \mu}{\rho g}$  и  $p = \rho g h$ , получаем решение для определения напоров в прифильтровой зоне  $h_1(r, \theta)$  и в пласте  $h_2(r, \theta)$ :

$$\begin{aligned}
 h_1(r, \theta) = & h_{cr} - \frac{(Q_{ch} - Q_{cb})}{(\alpha + \beta)M} \left( \frac{1}{\kappa_2} \ln \frac{r_0}{R} + \frac{1}{\kappa_1} \ln \frac{r}{r_0} \right) + \\
 & + \frac{(\alpha + \beta)}{2\pi^2 M \kappa_1} \left( \frac{Q_{ch}}{\alpha} + \frac{Q_{cb}}{\beta} \right) \times \\
 & \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(mk\theta) + \sin(mk(\alpha - \theta))}{k^2} F_{1k}(r),
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

$$\begin{aligned}
 h_2(r, \theta) = & h_{cr} - \frac{(Q_{ch} - Q_{cb})}{(\alpha + \beta)M \kappa_2} \left( \ln \frac{r}{R} \right) + \\
 & + \frac{(\alpha + \beta)}{\pi^2 M (\kappa_1 + \kappa_2)} \left( \frac{Q_{ch}}{\alpha} + \frac{Q_{cb}}{\beta} \right) \times \\
 & \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(mk\theta) + \sin(mk(\alpha - \theta))}{k^2} F_{2k}(r),
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

где

$$F_{1k}(r) = \frac{G_k^{(-)}(r)}{G_k^{(+)}(r_c)}; \quad F_{2k}(r) = \frac{\left(\frac{r}{R}\right)^{mk} - \left(\frac{R}{r}\right)^{mk}}{G_k^{(+)}(r_c)};$$

$$G_k^{(-)}(r) = \left(\frac{r}{R}\right)^{mk} R_{1k} - \left(\frac{R}{r}\right)^{mk} R_{2k};$$

$$G_k^{(+)}(r) = \left(\frac{r}{R}\right)^{mk} R_{1k} + \left(\frac{R}{r}\right)^{mk} R_{2k};$$

$$R_{1k} = 1 - \kappa_0 \left(\frac{R}{r_0}\right)^{mk}; \quad R_{2k} = 1 - \kappa_0 \left(\frac{r_0}{R}\right)^{mk};$$

$$\kappa_0 = \frac{\kappa_1 - \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2}.$$

В случае однородного грунта ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$ ) уравнения (4.20) и (4.21) совпадают и сводятся к уравнению (4.8). Вычисление скоростей через дифференцирование под знаком суммы законно в силу равномерной сходимости рядов (4.8), (4.20) и (4.21) и равномерной сходимости рядов после почленного дифференцирования.

Согласно (4.20), (4.2) и (4.3) скорость  $v(\theta, r)$  в любой точке закольматированной зоны проницаемостью  $\kappa_1$  и радиусом  $r_0$  будет равна

$$v = \sqrt{v_{r_1}^2 + v_{\theta_1}^2}, \quad r_c < r < r_0, \quad (4.22)$$

где

$$v_{r_1} = -\frac{Q_{\text{сн}} - Q_{\text{св}}}{(\alpha + \beta)Mr} - \left( \frac{Q_{\text{сн}}}{\alpha} + \frac{Q_{\text{св}}}{\beta} \right) \frac{1}{\pi Mr} \times \\ \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(mk\theta) + \sin(mk(\alpha - \theta))}{k} F_{3k}(r), \quad (4.23)$$

$$v_{\theta_1} = -\left( \frac{Q_{\text{сн}}}{\alpha} + \frac{Q_{\text{св}}}{\beta} \right) \frac{1}{\pi Mr} \times \\ \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(mk\theta) - \cos(mk(\alpha - \theta))}{k} F_{1k}(r), \quad (4.24)$$

$$F_{3k}(r) = \frac{G_k^{(+)}(r)}{G_k^{(+)}(r_c)}. \quad (4.25)$$

С помощью полученных решений (4.20), (4.21) и (4.22) можно оценить зону распространения напора и скорости в прифильтровой зоне скважины в процессе установившейся циркуляции жидкости.

#### ***4.2. Экспериментальные и теоретические исследования параметров циркуляционного потока жидкости от нагнетательного к всасывающему сектору***

Экспериментальные исследования параметров циркуляционного потока жидкости осуществлялись на экспериментальной установке (рисунок 4.3), состоящей из радиального фильтрационного лотка 3 диаметром 1,22 м и высотой 0,5 м, внутри которого устанавливалась модель фильтра 4 совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины [87]. Фильтр скважины (ТУ 51-644-74) представлял собой трубчатый полиэтиленовый каркас (ГОСТ 18599-73) диаметром 0,225 м, обмотанный проволокой  $d = 2$  мм. Внутренняя часть фильтра была разделена вертикальными пакерами на нагнетательные и всасывающие сектора. Торцы фильтра и крышка лотка были герметично уплотнены.

Фильтрационный лоток загружался однородным кварцевым фильтрующим песком (ТУ РБ 100016844.241-2001) с послойным его уплотнением и трамбовкой. Во избежание защемления воздуха песок закладывался в воду.

В экспериментах моделировался напорный водоносный горизонт, статический уровень (пластовое давление) которого устанавливался на отметке 1,5 м над кровлей пласта. Постоянство статического напора в кольцевом бьефе 7 обеспечивалось с помощью напорного бака 1, холостого слива 2 и насоса 17. Вода для экспериментов была предварительно отстояна более двух суток при температуре 16°C.

## Щит пьезометров

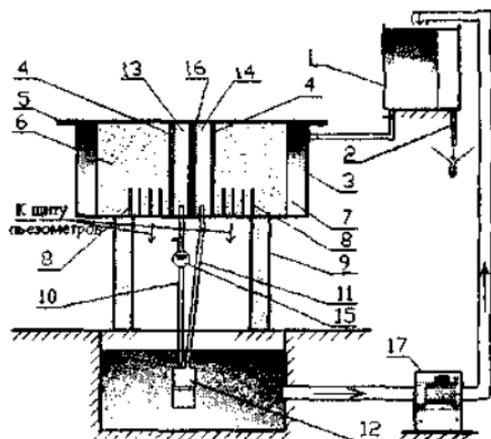


Рис. 4.3. Схема и общий вид экспериментальной установки:

1 – напорный бак; 2 – холостой слив; 3 – фильтрационный лоток;

4 – фильтр скважины; 5 – крышка фильтрационного лотка; 6 – водовмещающий грунт; 7 – кольцевой бьеф; 8 – пьезометры; 9 – стойка; 10 – нагнетательный трубопровод; 11 – отводящий трубопровод; 12 – насос «Ручеек-1»; 13 – нагнетательный сектор; 14 – всасывающий сектор; 15 – счетчик воды СХВ 15; 16 – разделительный вертикальный пакер; 17 – насос К160/20А

Вода подавалась в нагнетательный сектор при помощи электронасоса «Ручеек-1» (БВ-0.12-40-У5, ГОСТ 26287-84), установленного в резервуаре с водой.

Установка работала следующим образом. Электронасосом «Ручеек-1» вода подавалась в нагнетательный сектор 13 с расходом  $Q_{сн}$ , который фиксировался при помощи секундомера и счетчика воды СХВ 15, установленного на нагнетательном трубопроводе. Далее из фильтра вода нагнеталась в прифильтровую зону скважины, откуда циркуляционный поток устремлялся во всасывающий сектор 14 с расходом  $Q_{св}$ . Пренебрегая потерями расхода в насосе можно считать, что  $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$ .

Давление в пласте 6 регистрировалось при помощи пьезометров 8, установленных в характерных точках пласта. Схема расположения пьезометров, при делении фильтра на два и четыре сектора с указанием их номеров и углов установки  $\theta$ , показана на рисунке 4.4.

Для проверки адекватности математической модели циркуляционного движения жидкости в прифильтровой зоне скважины был проведен ряд лабораторных экспериментов при делении фильтра скважины на два и четыре сектора с однородным и кольматирующим грунтом в виде кольца вокруг модели фильтра скважины (рисунок 4.5). Кольматирующий грунт состоял из смеси кварцевого фильтрующего песка (ТУ РБ 100016844.241-2001) и железосодержащего кольматирующего осадка, извлеченного из водоподъемных труб водозаборной скважины № 21 водозабора «Боровляны».

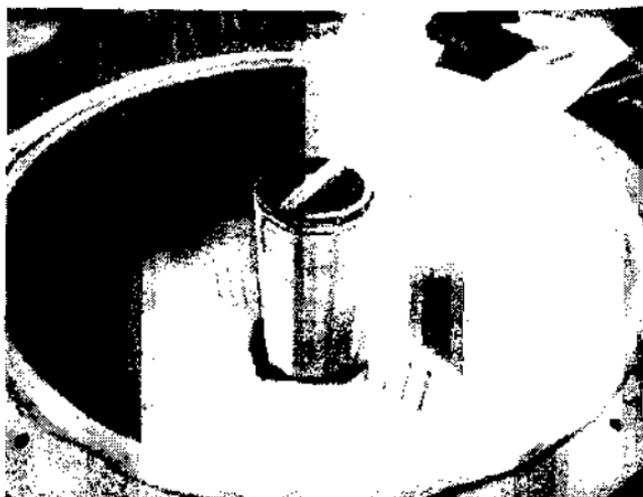


Рис. 4.4. Схема размещения пьезометров:  
 а – при делении фильтра на два сектора;  
 б – при делении фильтра на четыре сектора

Параметры экспериментальной установки и условия проведения лабораторных исследований приведены в таблице 4.1.

В лабораторных условиях исследовалось циркуляционное движение жидкости для случая равенства расходов ( $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{и}$ ) и углов ( $\alpha = \beta$ ) нагнетательного и всасывающего секторов.

а)



б)



Рис. 4.5. Общий вид фильтрационного лотка:  
а – фильтр разделен на два сектора; б – фильтр разделен на четыре сектора

в)



г)



Продолжение рис. 4.5. Общий вид фильтрационного лотка:  
в – пласт в лотке однородный; г – пласт с кольматирующим кольцом

Таблица 4.1. Условия проведения экспериментальных исследований

Характеристика пласта	Параметры установки и условие эксперимента						
	коэффициент фильтрации, м/сут	длина фильтра, м	расход $Q_u$ , м <sup>3</sup> /с	R, м	$r_0$ , м	$r_c$ , м	к-во секторов $n$ , $\alpha = \beta = 360^\circ / n$
Однородный грунт	$K = 1236$	0,51	$3,14 \cdot 10^{-4}$	0,5	-	0,113	2
		0,24	$3,07 \cdot 10^{-4}$				
			$2,53 \cdot 10^{-4}$				
Прифильтровая зона в виде кольматирующего кольца	$K_1 = 864,$ $K_2 = 1236$	0,24	$3,07 \cdot 10^{-4}$	0,5	0,213	0,113	2
Однородный грунт	$K = 691$	0,24	$1,45 \cdot 10^{-4}$ $1,33 \cdot 10^{-4}$	0,5	-	0,113	4
Прифильтровая зона в виде кольматирующего кольца	$K_1 = 173,$ $K_2 = 691$	0,24	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,5	0,213	0,113	4

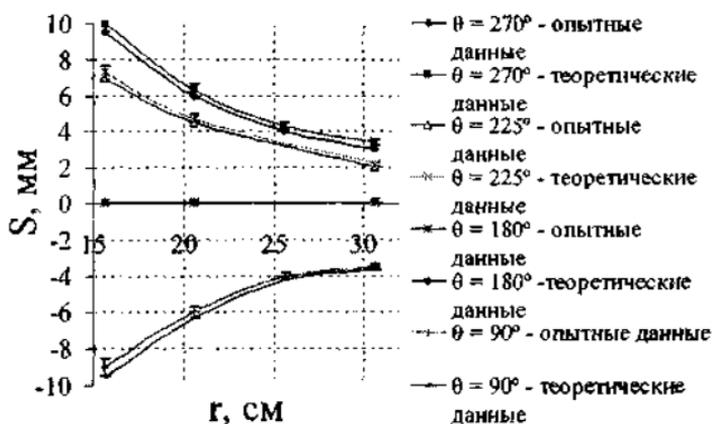
Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований приведено на графиках (рисунки 4.6 и 4.7), где на расчетные графики  $S = f(r)$  нанесены опытные данные. Здесь  $r$  – радиус установки пьезометров (рисунок 4.4) при заданном угле  $\theta$ ,  $S$  – понижение уровня в пьезометрах при откачке ( $S < 0$ ), и повышение уровня  $S$  при закачке ( $S > 0$ ). Расчетные значения  $h$  для однородного грунта и грунта с кольматирующим кольцом были определены по формулам (4.8), (4.20) и (4.21) соответственно.

Анализ полученных расчетных и экспериментальных значений понижения (повышения) уровня  $S$  в пьезометрах показывает, что относительная погрешность этих величин при однородном грунте в среднем составляет 4,7%, а при кольматирующем кольце – 10,9% (таблица 4.2). Значительное расхождение значений теоретических и экспериментальных данных в случае, когда пласт выполнен в виде кольматирующего кольца, объясняется сложностью создания достаточно равномерной проницаемости закольматированной зоны железосодержащим осадком при его укладке.

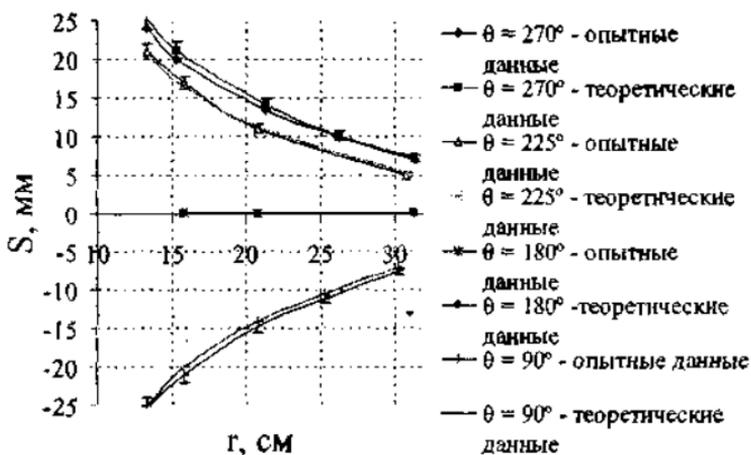
Таблица 4.2. Выборочные числовые характеристики погрешности теоретических и экспериментальных данных

Описательная характеристика относительной погрешности	Пласт однородный	Пласт с кольматирующим кольцом
Среднее	4,7	10,9
Доверительный интервал -95%	4,0	7,3
Доверительный интервал +95%	5,3	14,5
Стандартная ошибка	0,34	1,76
Медиана	4,5	9
Мода	0,1	22
Стандартное отклонение	2,94	9,48
Дисперсия	8,65	89,8
Экссесс	0,45	-0,4
Асимметрия	0,63	0,55

Таким образом, хорошая сходимость результатов теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о возможности использования данной математической модели при дальнейшем изучении распределения параметров циркуляционного потока жидкости и определении конструктивных параметров СУЦР.



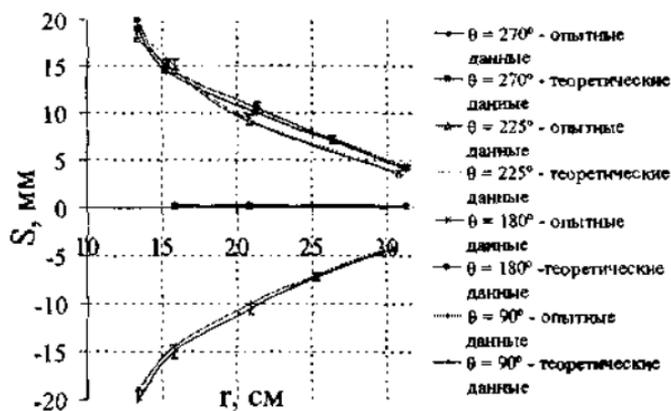
а)



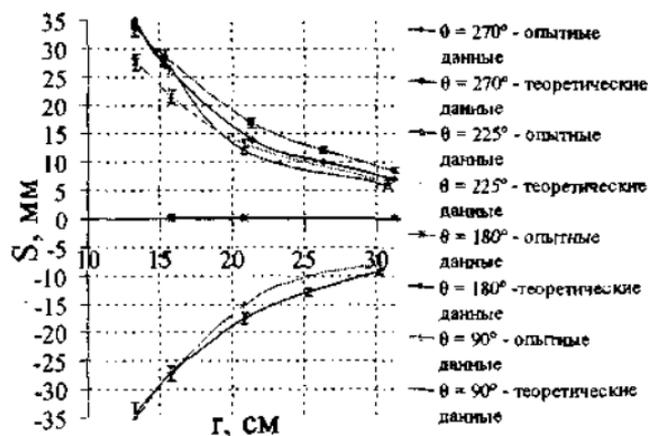
б)

Рис. 4.6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований для двух секторов:

а - при длине фильтра 0,51 м; б - при длине фильтра 0,24 м ( $Q_0 = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ).



В)



Г)

Окончание рис. 4.6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований для двух секторов:

б - при длине фильтра 0,24 м ( $Q_0 = 2,53 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с);

г - пласт с кольматирующим кольцом

### 4.3. Исследование распределения параметров циркуляционного потока жидкости при равенстве расходов и углов нагнетательного и всасывающего секторов

Анализ распределения параметров циркуляционного потока жидкости проводился посредством разработанной математической модели, а также данных, полученных в лабораторных условиях [87].

С помощью математического пакета Maple [94] были построены графики (рисунок 4.8), иллюстрирующие распределение напора и скоростей в однородной прифилтровой зоне скважины длиной 0,24 м ( $Q_{ц} = 3.07 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с), фильтр которой разделен на два сектора. Напор в прифилтровой зоне скважины определялся исходя из зависимости (4.8), а скорости – по формулам (4.9) и (4.10) соответственно.

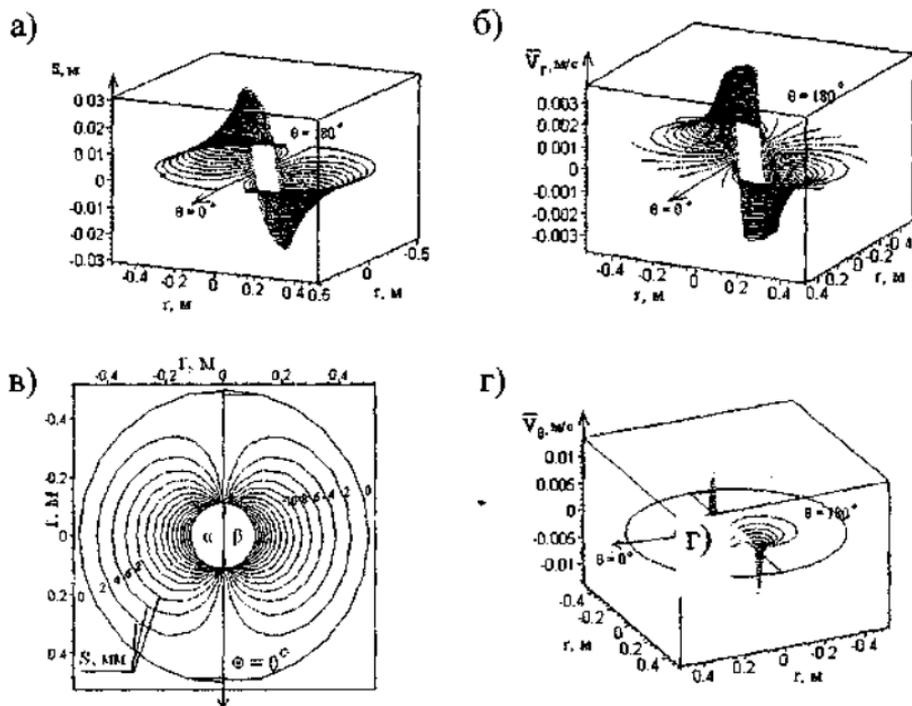


Рис. 4.8. Теоретическое распределение напора и скоростей: а – распределение повышения (понижения) напора; б – радиальная составляющая скорости; в – гидродинамическая сетка; г – угловая составляющая скорости

Анализ теоретического распределения повышения (понижения) уровня  $S$  и скоростей (рисунок 4.8) в прифилтровой зоне скважины в этом случае показывает, что  $S$  на границе секторов равняется нулю, а угловая составляющая вектора скорости достигает максимального значения. Радиальная же составляющая вектора скорости достигает максимума в центре сектора [87].

Аналогичное распределение повышения (понижения) уровня  $S$  наблюдается при анализе экспериментальных данных (рисунок 4.9).



Рис. 4.9. Распределение напора по экспериментальным данным:

а – в случае двух секторов ( $Q_0 = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ );

б – в случае четырех секторов ( $Q_0 = 1,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ )

В случае равенства углов ( $\alpha = \beta$ ) и расходов ( $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$ ) нагнетательного и всасывающего секторов напор (давление) и скорость циркуляционного потока жидкости распределяются равномерно между секторами, имеют симметричную схему и отличаются только знаком (рисунки 4.8 и 4.9).

Отличительной особенностью циркуляционного потока, образованного в результате деления фильтра скважины на ряд нагнетательных и всасывающих секторов, является деление циркуляционного расхода на два фильтрационных потока, каждый из которых стремится к соседнему сектору.

В результате такого деления помимо радиальной возникает и угловая составляющая вектора скорости. Это дает возможность растворять и выносить кольматирующий осадок за пределы скважины. Такой процесс регенерации способствует равномерной очистке скважины.

#### *4.4. Анализ радиальной и угловой составляющих скорости циркуляции жидкости в прифилтровой закольматированной зоне*

Разработанная математическая модель движения жидкости в закольматированной прифилтровой зоне скважины, фильтр которой разделен на нагнетательные и всасывающие сектора, позволяет определить напор  $h_1$  и скорость реагента  $v(\theta, r)$  в любой точке закольматированной зоны радиусом  $r_0$ .

Однако входящие в уравнение (4.22) конструктивные параметры секторного устройства циркуляционно-реагентной регенерации (такие как  $m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) могут изменяться в широких пределах в зависимости от  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $Q_{сн}$ ,  $Q_{св}$ . Задача состоит в том, чтобы при прочих равных условиях достигнуть максимума основного параметра конвективного диффузионного переноса вещества: скорости  $v(\theta, r)$  в прифилтровой закольматированной зоне.

При определении оптимальных конструктивных параметров секторного устройства приняты следующие допущения:

- прифльтровая закольматированная зона скважины принимается с постоянной и однородной проницаемостью  $K_1$ , как по глубине скважины, так и в зоне от  $r_c$  до  $r_0$ ;

- при количестве секторов  $m \geq 2$  скважинного устройства предполагается, что расход равномерно распределен между смежными секторами одного типа;

- при длине секторного устройства меньше, чем мощность водоносного горизонта, принимается, что линии тока лежат в горизонтальной плоскости при циркуляции жидкости в прифльтровой зоне. Тогда в формулах (4.22), (4.23) и (4.24)  $M = L_y$ .

Согласно принятым допущениям расчетная схема скважины с секторным устройством поинтервальной циркуляционно-реагентной регенерации будет иметь вид, как показано на рисунке 4.10 [95].

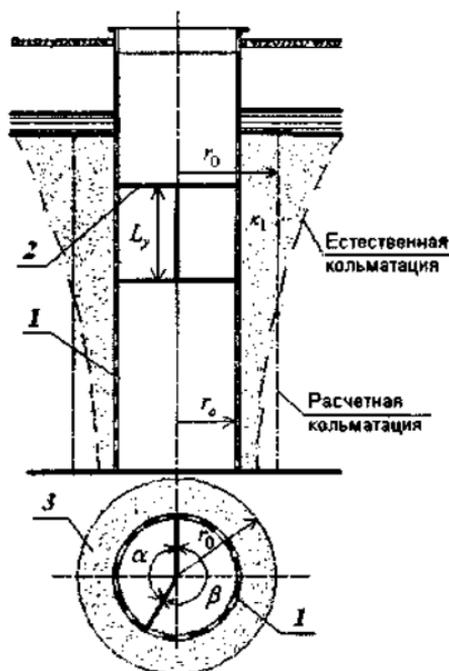


Рис. 4.10. Расчетная схема скважины:

1 – фильтр скважины; 2 – секторное устройство; 3 – прифльтровая зона

При исследовании циркуляции жидкости показано [48, 50, 96], что в результате несоблюдения баланса расхода закачки и откачки происходит нарушение симметрии гидродинамики циркуляционного потока. При превышении расхода закачки над расходом откачки часть жидкости уходит в пласт, а при превышении расхода откачки происходит отбор жидкости из пласта. Следовательно, для обеспечения максимальных размеров зоны обработки прифилтровой зоны необходимо использовать симметричную схему.

Для симметричной схемы циркуляции при использовании секторного устройства для обработки скважины необходимо: 1) обеспечить равенство расходов нагнетательного и всасывающего секторов, т.е.  $Q_{сн} = Q_{св}$ , при  $\alpha = \beta$ ; 2) обеспечить определенное соотношение между  $Q_{сн}$  и  $Q_{св}$  при  $\alpha \neq \beta$  или соотношение между  $\alpha$  и  $\beta$  при  $Q_{сн} \neq Q_{св}$ . Выполнить второе условие сложнее по причине, связанной с изготовлением секторного устройства и технологией циркуляционной регенерации.

В этой связи в секторном циркуляционном устройстве удобнее использовать погружной электронасосный агрегат, который обеспечивает равенство расходов закачки и откачки, т.е.

$$Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}.$$

Для исследования характера распределения скорости в прифилтровой закольматированной зоне в зависимости от количества секторов  $m$  необходимо проанализировать уравнение (4.22).

Теоретические и экспериментальные данные показали, что в случае  $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$  и  $\alpha = \beta$  распределение давления и скорости в прифилтровой зоне носит симметричный характер относительно нагнетательного и всасывающего секторов. Поэтому для дальнейшего анализа рассматривается только нагнетательный сектор с углом  $\alpha$ .

**Анализ радиальной составляющей скорости.** Для нагнетательного сектора область изменения переменных описывается неравенствами  $r_c \leq r \leq r_0$  и  $0 \leq \theta \leq \alpha$ . Исследование проведем для случая

$$\begin{cases} \kappa_2 \geq \kappa_1 > 0 \\ Q_{\text{сн}} = Q_{\text{св}} = Q_{\text{в}} \\ \alpha = \beta = \frac{\pi}{m} \end{cases} \quad (4.26)$$

С учетом (4.26) радиальная составляющая скорости, определяемая по формуле (4.23), будет иметь вид

$$v_r(\theta, r) = \frac{2mQ_{\text{в}}}{\pi^2 L_y r} W_r(\theta, r), \quad (4.27)$$

где  $W_r(\theta, r) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin((2n-1)m \cdot \theta)}{2n-1} L_{2n-1}(r);$

$$L_n(r) = \frac{F_n(r)}{F_n(r_c)};$$

$$F_n(r) = \left(\frac{R}{r}\right)^{mn} \cdot \left(1 - \kappa_0 \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^{2mn} + \left(\frac{r}{R}\right)^{2mn} - \kappa_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{2mn}\right).$$

Отметим некоторые (достаточно очевидные) свойства функции  $W_r(\theta, r)$

$$\begin{cases} W_r(0, r) \equiv W_r(\alpha, r) \equiv 0, \\ W_r(\theta, r_c) = \frac{\pi}{2}, \theta \in (0; \alpha), \\ W_r\left(\frac{\alpha}{2} - \theta, r\right) \equiv W_r\left(\frac{\alpha}{2} + \theta, r\right), \theta \in (0; \frac{\alpha}{2}). \end{cases} \quad (4.28)$$

Последнее равенство означает, что при каждом  $r$  график функции  $W_r(\theta, r)$  симметричен относительно  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ . Сделаем

упрощение в (4.27). Положим  $\bar{L}_n(r) = \left(\frac{r_c}{r}\right)^{nm} \frac{1 - \kappa_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{2nm}}{1 - \kappa_0 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0}\right)^{2nm}}$  и

$\bar{W}_r(\theta, r) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)m \cdot \theta}{2n-1} \bar{L}_{2n-1}(r)$ . Тогда

$$\left| L_n(r) - \bar{L}_n(r) \right| \leq \left(\frac{r_c}{r}\right)^{nm} \frac{\left(\frac{r}{R}\right)^{2nm} - \left(\frac{r_c}{R}\right)^{2nm}}{\left(1 - \kappa_0 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0}\right)^{2nm}\right) \cdot F_n(r_c)}. \quad (4.29)$$

Так как  $\kappa_0 \leq 0$ , а для скважины  $r_0 \ll R$ , то из (4.29) нетрудно получить, что  $W_r(\theta, r) \approx \bar{W}_r(\theta, r)$ . Этот вывод позволяет заменить в (4.27) функцию  $W_r(\theta, r)$  на функцию  $\bar{W}_r(\theta, r)$ .

Для сокращения записи в дальнейшем будем использовать следующие обозначения

$$\Delta_r = \frac{r_c}{r}, \quad \varepsilon_{1r} = \frac{r \cdot r_c}{r_0^2}, \quad \varepsilon_{2r} = \frac{r_c^3}{r \cdot r_0^2}, \quad \varepsilon_{3r} = \frac{r \cdot r_c^3}{r_0^4}. \quad (4.30)$$

Теперь положим

$$\begin{cases} \bar{L}_n(r) = \Delta_r^{nn} - \kappa_0 \varepsilon_{1r}^{nn} + \kappa_0 \varepsilon_{2r}^{nn} - \kappa_0^2 \varepsilon_{3r}^{nn} \\ \bar{W}(\theta, r) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)m\theta}{2n-1} \cdot \bar{L}_{2n-1}(r) \end{cases} \quad (4.31)$$

Отсюда получим

$$\left| \bar{L}_n(r) - \bar{L}_n(r) \right| \leq \kappa_0^2 \left( \frac{r_c^5}{r \cdot r_0^4} \right)^{nm} \left( 1 - \kappa_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{2nm} \right), \quad (4.32)$$

причем при  $\kappa_2 \approx \kappa_1$  погрешность практически равна 0.

Применяя операции почленного дифференцирования и интегрирования к разложению, указанному в [97], можно получить следующие разложения. Во-первых,

$$\begin{aligned} \Phi_r(\theta, r) &= 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)m \cdot \theta}{2n-1} r^{2n-1} = \\ &= \operatorname{arctg} \left( \frac{2r}{1-r^2} \cdot \sin m\theta \right), \end{aligned} \quad (4.33)$$

где  $0 < r < 1$ ,  $\theta \in \left[ 0; \frac{\pi}{m} \right]$ .

Во-вторых,

$$\Phi_\theta(\theta, r) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)m \cdot \theta}{2n-1} r^{2n-1} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+2r \cos m\theta + r^2}{1-2r \cos m\theta + r^2} \right), \quad (4.34)$$

где  $0 < r < 1$ .

Свойства функций  $\Phi_r(\theta, r)$  и  $\Phi_\theta(\theta, r)$  хорошо иллюстрируют следующие графики (рисунки 4.11 и 4.12).

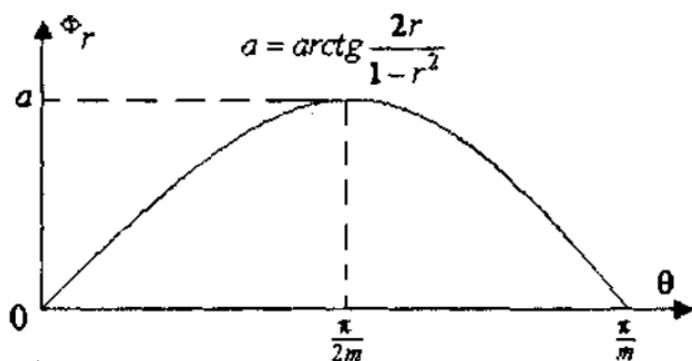


Рис. 4.11. График функции  $\Phi_r(\theta, r)$

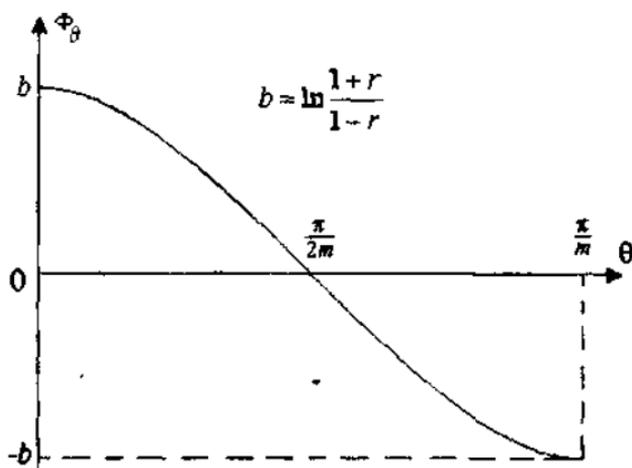


Рис. 4.12. График функции  $\Phi_\theta(\theta, r)$

Неравенство (4.32) с учетом (4.31) позволяет утверждать, что

$$\left| \bar{W}_r(\theta, r) - \bar{\bar{W}}_r(\theta, r) \right| \approx 4\kappa_0^2 \left( \frac{r_c^5}{r \cdot r_0^4} \right)^m \left[ 1 - \kappa_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{2m} \right].$$

Отметим, что эта погрешность мала, если  $\kappa_2 \approx \kappa_1$ . Если же  $\kappa_1 \ll \kappa_2$  (т.е.  $|\kappa_0| \approx 1$ ), то на внутренней границе  $r = r_c$  нагнетательного сектора погрешность имеет порядок  $4 \cdot \left( \frac{r_c}{r_0} \right)^{4m}$ , на

внешней границе  $r = r_0$  — порядок  $4 \cdot \left( \frac{r_c}{r_0} \right)^{5m}$ .

Учитывая вышеизложенное, заменим в (4.27) функцию  $W_r(\theta, r)$  на  $\bar{\bar{W}}_r(\theta, r)$ , которую найдем, используя формулу (4.33) и соотношения (4.30) и (4.31)

$$\bar{\bar{W}}_r(\theta, r) = \Phi_r(\theta, \Delta_r^m) - \kappa_0 \Phi_r(\theta, \varepsilon_{1r}^m) + \kappa_0 \Phi_r(\theta, \varepsilon_{2r}^m) - \kappa_0^2 \Phi_r(\theta, \varepsilon_{3r}^m). \quad (4.35)$$

Таким образом, в нагнетательном секторе радиальную составляющую скорости можно находить по формуле

$$v_r(\theta, r) = \frac{2mQ_u}{\pi^2 L_y r} \bar{\bar{W}}_r(\theta, r). \quad (4.36)$$

Заметим, что функция  $\bar{\bar{W}}_r(\theta, r)$  так же, как и функция  $W_r(\theta, r)$ , удовлетворяет условиям (4.28).

Замена (4.27) на (4.36) приводит к возникновению незначительной относительной погрешности, если  $m > 1$  и  $\frac{r_c}{r_0} < 0,4$  (эта погрешность менее 1%). Если  $m = 1$ , формулу (4.36) имеет смысл

использовать при  $\frac{r_c}{r_0} < 0,3$  (хотя, как показывает численный эксперимент, в любом случае качественное поведение  $v_r(\theta, r)$  сохраняется).

Анализ равенств (4.35) – (4.36) с учетом свойств функции  $\Phi_r(\theta, r)$  позволяет сделать следующие выводы [95]:

1. При каждом  $r \in (r_c; r_0]$  график  $v_r(\theta, r)$  имеет вид, указанный на рисунке 4.12 (в частности, при  $\theta = 0$  и  $\theta = \alpha$  скорость равна 0, а при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  достигает своего максимального значения);

2. При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  скорость  $v_r(\theta, r)$  убывает при увеличении  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$  (т.к. убывают величины  $\Delta_r, \varepsilon_{1r}, \varepsilon_{2r}, \varepsilon_{3r}$ ); максимальное значение, равное  $\frac{mQ_u}{\pi L_y r_c}$ , она принимает на границе

$r = r_c$ ;

3. При фиксированных значениях  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0]$  значения  $v_r(\theta, r)$  убывают с ростом  $m$  (т.к. убывают величины  $\Delta_r^m$  и  $\varepsilon_{ir}^m$ ).

Анализ угловой составляющей скорости. Угловая составляющая, определяемая по формуле (4.24), с учетом (4.26) будет иметь вид:

$$v_\theta(\theta, r) = \frac{2mQ_u}{\pi^2 L_y r} W_\theta(\theta, r), \quad (4.37)$$

$$\text{где } W_\theta(\theta, r) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)m \cdot \theta}{2n-1} Z_{2n-1}(r); Z_n(r) = \frac{\tilde{F}_n(r)}{F_n(r_c)}$$

$$\bar{F}_n(r) = \left(\frac{R}{r}\right)^{mn} \cdot \left( -1 + \kappa_0 \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^{2mn} + \left(\frac{r}{R}\right)^{2mn} - \kappa_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{2mn} \right).$$

Аналогично, как это сделано для радиальной составляющей скорости, можно показать, что в (4.37) можно вместо функции

$$Z_n(r) \text{ использовать функцию } \bar{Z}_n(r) = -\left(\frac{r_c}{r}\right)^{nm} \cdot \frac{1 + \kappa_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{2nm}}{1 - \kappa_0 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0}\right)^{2nm}}$$

(и соответствующую ей функцию  $\bar{W}_\theta(\theta, r)$ ). Далее, при нахождении функции  $W_\theta(\theta, r)$  в (4.37), функцию  $\bar{Z}_n(r)$  можно заменить на  $\bar{Z}_n(r) = -\Delta_r^{mn} - \kappa_0 \varepsilon_{1r}^{mn} + \kappa_0 \varepsilon_{2r}^{mn} - \kappa_0^2 \varepsilon_{3r}^{mn}$ . Используя равенство (4.34), находим

$$\bar{W}_\theta(\theta, r) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)m \cdot \theta}{2n-1} \bar{Z}_{2n-1}(r) =$$

$$= -(\Phi_\theta(\theta, \Delta_r^m) + \kappa_0 \Phi_\theta(\theta, \varepsilon_{1r}^m) + \kappa_0 \Phi_\theta(\theta, \varepsilon_{2r}^m) + \kappa_0^3 \Phi_\theta(\theta, \varepsilon_{3r}^m))$$

Можно показать, что при любом  $\theta \in (0; \alpha)$  отклонение

$$\left| W_\theta(\theta, r) - \bar{W}_\theta(\theta, r) \right| \text{ имеет порядок } 4\kappa_0^2 \left( \frac{r_c^5}{r \cdot r_0^4} \right)^m. \text{ Поэтому формулу (4.37) можно заменить на}$$

$$v_\theta(\theta, r) = \frac{2mQ_u}{\pi^2 L_y r} \bar{W}_\theta(\theta, r). \quad (4.39)$$

Погрешность при этой замене будет равна 0, если  $\kappa_2 = \kappa_1$  (т.е.  $\kappa_0 = 0$ ). Она будет мала, если  $m > 1$  и  $\frac{r_c}{r_0} < 0,4$ . При  $m = 1$  и  $\kappa_1 \ll \kappa_2$  формулу (4.39) имеет смысл использовать при  $\frac{r_c}{r_0} < 0,3$ .

Анализ равенств (4.38) – (4.39) с использованием свойств функции  $\Phi_\theta(\theta, r)$  позволяет сделать следующие выводы [95]:

1. При каждом  $r \in (r_c; r_0]$  график  $v_\theta(\theta, r)$  имеет вид, указанный на рисунке 4.13 (в частности, при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  эта скорость равна 0, а при  $\theta = 0$  и  $\theta = \alpha$  величина  $|v_\theta(\theta, r)|$  достигает своего максимального значения);

2. При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  величина  $|v_\theta(\theta, r)|$  убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$  (т. к. убывают величины  $\Delta_r, \varepsilon_{1r}, \varepsilon_{2r}, \varepsilon_{3r}$ );

3. При фиксированных значениях  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0)$  величина  $|v_\theta(\theta, r)|$  убывает с ростом  $m$  (т. к. убывают величины  $\Delta_r^m$  и  $\varepsilon_r^m$ ).

Таким образом, с учетом (4.36) и (4.39) скорость можно находить по формуле

$$\begin{aligned}
 v(\theta, r) &= \sqrt{v_r^2(\theta, r) + v_\theta^2(\theta, r)} = \\
 &= \frac{2mQ_u}{\pi^2 L_y r} \sqrt{\bar{W}_r^2(\theta, r) + \bar{W}_\theta^2(\theta, r)},
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

где  $\bar{W}_r(\theta, r)$  и  $\bar{W}_\theta(\theta, r)$  задаются равенствами (4.35) и (4.38) соответственно. Для избежания больших погрешностей при  $m > 1$

должно быть выполнено соотношение:  $\frac{r_c}{r_0} < 0,4$ , а при  $m = 1$  —

$$\frac{r_c}{r_0} < 0,3.$$

$r_0$

Окончательно можно сделать следующие выводы [95]:

1. График скоростей  $v(\theta, r)$  при фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  симметричен относительно  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ ;
2. При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$ ;
3. При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0]$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с увеличением  $m$ ;
4. При фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  максимальное значение  $v(\theta, r)$  принимает либо при  $\theta = 0$  (если  $r$  близко к  $r_c$ ), либо при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  (если  $r$  близко к  $r_0$ );
5. На внутренней границе  $r = r_c$  нагнетательного сектора  $v(\theta, r) > \frac{mQ_u}{\pi L_y r_c}$ .

Также представляет интерес исследование  $v(\theta, r)$  при увеличении проницаемости прифилтровой зоны  $\kappa_1$  (при  $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$ ) в процессе циркуляционно-реагентной обработки. С этой целью по формуле (4.22) при постоянных значениях  $Q_u$ ,  $r_c$ ,  $r_0$ ,  $R$  и  $L_y$  ( $Q_u = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $r_c = 0,163 \text{ м}$ ,  $r_0 = 0,463 \text{ м}$ ,  $R = 500 \text{ м}$ ,  $L_y = 1 \text{ м}$ ) с помощью математического пакета Maple [70] была проанализирована скорость  $v(\theta, r)$  при  $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$ , вычисляемая по формуле (4.22) [95]. Значение параметра  $R$  в расчете принято равным значению для гравелистого песка ( $d = 1,0 \dots 2,0 \text{ мм}$ ) [98]. Минималь-

ное значение параметра  $k_1 = 1 \text{ м/сут}$  принято равным для нижней границы песка мелкозернистого [99, 100], что соответствует значению коэффициента фильтрации закольматированной фильтровой зоны [5, 34, 98]. Значение  $k_2 = 100 \text{ м/сут}$  принято в расчете для крупнозернистого песка [99].

В результате установлено, что при  $\theta = 0$  (если  $r$  близко к  $r_c$  и  $r_0$ ) скорость  $v(\theta, r)$  возрастает и при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  (если  $r$  близко к  $r_c$ ) скорость  $v(\theta, r)$  остается неизменной (если  $r$  близко к  $r_0$ ) скорость  $v(\theta, r)$  уменьшается (Приложение А).

Таким образом, в начале регенерации условия промывки на контуре прифильтровой закольматированной зоны лучше в середине сектора, а при  $k_1 \rightarrow k_2$  — на границе секторов. Поэтому на протяжении всего процесса регенерации обеспечивается равномерная очистка фильтра и прифильтровой зоны при постоянном циркуляционном расходе.

#### *Выводы по главе 4*

1. Предложена теоретическая модель движения горизонтального циркуляционного фильтрационного потока в процессе циркуляционно-реагентной регенерации, которая позволяет определять напор и скорость жидкости в любой точке прифильтровой зоны скважины с постоянной и измененной проницаемостями.

2. Установлено, что давление на границе секторов равняется пластовому, а угловая составляющая вектора скорости достигает максимального значения. Радиальная же составляющая вектора скорости достигает максимума в центре сектора. В случае равенства углов ( $\alpha = \beta$ ) и расходов ( $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$ ) нагнетательного и всасывающего секторов напор и скорость циркуляционного потока жидкости распределяются равномерно между секторами, имеют симметричную схему и отличаются только знаком.

3. Показано, что график скоростей  $v(\theta, r)$  при фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  симметричен относительно  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ ; при каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$ . При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0]$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с увеличением  $m$ ; при фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  максимальное значение  $v(\theta, r)$  принимает либо при  $\theta = 0$  (если  $r$  близко к  $r_c$ ), либо при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  (если  $r$  близко к  $r_0$ ); на внутренней границе  $r = r_c$  нагнетательного сектора  $v(\theta, r) > \frac{mQ_{\text{ц}}}{\pi L_y r_c}$ .

4. В случае симметричной схемы циркуляции ( $Q_{\text{сн}} = Q_{\text{св}} = Q_{\text{ц}}$  и  $\alpha = \beta$ ) максимальная скорость движения жидкости в закольмованной прифилтровой зоне скважины обеспечивается, когда фильтр скважины разделен на два сектора: нагнетательный и всасывающий ( $m = 1$ ).

## Глава 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЦИРКУЛЯЦИОННО-РЕАГЕНТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ СКВАЖИН НА ВОДУ

### 5.1. Лабораторные исследования кинетики выщелачивания кольматирующих отложений.

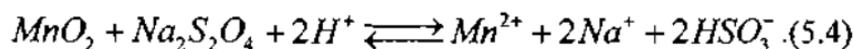
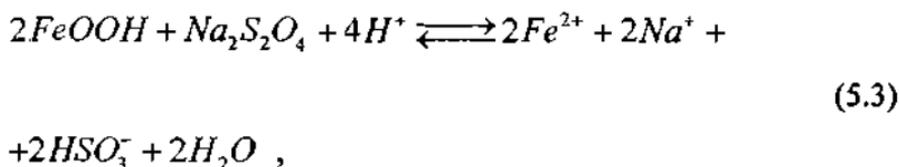
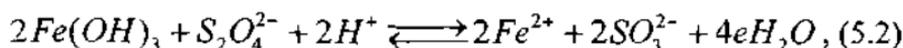
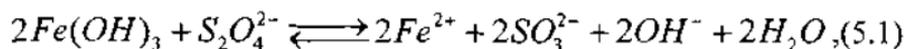
#### Определение продолжительности процесса регенерации

Кинетика выщелачивания кольматирующего осадка из закольматированной прифилтровой зоны скважины зависит от множества факторов. Необходимо учесть состав и количество кольматанта, его физические характеристики, вид используемого реагента, его температуру и вязкость, способ реагентной регенерации, обеспечивающий интенсификацию процесса растворения кольматирующих образований. Теоретическое описание процесса выщелачивания с учетом всех факторов является сложной задачей. Поэтому возникла необходимость в проведении исследований процесса выщелачивания кольматирующих отложений в лабораторных условиях.

Проведенные на кафедре «Гидравлика» лабораторные исследования процесса интенсификации растворения кольматирующих отложений с использованием соляной кислоты показали, что интенсивность процесса растворения существенно возрастает при использовании механического перемешивания реагента, а также при увеличении температуры реагента [101; 102]. Так за 4 часа растворения в режиме реагентной ванны при  $t_p = 46^\circ\text{C}$  степень растворения железистых соединений достигла 70%. В тоже время использование перемешивания подогретого реагента до температуры  $34^\circ\text{C}$  способно за тот же промежуток времени (4 часа) обеспечить степень растворения 83%.

Цель работы заключается в экспериментальном определении продолжительности процесса выщелачивания железистых кольматирующих отложений на примере дитионита натрия в зависимости от скорости фильтрации и установления функциональной связи между этими параметрами. Полученные результаты могут служить обоснованием для расчета продолжительности процесса циркуляционно-реагентной регенерации секторным устройством в зависимости от скорости движения реагента.

При проведении реагентной регенерации скважин может эффективно применяться сильный восстановитель – порошкообразный дитионит натрия  $Na_2S_2O_4$ . Он способен растворять практически полностью дегидратированные соединения железа, а его растворяющая способность практически не уступает растворяющей способности 20–25%-ной соляной кислоты [5, 18]. Механизм процесса восстановления основных компонентов кольматанта дитионитом натрия в водном кислотном и щелочном растворе может быть записан в виде следующих уравнений [5, 39]:



Основными достоинствами дитионита натрия при его использовании для реагентной регенерации являются:

- удобство при транспортировке и хранении (в отличие от соляной кислоты);
- хорошая растворимость в воде, слабое корродирующее действие по отношению к металлическому оборудованию скважин и отсутствие необходимости в подогреве реагента;
- отсутствие специальных мер по технике безопасности, так как при взаимодействии с железистыми кольматирующими осадками отсутствуют токсичные газы, способные вызывать газлифтный подъем непрореагировавшего реагента и гибель обслуживающего персонала, что упрощает производство работ и минимизирует влияние на окружающую среду.

В результате реакции дитионита натрия с гидроксидом железа (III) согласно уравнениям (5.1) и (5.2) происходит образование сульфата железа (II), который может быть удален обеспечением необходимых скоростей при циркуляции реагента в прифильтовой зоне скважины.

В работе [103] установлено, что оптимальным условием растворения железистого кольматанта является концентрация раствора дитионита натрия 6–8% при температуре не выше 18°C. Добавка 1% триполифосфата натрия в раствор позволяет предупредить повторное осаждение гидроксида железа в процессе обработки. Триполифосфат натрия  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  относится к группе пленкообразующих ингибиторов (пассиваторов) коррозии и способен замедлять коррозию металлических элементов фильтров в водной среде за счет образования защитного слоя фосфатов на их поверхности, а также является стабилизатором раствора дитионита натрия [104].

Процесс выщелачивания кольматирующих отложений дитионитом натрия исследовался на экспериментальной установке, приведенной на рисунке 5.1.

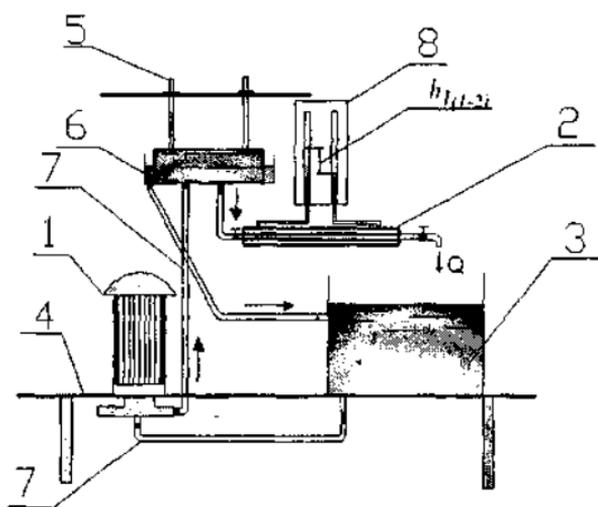


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки:

1 – насос «Кама-3»; 2 – гидроканал; 3 – емкость для реагента; 4 – опорная рама; 5 – устройство для регулировки напора; 6 – холостой слив; 7 – патрубки; 8 – щит пьезометров

Установка представляла собой насос «Кама-3», установленный жестко на опорной раме 4. Из емкости насосом 1 реагент 3 подавался в резервуар, в котором поддерживался постоянный уровень при помощи холостого слива 6. Далее реагент под действием напора, который изменялся регулирующим устройством 5, поступал в гидроканал 2, откуда опять попадал в емкость 3 [88].

Гидроканал заполнялся смесью песка (ТУРБ 16844-241-2001), осадка станции обезжелезивания водозабора «Острова» и цемента в отношении 1:0,5:0,25. Добавка цемента к кольматанту необходима для сцепления и удержания кольматирующего осадка на зернах кварцевого песка, что способствовало образованию дегидратированных соединений, имитирующих естественную цементированную кольматацию [11]. Смесь в указанном соотношении предварительно затворялась водой, высушивалась и дробилась на конгломератообразные структуры. Затем смесь загружалась в гидроканал и послойно трамбовалась.

Раствор дитионита натрия 10%-й концентрации с добавкой триполифосфата натрия 1%-й концентрации при температуре 16°C подавался насосом 1 в резервуар 3, откуда под действием напора фильтровался через закольматированный грунт гидроканала 2. В процессе фильтрации реагента с определенной скоростью  $v$  происходило выщелачивание железистых соединений и вынос продуктов реакции. Скорость фильтрации изменялась при помощи устройства для регулировки напора 5 и краном.

Всего было проведено 15 опытов с различными скоростями фильтрации реагента  $v$  и 3 опыта в режиме реагентной ванны [88].

Кривая регрессии  $t = f(v)$ , устанавливающая зависимость продолжительности  $t$  выщелачивания от скорости движения  $v$  реагента, приведена на рисунке 5.2.

Регрессионный анализ данных показал, что в большей степени экспериментальным данным соответствует логарифмическая регрессионная модель вида:

$$\bar{t} = a \cdot \ln(\bar{v}) + b, \quad (5.5)$$

где  $\bar{t} = t/t_{\max}$ ;  $\bar{v} = v/v_{\max}$ ;  $t_{\max}$  – максимальная продолжительность процесса выщелачивания;  $v_{\max}$  – максимальная скорость движения реагента при выщелачивании.

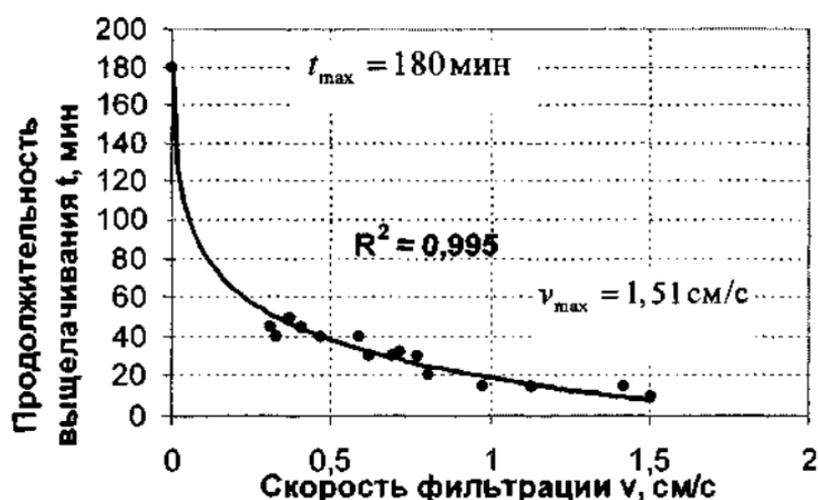


Рис. 5.2. Зависимость продолжительности выщелачивания от скорости фильтрации

Полученная регрессионная модель имеет среднеквадратичное отклонение равное 4,13. Для конкретных лабораторных условий выщелачивания дитионитом натрия железистых соединений установлено, что коэффициенты  $a$  и  $b$  соответственно равны:  $a = -0,15$ ,  $b = 0,04$ . Принятую регрессионную модель характеризует близкое к единице значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,9947$  (рисунок 5.2). Статистическая интерпретация этого результата означает, что изменение значений продолжительности выщелачивания  $t$  объясняется на 99,5% изменением значений скорости движения реагента  $v$ .

Дисперсионный однофакторный анализ, приведенный в таблице 5.1, показывает, что при выбранном уровне надежности  $\alpha = 0,05$   $F$ -статистика значительно больше критического значения  $F$

критерия Фишера, т. е.  $F > F_{кр}$ . Это позволяет принять гипотезу о статистически значимом влиянии скорости фильтрации на продолжительность выщелачивания реагента, при условии достоверности определения значения  $F$  (уровень значимости  $p < 0,05$ ).

Таблица 5.1. Однофакторный дисперсионный анализ

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	$F$ -статистика	Уровень значимости ( $p$ )	$F$ критическое
Между группами	26997,8	1	26997,8	15,76	0,00035	4,13
Внутри групп	58229,6	34	1712,6			
Итого	85227,5	35				

Анализ кинетики выщелачивания при различных гидродинамических условиях показал, что в режиме реагентной ванны увеличение проницаемости закольматированного грунта происходит очень низкими темпами (с 91 до 100%) за продолжительный промежуток времени, равный 180 минутам.

В работе [39] исследован процесс растворения железистых минералов дитионитом натрия в режиме реагентной ванны. В результате исследований установлено время полного растворения, которое составляет для гетита ( $FeOOH$ ) с удельной внешней поверхностью  $22 \text{ м}^2/\text{г}$  – 150 минут, для лепидокрокита ( $FeOOH + Mn$ ) с удельной внешней поверхностью  $80 \text{ м}^2/\text{г}$  – 170 минут, для ферригидрита ( $(5Fe^{3+})_2O_3 \cdot 9H_2O$ ) и гетита с удельными внешними поверхностями соответственно  $309 \text{ м}^2/\text{г}$  и  $93 \text{ м}^2/\text{г}$  – 70 минут. Данные, приведенные в [32], вполне согласуются с экспериментальными данными выщелачивания в режиме реагентной ванны.

Движение реагента в закольматированном грунте значительно увеличивает проницаемость (с 65 до 100%). Время выщелачивания

сокращается от 50 до 10 мин при возрастании скорости движения реагента от 0,31 до 1,51 см/с, что в среднем в 6 раз меньше продолжительности обработки по сравнению с реагентной ванной.

### **5.2. Оценка эффективности восстановления проницаемости фильтра и прифилтровой зоны модельной скважины при циркуляционно-реагентной регенерации**

Процесс циркуляционно-реагентной регенерации скважины, фильтр которой разделен на сектора, осуществлялся на экспериментальной установке, представленной на рисунке 5.3 [105].

Для оценки эффективности процесса циркуляционной регенерации модель фильтра скважины и прифилтровая зона искусственно кольматировались цементированным железосодержащим осадком и цементом.

Далее, заполненный водой при температуре 16°C, фильтрационный лоток отстаивался сутки. После этого проводились гидравлические испытания скважины с целью определения основных гидродинамических параметров: производительности и понижения уровня.

Процесс растворения дегидратированных соединений железа осуществлялся при помощи дитионита натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) 10%-й концентрации с добавлением 1%-го триполифосфата натрия ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ).

Готовый раствор помещался в емкость для реагента 17, установленного выше статического уровня воды (рисунок 5.3). Температура предварительно отстаиваемой воды в резервуаре и в фильтрационном лотке 3 не превышала 16°C, что является необходимым условием применения дитионита натрия в качестве реагента [103].

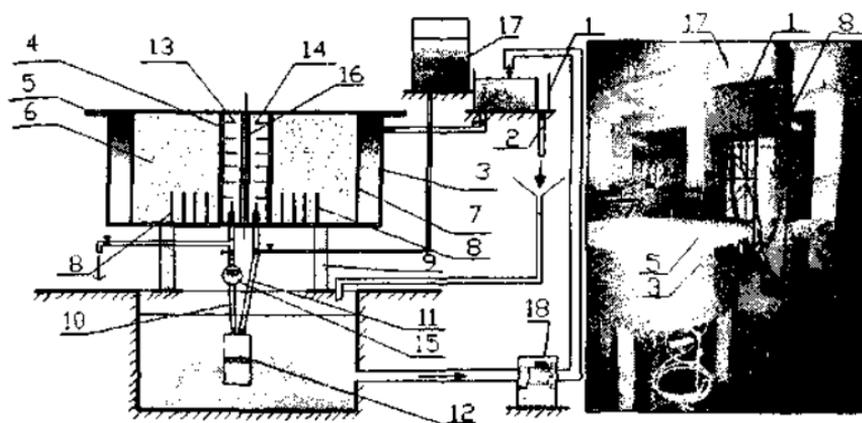


Рис. 5.3. Схема и общий вид экспериментальной установки:

1 – напорный бак; 2 – холостой слив; 3 – фильтрационный лоток;

4 – фильтр скважины; 5 – крышка фильтрационного лотка; 6 – водовмещающий грунт; 7 – кольцевой бьеф; 8 – пьезометры; 9 – стойка; 10 – нагнетательный трубопровод; 11 – отводящий трубопровод; 12 – насос «Ручеек-1»;

13 – нагнетательный сектор; 14 – всасывающий сектор; 15 – счетчик воды СХВ 15; 16 – разделительный вертикальный пакер; 17 – емкость для реагента;

18 – насос К160/20А

Первым этапом циркуляционной регенерации была подача реагента из емкости 17 по шлангу в фильтр и прифильтровую область скважины. Далее включали насос «Ручеек-1», и реагент циркулировал в прифильтровой зоне скважины. Время циркуляции определялось по кривой  $t = f(v)$  (рисунок 5.2) в зависимости от скорости движения реагента. Для случая, когда прифильтровая зона была в виде закольцованного кольца, скорость движения реагента определялась по формуле (4.22).

Процесс циркуляции длился 50 минут. После этого производили слив отработанных продуктов реакции до полного их удаления, и проводили гидравлические испытания с целью определения показателя обобщенного сопротивления и удельного дебита скважины при постоянном расходе.

Теоретически и экспериментально установлено, что наибольшая скорость движения жидкости в прифильтровой зоне достигается при числе секторов  $m = 1$ . Поэтому процесс циркуляционной

регенерации проводился при делении модели фильтра скважины на два сектора: одного нагнетательного и одного всасывающего.

Данные о степени регенерации фильтра скважины представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Данные эффективности циркуляционной регенерации

Условия кольматации модели скважины	Удельный дебит, $\text{см}^2/\text{с}$		Показатель обобщенного сопротивления $\xi$	
	$q_1$	$q_2$	до обработки	после обработки
1	2	3	4	5
Закольматированы фильтр скважины (отношение осадка и цемента: 1:0,5) и прифильтровая зона радиусом $r_c + 3,5 \text{ см}$ (отношение песка, осадка и цемента: 1:0,5:0,2); ( $q_0 = 11,1 \text{ см}^2/\text{с}$ ); $Q_{\text{н}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	4,9	8,9	9,12	4,49
Закольматирован только фильтр скважины (отношение осадка и цемента: 1:10); ( $q_0 = 11,1 \text{ см}^2/\text{с}$ ); $Q_{\text{н}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	7,0	9,33	6,65	3,55
Закольматирован только фильтр скважины (отношение осадка и цемента: 1:7)	6,8	8,13	12,65	10,93

$(q_0 = 11,1 \text{ см}^2/\text{с});$ $Q_v = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$				
Закольматирована только прифилтровая зона скважины радиусом $r_c + 10 \text{ см}$ (отношение песка, осадка и цемента: $1:0,5:0,2$ ); $(q_0 = 11,1 \text{ см}^2/\text{с}).$ Гидродинамический ре- жим – реагентная ванна. Продолжительность ре- генерации $t = 18 \text{ час}$	4,2	5,1	8,92	8,38

После проведения циркуляционной регенерации с закольматированной прифилтровой зоной на дне фильтра в обоих секторах присутствовал илистый осадок черного цвета высотой порядка 2 см. При кольматации только фильтра осадок был обнаружен в незначительных количествах. Наличие осадка на дне фильтра свидетельствует об эффективном удалении продуктов реакции кольманта и реагента из прифилтровой зоны.

Анализ данных таблицы 5.2 показывает, что удельный дебит через 50 мин после циркуляционной регенерации возрос в среднем в 1,5 раза и достиг в среднем 79% от первоначального. В режиме реагентной ванны за 18 часов регенерации удалось повысить удельный дебит в 1,2 раза, что составило 46% от первоначального [105].

Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения циркуляционно-реагентного способа очистки фильтров скважин от цементированного кольматирующего осадка с последующим его растворением и выносом за пределы скважины при существенном сокращении продолжительности регенерации.

## **Выводы по разделу 5.2**

1. При движении раствора дитионита натрия 10%-й концентрации с добавкой раствора триполифосфата натрия 1%-й концентрации в закольматированном грунте значительно увеличивается проницаемость (с 65 до 100%), а при возрастании скорости движения реагента от 0,31 до 1,51 см/с продолжительность выщелачивания сокращается от 50 до 10 мин, что в среднем в 6 раз меньше продолжительности обработки по сравнению с реагентной ванной. Установлена логарифмическая регрессионная зависимость продолжительности выщелачивания от скорости движения реагента следующего вида:  $\bar{t} = a \cdot \ln(\bar{v}) + b$ .

2. Установлено, что удельный дебит через 50 мин после циркуляционной регенерации возрос в среднем в 1,5 раза и достиг в среднем 79% от первоначального значения. В режиме реагентной ванны за 18 часов регенерации удалось повысить удельный дебит в 1,2 раза, что составило 46% от первоначального значения.

### **5.3. Обоснование технологических схем циркуляционно-реагентной регенерации**

Технология циркуляционно-реагентного способа регенерации скважин с применением СУЦР может осуществляться по следующим технологическим схемам:

- циркуляционно-реагентная регенерация по всей длине фильтра одновременно (рисунок 5.4, а);
- циркуляционно-реагентная поинтервальная регенерация фильтра скважины (рисунок 5.4б) [106–110];
- циркуляционно-реагентная регенерация фильтра скважины после проведения импульсной обработки.

Циркуляционно-реагентная регенерация по всей длине фильтра скважины одновременно (рисунок 5.4, а) осуществляется с помощью эрлифта, установленного на устье скважины. На водоподъемной колонне 8 эрлифта установлены горизонтальные пакеры 2, а также вертикальная перегородка 3, которая делит фильтр скважины по всей его длине на нагнетательные и всасывающие циркуляционные сектора. Отверстия в водоподъемной колонне

выполнены только со стороны всасывающего сектора, что дает возможность осуществлять движение реагента от всасывающего сектора через емкость 5 к нагнетательному сектору. Подача реагента в нагнетательный сектор из емкости для реагента 5 осуществляется самотеком либо принудительно по подводящей линии 4. Продолжительность регенерации может контролироваться датчиком электрического сопротивления реагента, установленного в емкости для реагента. Предложенная схема циркуляционно-реагентной регенерации (рисунок 5.4а) отличается технологической доступностью и простотой использования СУЦР.

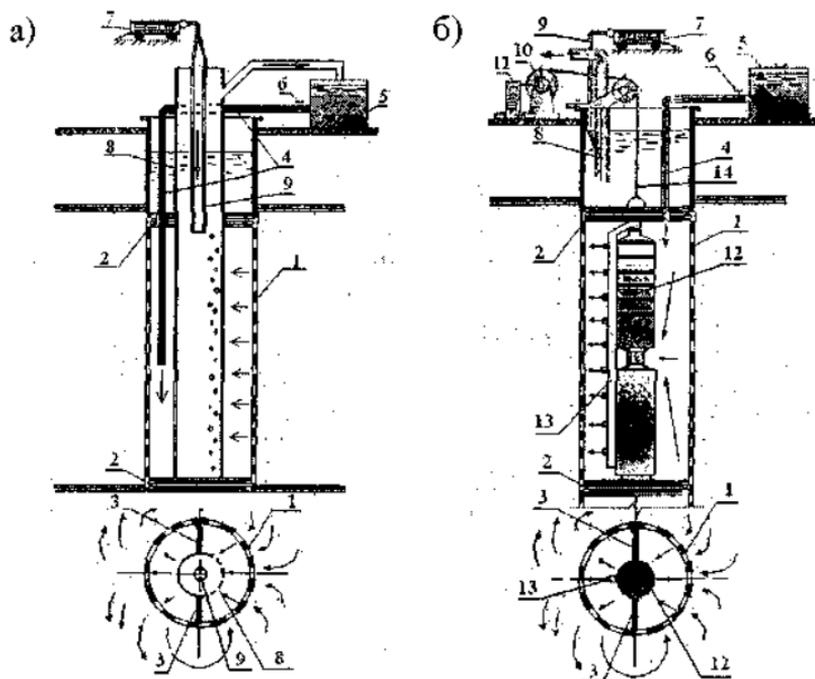


Рис. 5.4. Технологические схемы циркуляционно-реагентной регенерации скважины: а – регенерация по всей длине фильтра; б – поинтервальная регенерация фильтра; 1 – фильтр скважины; 2 – горизонтальные пакеры; 3 – вертикальная разделительная перегородка; 4 – подводящая линия; 5 – емкость для реагента; 6 – задвижка; 7 – компрессор; 8 – водоподъемная труба эрлифта; 9 – воздухопроводная труба эрлифта; 10 – лебедка; 11 – пульт управления; 12 – электронасосный агрегат; 13 – нагнетательный патрубков; 14 – кабель-трос

Поинтервальная регенерация (рисунок 5.4б) предполагает циркуляцию реагента непосредственно в прифильтровой зоне скважины с помощью электронасосного агрегата 12 [106].

Горизонтальные пакеры 2 и вертикальная перегородка 3 образуют нагнетательные и всасывающие сектора. Циркуляция реагента осуществляется работой электронасосного агрегата 12, который может быть выполнен на базе как серийно выпускаемого агрегата ЭЦВ, так и специально спроектированного.

Технологический процесс регенерации с помощью секторного устройства, выполненного на базе электронасосного агрегата (рисунок 5.4 б), заключается в следующем. При помощи лебедки 10 погружное устройство обработки скважин опускается на кабельтросе 14 до верхнего интервала закольматированного фильтра 1. Далее включается электронасосный агрегат 12 и с помощью подводящей линии 4 подается реагент в секторные циркуляционные камеры. Под действием напора, создаваемого электронасосным агрегатом 12, происходит максимальное проникновение реагента за контур закольматированного фильтра 1 и циркуляция потока реагента. Затем реагент поступает во всасывающий сектор и вовлекается в новый цикл регенерации. Необходимая концентрация реагента поддерживается дозированием либо непрерывной его подачей в процессе циркуляции через подводящую линию 4 при открытой задвижке 6.

Процесс повторяется в одном интервале до тех пор, пока не стабилизируется нагрузка на двигателе электронасосного агрегата 12, контролируемая показанием амперметра (не показан). Далее погружное устройство перемещают в следующий интервал закольматированного фильтра 1. После регенерации всего фильтра при помощи, например, компрессора 7, происходит удаление продуктов реакции реагента и кольматанта через водоподъемную трубу 8.

Проведение импульсной обработки перед циркуляционно-реагентной регенерацией способствует более эффективному восстановлению структуры, пористости и проницаемости прилегающих к фильтру пород и увеличению срока эксплуатации скважин. Под действием импульсных нагрузок водонепроницаемые структуры кольматанта разрушаются, создаются дополнительные трещины, увеличивается контакт реагента с цементирующими осад-

ками, реагент глубже проникает за контур фильтра, благодаря чему возрастает степень растворения когельматирующих соединений. В качестве импульсного способа обработки может применяться газодинамический способ восстановления дебита скважин с использованием ВКГС [111].

Технологическая схема регенерации фильтра скважины по всей его длине имеет определенные недостатки, связанные с неравномерной декогельматацией отложений в прифильтровой зоне. Из-за характера естественной когельматации [1,33] происходит циркуляция реагента по наиболее проницаемым участкам прифильтровой зоны. В результате циркуляционно-реагентной регенерации будет подвержена обработке реагента нижняя малокогельматированная и более проницаемые части прифильтровой зоны скважины.

Для равномерной очистки по всей длине фильтра и прифильтровой зоны скважины от цементированного когельматирующего осадка, образованного в результате длительной эксплуатации скважин без ремонтных мероприятий, целесообразно применять технологическую схему поинтервальной обработки с использованием компактного секторного устройства циркуляционной регенерации.

#### ***5.4. Выбор параметров технологии циркуляционно-реагентной регенерации***

Конструктивными параметрами секторного устройства циркуляционно-реагентной регенерации скважин являются количество нагнетательных и всасывающих секторов  $m$ , а также длина секторного устройства  $L_y$ .

С целью изучения характера распределения скорости в прифильтровой закогельматированной зоне в зависимости от количества секторов  $m$  было проанализировано уравнения (4.22). Установлено, что оптимальное количество секторов, при проведении циркуляционно-реагентной регенерации в случае симметричной схемы циркуляции равно двум: один нагнетательный и один всасывающий, т.е.  $m = 1$  [95].

Определение  $L_v$  ведется из условия обеспечения фильтрационной скорости на контуре закольматированной зоны, достаточной для интенсивного растворения кольматирующих отложений. При  $r < r_0$  скорость  $v(\theta, r)$  будет выше, чем на контуре закольматированной зоны, так как величина  $v(\theta, r)$  монотонно убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$ .

Перспективным является использование погружного скважинного электронасосного агрегата при циркуляционно-реагентной регенерации, который обеспечивает равенство расходов закачки и откачки. При увеличении проницаемости прифилтровой зоны напор насоса уменьшается, а расход увеличивается [45, 46], что повышает фильтрационные скорости на контуре закольматированной зоны.

В качестве погружных агрегатов можно использовать агрегаты ЭЦВ, выпускаемые ОАО «Завод Промбурвод» г. Минска. Выпускаемые агрегаты ЭЦВ и станции управления имеют широкую гамму типоразмеров, отличаются по применению в диаметрах обсадных колонн от 100 до 300 мм, по подаче от 1 до 160 м<sup>3</sup>/ч, по напору от 15 до 300 м [112, 113]. Рабочие ступени погружных насосов изготовлены из полимерных материалов, широко используемых в насосостроении, имеющих стабильность к водопоглощению и высокую износостойкость. Имеется возможность устанавливать двигатели к насосам различных фирм таких, как Franklin Electric (Германия) либо ПЭДВ или ДАПВ (Республика Беларусь). Вышеперечисленные характеристики двигателя и насоса соответствуют условиям при проведении реагентной регенерации фильтров скважин.

Ограничением при использовании погружных электронасосных агрегатов является условие недопущения кавитации во всасывающем секторе

$$h_1^{ac} \leq h_{cm} + h_v, \quad (5.6)$$

где  $h_1^{ac}$  — давление во всасывающем секторе;

$h_v$  — вакуумметрическая высота всасывания, определяемая в зависимости от давления насыщенных паров жидкости, скорости движения, гидравлических сопротивлений, учитывающих конструктивные особенности секторного устройства и т. д. [114, 115].

### 5.5. Методика определения длины секторного устройства циркуляционной регенерации на основе погружного электронасосного агрегата

Определение длины секторного устройства циркуляционной регенерации  $L_y$  на основе погружного электронасосного агрегата проводится в предположении, что потерями расхода в насосе можно пренебречь и распределение общего расхода насоса происходит равномерно по нагнетательным и всасывающим смежным секторам, т. е. [95]

$$Q_{св} = Q_{св} = Q_{ц} = \frac{Q_{ном}}{m \cdot \varphi}, \quad (5.7)$$

где  $Q_{ном}$  — номинальный расход насоса, соответствующий максимальному КПД агрегата;  $\varphi$  — коэффициент запаса, учитывающий утечки расхода через уплотнительные перегородки. В общем случае коэффициент  $\varphi$  будет зависеть от типа уплотнения (пакера), закольматированного фильтра скважины и его состояния, количества секторов, расхода и др.

Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Для заданного диаметра фильтра скважины подбирается погружной насос с определенной рабочей напорной характеристикой;

2. По формулам (4.22), (4.23) и (4.24) при заданном угле сектора  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ , которому соответствует максимальная скорость движения реагента  $v(\frac{\alpha}{2}, r_0)$  на контуре закольматированной зоны ра-

диусом  $r_0$ , определяется в первом приближении  $L_y'$ . Чтобы не уменьшать длину секторного устройства достаточно задать скорость в середине сектора. Нет необходимости задавать скорость на границе секторов на контуре закольматированной зоны, так как в процессе регенерации ( $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$ ) скорость  $v(\theta, r)$  при  $\theta = 0$  возрастает. Увеличение скорости на всей границе  $r_0$  также связано с изменением напорной характеристики насоса;

3. По формуле (4.20) при угле  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  и радиусе  $r = r_c$ , которому соответствует максимальное повышение напора в скважине, строится характеристика сектора скважины  $S = f(Q)$ . Здесь  $S$  — это повышение уровня при закачке ( $S > 0$ ), т. е.  $S = h_1 - h_{cm}$ .

Далее при помощи напорной характеристики насоса (графической либо аппроксимированной зависимостью  $H = f(Q)$ ) при  $L_y'$  определяются расход системы насос-скважина  $Q_p'$  и соответ-

$$\text{ствующий } Q_{ц}' = \frac{Q_p'}{\phi};$$

4. По формуле (4.20) определяется уточненное значение  $L_y''$  согласно  $Q_{ц}'$ ;

5. После 2-3-х приближений согласно пунктам 1 и 2 определяется окончательное значение  $L_y$ , соответствующее  $Q_{ц}$ .

Результатом очистки фильтра после циркуляционно-реагентной декольматации продолжительностью  $t$  является повышение проницаемости прифилтровой зоны  $\kappa_1$  и, как следствие, изменяется напорная характеристика насоса в сторону увеличения расхода и уменьшения напора насоса, что улучшает условия промывки фильтра и прифилтровой зоны скважины.

Основным технологическим параметром является продолжительность процесса циркуляционно-реагентной регенерации  $t$ .

Установленная в результате проведения лабораторных экспериментов логарифмическая регрессионная зависимость (5.5) может служить для ориентировочного определения продолжительности  $t$  процесса регенерации от скорости движения реагента в прифилтровой закольматированной зоне скважины.

Процесс циркуляционно-реагентной регенерации в полевых условиях также можно контролировать с помощью датчика электропроводности реагента или при помощи амперметра, фиксирующего нагрузку на электродвигателе. Регенерацию фильтра можно заканчивать при стабилизации значения электропроводности реагента, либо стабилизации нагрузки на двигатель электронасосного агрегата.

По вышеизложенной методике была определена длина СУЦР на базе электронасосного агрегата ЭЦВ 5-10-65, выпускаемого ОАО «Завод Промбурвод». Определение длины СУЦР проводилось при следующих исходных данных:  $Q_{\text{ном}} = 10 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ,  $\phi = 1,2$ ,  $Q_{\text{ц}} = 7,9 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ,  $r_c = 0,163 \text{ м}$ ,  $r_0 = 0,463 \text{ м}$ ,  $R = 500 \text{ м}$ ,  $m = 1$ ,  $\kappa_1 = 1 \text{ м/сут}$ ,  $\kappa_2 = 100 \text{ м/сут}$ ,  $v(\frac{\alpha}{2}, r_0) = 1 \text{ мм/с}$ . Длина

СУЦР определялась для скважин диаметром равным 325 мм (наиболее распространенный диаметр фильтров скважин на водозаборах УП «Минскводоканал»). В результате расчета при вышеперечисленных исходных данных окончательная длина СУЦР равна  $L_y = 1,1 \text{ м}$ . Однако для использования двигателя ПЭДВ или ДАПВ необходимо увеличить длину СУЦР до  $L_y = 1,3 \text{ м}$ . Увеличение длины СУЦР обусловлено обеспечением достаточного уровня охлаждения при использовании двигателя Franklin Electric (Германия), который изготавливается в герметичном исполнении.

Для принятой длины СУЦР равной  $L_y = 1,3 \text{ м}$  с помощью математического пакета Maple был построен график распределения скорости  $v(\theta, r)$  (при  $Q_{\text{ц}} = 7,9 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ,  $r_c = 0,163 \text{ м}$ ,  $r_0 = 0,463 \text{ м}$ ,  $R = 500 \text{ м}$ ,  $m = 1$ ,  $\kappa_1 = 1 \text{ м/сут}$ ,  $\kappa_2 = 100 \text{ м/сут}$ ) в прифилтровой закольматированной зоне в зависимости от радиуса  $r$  для

различных углов  $\theta$  в начальный момент циркуляционно-реагентной регенерации (рисунок 5.5).

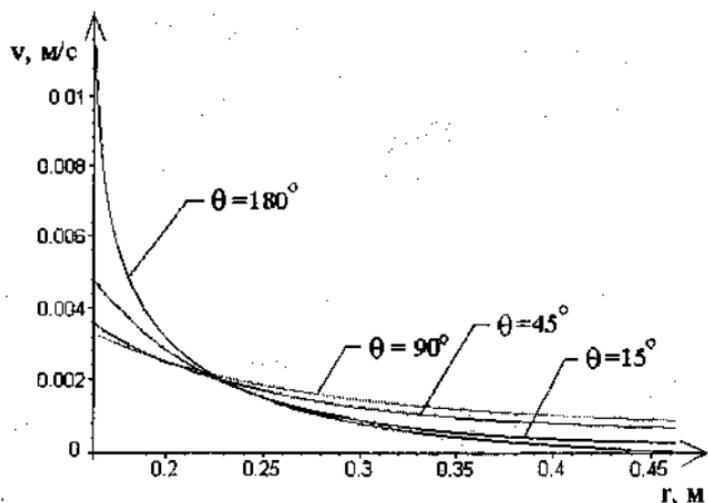


Рис. 5.5. График изменения скорости в прифилтровой закольматированной зоне скважины  $v(\theta, r) = f(r)$

График распределения скорости (рисунок 5.5) может служить для ориентировочного определения продолжительности процесса циркуляционной регенерации  $t$  согласно зависимости (5.5).

Согласно основным конструктивным параметрам ( $m=1$ ,  $L_y=1,3$  м) и конструкторской документации на ОАО «Завод Промбурвод» был изготовлен из коррозионно-стойких материалов опытный образец СУЦР на базе электронасосного агрегата ЭЦВ 5-10-65 с двигателем Franklin Electric мощностью 3 кВт (рисунок 5.6).

Опытный образец СУЦР был испытан в лаборатории ОАО «Завод Промбурвод» (Аттестат аккредитации № ВУ/112.02.2.0.0429 от 04.10.2004 г.) на герметичность с отработкой технологии циркуляционной регенерации. В лаборатории ОАО «Завод Промбурвод» также были проведены испытания электронасосного агрегата ЭЦВ 5-10-65 (протокол испытаний № 88 от 19.09.2007 г.) с построением энергетической и напорной характе-

ристики. Верхний и нижний горизонтальные пакеры 2 опытного образца СУЦР выполнены гидравлическими в резиновой оболочке с возможностью перекрытия перфорированного интервала фильтра скважины 4 во время регенерации (рисунок 5.7). Вертикальные пакеры выполнены с резиновой уплотняющей вставкой с возможностью их самоуплотнения к фильтру скважины в процессе циркуляции реагента. Гидравлическая связь между горизонтальными пакерами 2 обеспечивается посредством нагнетательного патрубка 1, который одновременно придает жесткость агрегату ЭЦВ 3 опытного образца СУЦР (рисунок 5.6). Конструкция горизонтальных и вертикальных пакеров обеспечивает герметизацию обрабатываемого интервала фильтра в процессе циркуляционно-реагентной регенерации СУЦР, что дает возможность реагенту проникать в прифильтровую закольматированную зону скважины.

а)



б)



Рис. 5.6. Опытный образец СУЦР:  
а – общий вид образца СУЦР;  
б – при испытаниях в лаборатории  
ОАО «Завод Промбурвод»

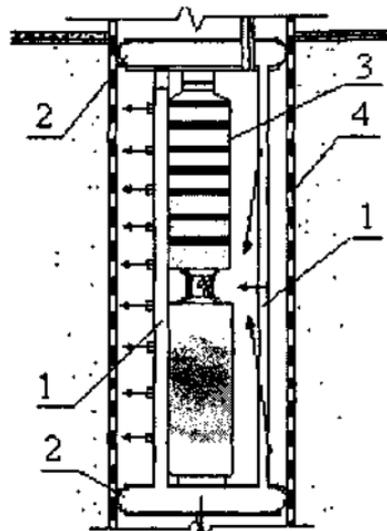


Рис. 5.7. Принципиальная схема СУЦР:  
 1 – нагнетательный патрубок; 2 – горизонтальный пакер; 3 – агрегат ЭЦВ; 4 – фильтр скважины

### 5.6. Результаты внедрения технологии циркуляционно-регентной регенерации

Опытно-промышленные испытания технологии циркуляционно-регентной регенерации проводились на скважине № 21<sup>б</sup> (46786/90) водозабора «Боровляны» УП «Минскводоканал». Скважина одноколонная, пробурена в 1990 году ударно-канатным способом станком УКС-22 спецтрестом «Промбурвод» ССМУ № 1 г. Заславль. Скважина имеет глубину 62 метра и диаметр 325 мм., оснащена проволочным фильтром диаметром 325 мм в интервале от 52 до 61 м. Первоначальный удельный дебит скважины составлял 65 м<sup>2</sup>/ч при статическом уровне 17 м и динамическом уровне 18 м. Дальнейшая эксплуатация скважины осуществлялась с насосом ЭЦВ 12-160-65.

Ремонтные работы на скважине не проводились до 2006 г. Скважина за этот период снизила свой удельный дебит до 8 м<sup>2</sup>/ч при производительности 40 м<sup>3</sup>/ч. В октябре 2006 г. была произведена электрогидроударная обработка скважины: в скважину опускался

кался разрядник, подключенный к высоковольтному трансформатору. Обработка проводилась в соответствии с технологическим регламентом ЭГ-обработки с последующей откачкой эрлифтом, чисткой ершом и промывкой гидродинамической машиной. В результате обработки скважины № 21<sup>в</sup> (46786/90) удалось повысить удельный дебит до 14,8 м<sup>2</sup>/ч при производительности 40 м<sup>3</sup>/ч. Проведенная ЭГ-обработка скважины только частично разрушила осадок за стенкой фильтра.

При выполнении опытно-восстановительных работ на скважине № 21<sup>в</sup> производилось измерение глубины скважины с просмотром ствола скважины с помощью телекамеры, откачка эрлифтом с целью определения дебита и понижения уровня, собственно циркуляционная обработка фильтра, прокачка эрлифтом и насосом с последующим замером удельного дебита. Телесъемкой установлено, что перед циркуляционной обработкой в рабочем состоянии находилось 7,5 м фильтра, остальная часть фильтра была занесена песком.

Проведенные гидравлические испытания скважины перед циркуляционно-реагентной регенерацией показали, что удельный дебит скважины составил до 8 м<sup>2</sup>/ч при производительности 40 м<sup>3</sup>/ч.

Для растворения кольматирующих соединений применялся 10%-ный раствор гидросульфита натрия с добавлением 1%-го раствора триполифосфата натрия. Процесс заливки реагента в обрабатываемый интервал фильтра скважины приведен на рисунке 5.8. Под действием напора, создаваемого электронасосным агрегатом, происходило максимальное проникновение реагента за контур закольматированного фильтра и циркуляция реагента. Необходимая концентрация реагента в зоне обработки поддерживалась дозированием свежей порции реагента в процессе циркуляции через подводящую линию. На одном интервале длиной 1,3 м процесс регенерации длился 60 мин. Далее погружное секторное устройство перемещали в следующий интервал закольматированного фильтра. После регенерации всего фильтра при помощи компрессора проводилось удаление продуктов реакции и шлама.



Рис. 5.8. Процесс заливки реагента в скважину

В результате проведенных опытно-промышленных испытаний технологин циркуляционно-реагентной регенерации удалось повысить удельный дебит скважины с 8 до 25 м<sup>3</sup>/ч при производительности 40 м<sup>3</sup>/ч.

Экономический эффект от внедрения технологии циркуляционно-реагентной регенерации составил Br24,226 млн по состоянию на 01.11.2007 г.

### *Выводы по главе 5*

1. Разработана технология циркуляционно-реагентной регенерации фильтров скважин на воду с применением СУЦР, обеспечивающая равномерную очистку от цементированного кольтатирующего осадка фильтра и прифильтровой зоны скважин, эксплуатировавшихся длительное время без ремонтных мероприятий с минимальным воздействием на окружающую среду.

2. Предложена методика определения длины СУЦР на основе погружного электронасосного агрегата. Согласно основным конструктивным параметрам ( $m = 1$ ,  $L_y = 1,3 м$ ) и конструкторской документации на ОАО «Завод Промбурвод» был изготовлен из коррозионно-стойких материалов опытный образец СУЦР на базе электронасосного агрегата ЭЦВ 5-10-65 с электродвигателем Franklin Electric мощностью 3 кВт. Опытный образец СУЦР был испытан на работоспособность в лаборатории ОАО «Завод Промбурвод».

3. В результате проведенных опытно-промышленных испытаний технологии циркуляционно-реагентной регенерации с применением СУЦР на скважине № 21<sup>в</sup> водозабора «Боровляны» удалось повысить удельный дебит скважины с 8 м<sup>2</sup>/ч до 25 м<sup>2</sup>/ч при производительности 40 м<sup>3</sup>/ч. Экономический эффект от внедрения технологии циркуляционно-реагентной регенерации составил 6г24,226 млн по состоянию на 01.11.2007 г.

## **Глава 6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И ТЕХНОЛОГИИ СООРУЖЕНИЯ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН**

Принятая в эксплуатацию водозаборная скважина в процессе своей работы должна поддерживаться в исправном состоянии хозяйством-водопользователем. Забор воды должен осуществляться в количестве, не превышающем паспортный дебит скважины и в соответствии с разрешением на специальное водопользование.

Система технического обслуживания и ремонта скважин включает в себя следующие основные виды работ: техническое обслуживание, текущий ремонт, капитальный ремонт [116–117].

В состав работ по техническому обслуживанию входят замеры дебита, статического и динамического уровней, определение удельного дебита, определение качества воды и наличия песка в пробах, определение исправности герметизирующего оголовка. Периодичность технического обслуживания – не реже одного раза в месяц.

При ухудшении работы скважины и качества добываемой воды необходимо проведение детального гидрогеологического обследования скважины, на основе которого определяют причины этого положения и разрабатывают мероприятия по ее ремонту.

Текущий ремонт скважины предусматривает профилактический плановый ремонт фильтров скважин, на основе выявленных в процессе эксплуатации неисправностей или непредвиденный ремонт, выполняемый в срочном порядке. В состав работ текущего ремонта входит механическая очистка поверхности фильтра, гидроимпульсная и реагентная обработка фильтров, очистка водоприемной части от песчаной пробки.

Капитальный ремонт скважин предусматривает замену фильтров, перевод скважин на эксплуатацию нижележащего (углубление) и вышележащего водоносных горизонтов, чистку ствола от посторонних предметов, переоборудование фильтровой скважины в бесфильтровую.

Основной задачей технического обслуживания и ремонта является повышение эксплуатационной надежности и увеличение сроков службы скважин.

Надежность скважин характеризуется безотказностью, ремонтопригодностью и долговечностью.

Надежность водозаборной скважины зависит в основном от эксплуатационной надежности фильтра. Поэтому разработка новых конструкций скважин с ремонтпригодными фильтрами для выполнения текущих и капитальных ремонтов является актуальной задачей.

### *6.1. Новая конструкция скважины с высокой степенью ремонтпригодности*

Как известно, конструкции эксплуатационных скважин на воду должны удовлетворять следующим основным требованиям: высококачественное вскрытие продуктивных водоносных горизонтов и тщательная изоляция их друг от друга, длительный срок эксплуатации и минимальный темп снижения производительности, возможность выполнения восстановительных ремонтных работ.

Для обеспечения ремонтпригодности скважин при выходе фильтра из строя рекомендуется его устанавливать «впотай». Извлечение фильтра при капитальном ремонте скважины 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 на практике извлечь фильтр удастся только в самых редких случаях из-за больших сил сцепления фильтра с породой и разрыва секций фильтра по сварным швам. Поэтому чаще всего капремонт скважины сводится к установке нового фильтра меньшего диаметра вовнутрь вышедшего из строя и обсыпкой межфильтрового пространства. Скважина после капремонта теряет дебит, быстро кольматируется, становится практически непригодной для текущих ремонтов и служит недолго.

Опыт эксплуатации скважин с фильтром «впотай» показал, что они часто пескуют через сальник, который разрушается вследствие роста перепада давления на нем при кольматации фильтра и увеличения понижения в скважине. Поэтому такие скважины ненадежны.

В БНТУ разработана новая конструкция скважины [118], обладающая существенными преимуществами как в части возможности проведения текущих ремонтов, так и замены фильтра в случае

выхода его из строя. В скважине отсутствует такой элемент как сальник.

Конструкция предлагаемой скважины представлена на рисунке 6.1.

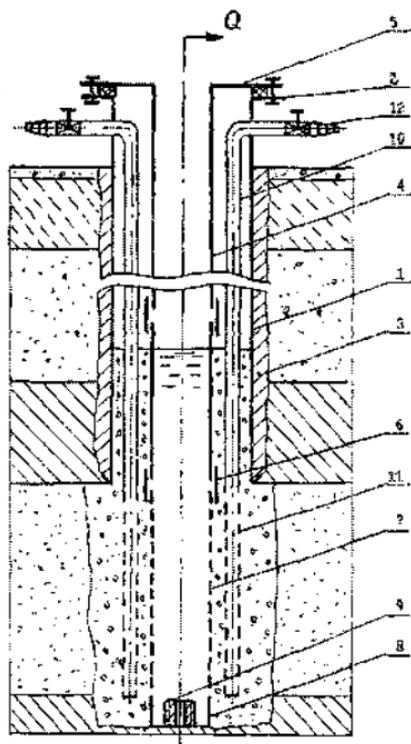


Рис. 6.1. Новая конструкция водозаборной скважины при роторном бурении

Скважина состоит из кондуктора 1 с фланцем 2 и затрубной цементацией 3, эксплуатационной колонны 4 с фланцем 5 и муфтовыми соединениями 6, внутренней фильтровой колонны 7 с отстойником 8 и резьбовой муфтой 9, нагнетательных труб 10 с перфорацией 11 и вентилями 12 на входе.

Скважина может быть пробурена роторным способом следующим образом. Ствол необходимого диаметра под посадку кондуктора 1 бурится практически до кровли эксплуатационного водоносного горизонта. Затрубная цементация кондуктора производится на всю его высоту. Устье кондуктора оснащают фланцем 5.

дится на всю его высоту. Устье кондуктора оснащают фланцем 5. Вскрытие водоносного горизонта производится чистой водой с использованием расширителя, которым можно расширить ствол до 900-1000мм. В открытый ствол опускают последовательно отстойник 8, фильтр 7 и эксплуатационную колонну 4, соединяя их на муфтах 6. Затем по обе стороны от колонны устанавливают две нагнетательные трубы 10 с перфорацией 11 в нижней части и вентилями 12 в верхней. Фильтр обсыпают гравием до тех пор, пока смесь не поднимется на 5-6м выше башмака кондуктора. После производства строительной откачки и дезинфекции скважины к устью эксплуатационной колонны приваривают фланец 5 и, установив резиновую прокладку между фланцами 2 и 5, затягивают болты, обеспечив герметизацию пространства между эксплуатационной колонной и кондуктором.

При выполнении текущих ремонтов в нагнетательные трубы может подаваться реагент, растворяющий отложения в порах гравийной обсыпки. Симметричное расположение труб позволяет осуществлять циркуляцию реагента в обсыпке при одновременной работе эрлифта, смонтированного в фильтровой колонне. Для подавления железо- и сульфатобактерий, продукты жизнедеятельности которых также накапливаются в порах гравийной обсыпки, в нагнетательные трубы можно закачивать раствор гипохлорита натрия и также производить циркуляцию.

При снижении эффективности текущих ремонтов, принимается решение о замене фильтра и гравийной обсыпки. Для этого проводят импульсную обработку фильтра и затем через трубы 10 в гравийную обсыпку нагнетают реагент, который растворяет цемент обрастания на контакте гравийной обсыпки и водоприемной поверхности фильтра и уменьшает силу сцепления при подъеме фильтра. В ствол опускают колонну бурильных труб, заводят ее в отстойник. Вращая влево, соединяют колонну с левой резьбой муфты 9 и домкратами с одновременной вибрацией извлекают из скважины эксплуатационную колонну с фильтром и отстойником. Затем в кондуктор на забой опускают породоразрушающий инструмент с расширителем и, разбурив, удаляют старую обсыпку. Произведя замену фильтра, опускают его вместе с отстойником на извлеченных из скважины обсадных трубах и обсыпают новой гравийной обсыпкой.

В новой конструкции скважины отсутствует ненадежное сальниковое уплотнение. Неизвлекаемый кондуктор с затрубной цементацией обеспечивает изоляцию от проникновения загрязнений. Положительно решается вопрос повторного использования обсадных труб. Обрыв обсадных труб и фильтра исключен, так как эксплуатационная колонна находится на контакте с породой только в нижней части и при подъеме колонны с фильтром на буровых трубах, закрепленных в отстойнике, колонна работает на сжатие.

Предлагаемая конструкция скважины может найти применение при добыче подземных вод из межморенных четвертичных водоносных комплексов, широко распространенных на территории Республики Беларусь. Так только в г. Минске на балансе УП «Минскводоканал» находится более четырехсот водозаборных скважин, пробуренных на днепровско-сожский водоносный комплекс. В подошве и кровле залегают моренные образования соответственно днепровского и сожского оледенений. Глубины скважин не превышают 90 м. Средний срок эксплуатации скважин с высокими удельными дебитами 8–12 лет. За пределами этого срока эксплуатация скважины экономически нецелесообразна, так как снижается удельный дебит, возрастает себестоимость добываемой воды, и применяемые меры по регенерации фильтров скважины становятся неэффективными. Последний фактор объясняется цементацией кольматирующих отложений и трудностью их извлечения из прифильтровой зоны. Возникает альтернатива, или эксплуатировать скважину с высокими удельными затратами, или перебурить ее. Стоимость бурения 1 м.п. скважины составляет более 500 долларов США. В суммарном долларовом эквиваленте перебуривание скважины глубиной 90 м и тампонажом старой скважины составляет порядка 45 тысяч долларов. Если реализовать на практике предлагаемую конструкцию, можно сэкономить порядка  $\frac{3}{4}$  указанной суммы на одной скважине.

## *6.2. Опыт бурения скважин с обратной промывкой в сложных гидрогеологических условиях*

Наиболее эффективными принято считать такие способы бурения, которые осуществляют вскрытие водоносных горизонтов

чистой водой, т.е. обеспечивают минимальную кольматацию пласта и эффективную его декольматацию при освоении скважины. Большое значение имеет также оперативность выполнения буровых работ.

Этим требованиям отвечает роторный способ бурения с обратной промывкой чистой водой, который характеризуется высокими скоростями проходки скважин в мягких и рыхлых породах (в 10-15 раз больше, чем у роторного способа с прямой промывкой), высоким качеством вскрытия пласта и возможностью бурения скважин большим диаметром (до 1,5 м) в породах с включением гравия и гальки, что обеспечивает стабильно высокие дебиты [18,119].

К преимуществам бурения с обратной промывкой относится также высокая информативность метода, которая позволяет определять с точностью до 1 м положение водоносных горизонтов.

Использование в качестве промывочной жидкости воды позволяет исключить глинизацию водоносных горизонтов и увеличить механическую скорость бурения в связи с улучшением условий удаления шлама. Высокая точность определения залегания водоносных горизонтов обусловлена высокой скоростью подъема шлама с забоя. Точность несколько ухудшается при бурении глубоких скважин. Бурение скважины долотом большого диаметра позволяет создать вокруг фильтра значительный контур гравийной обсыпки и таким образом улучшить приток воды к фильтру.

К недостаткам метода относится невозможность бурения при уровне подземных вод менее 3-х метров от поверхности, что связано с необходимостью поддержания в стволе скважины избыточного давления во избежание обрушения стенок скважины. При значительном водопоглощении требуются большие расходы воды.

Вышесказанное позволяет рассматривать этот способ бурения как наиболее приемлемый для сооружения высокодебитных скважин, стабильно работающих в течение длительного времени.

При непосредственном участии авторов, на водозаборе г. Толочин Витебской области было пробурено роторным способом с обратной промывкой 3 глубокие водозаборные скважины (2 рабочие и 1 резервная), а также 8 локальных скважин для водоснабжения населенных пунктов и предприятий Толочинского района.

Согласно схемы гидрогеологического районирования, место строительства располагается на стыке Белорусско-Литовского артезианского свода и Московского артезианского бассейна. Мощность зоны пресных вод составляет порядка 300 м. В пределах рассматриваемой территории для целей хозяйственного водоснабжения используются 2 водоносных комплекса: днепровско-сожский (*f/lglld-sz*) а также, старооскольский и ланский терригенный комплекс (*D<sub>st+ln</sub>*) среднего девона. Первый комплекс эксплуатируется отдельными скважинами и непригоден для централизованного водоснабжения из-за низкой водообильности и литологической неоднородности. Второй комплекс обладает высокой водообильностью и принят в качестве основного источника водоснабжения г. Толочин.

Особенностью старооскольского водоносного комплекса является залегание его кровли на глубинах от 100 до 176 м и то, что водовмещающие породы представлены тонко и мелкозернистыми кварцевыми песками и песчаниками с прослоями пестроцветных глин и алевролитов.

На основании ранее выполненных в районе г. Толочин разведочных гидрогеологических работ ТКЗ УГ БССР на детально разведанном участке Катужино были утверждены эксплуатационные запасы подземных вод в количестве 17,5 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Из-за значительных материальных затрат расположение водозабора на разведанном участке стало невозможным и проектируемый водозабор расположили ближе к городу в 1 км южнее д. Катужино. Производительность каждой запроектированной скважины была принята 62,5м<sup>3</sup>/час (1500 м<sup>3</sup>/сут).

Согласно проекту до глубины 160 м проходка скважин предусматривалась трехшарошечным долотом *D394* мм с последующим креплением ствола обсадными трубами *D325* мм в интервале 0,0–160,0 м и цементацией затрубного пространства. Дальнейшая проходка скважин до проектной глубины 190 м должна была завершаться установкой проволочных фильтров *D168* мм с гравийной обсыпкой.

Данный проект был пересмотрен, так как в условиях бурения на тонко- и мелкозернистые маломощные пески среднего девона, залегающие на глубинах от 100 до 200 м в условиях переслаивания их аргиллитоподобными глинами, возникал ряд сложностей.

При бурении долотом  $D295$  мм посадка длинного фильтра в неустойчивых плавунных песках связана с трудностью его точной установки по оси скважины и обеспечения качественной гравийной обсыпки с одинаковой толщиной вдоль всей фильтровой колонны. В этих условиях очень высока вероятность зависания гравийной обсыпки, замещения ее песком водовмещающих пород и пескования скважины.

При интенсивной строительной откачке из-за малой толщины слоя обсыпки (менее 60 мм) и высоких входных скоростях подземного потока на ее внешнем контуре неизбежен прорыв песка через некачественную на большой глубине гравийную обсыпку и выход скважины из строя.

Проект был пересогласован на бурение методом обратной промывки чистой водой трехшарошечным долотом  $D490$  мм с обеспечением контура гравийной обсыпки толщиной 160 мм. Увеличение диаметра долота свыше указанного значения нецелесообразно, так как приводит к удорожанию скважины при незначительном улучшении ее гидравлических характеристик.

Для бурения использовался модернизированный буровой агрегат 1БА15В, смонтированный на шасси МАЗ-5337. Агрегат был оснащен эрлифтным пульпоподъемом, укороченной мачтой высотой 14 м (для работы без растяжек в стесненных условиях), специальной ведущей штангой и вертлюгом под обратную промывку. Буровой насос был демонтирован и на его место установлена вспомогательная лебедка. Буровой агрегат включал в себя буровой блок, рабочую площадку, компрессорный блок, прицеп для бурильных труб, комплект навесного оборудования (вертлюг, рабочую трубу...) и комплект инструмента. При бурении применялся компрессорный блок ПВ-10/8. Рекомендуемая глубина бурения агрегата-150-200 м, диаметр бурения-500-1200 мм. Для уменьшения веса инструмента при бурении глубоких скважин применялся легкосплавной бурильный инструмент: облегченные трубы ЛБТ-147х9000 из алюминийево-магниевого сплава. Для увеличения удельного давления породоразрушающего инструмента на забой и калибровки ствола трехшарошечное долото  $D490$  мм снабжалось центратором диаметром  $D426$  мм, длиной 6 м, массой 2 т. Для эффективного удаления пульпы с забоя в трехшарошеч-

На всех скважинах производились каротажные работы для уточнения геологического разреза и выделения в нем водоносных пород. Кроме 2-х основных методов геофизических исследований: сопротивлений (КС) и собственной поляризации (ПС), применялись гаммокартаж (ГК), кавернометрия и механический картаж. Механический картаж предусматривал наблюдения за скоростью углубки скважины во время бурения и позволил уточнить ее разрез. Определялась продолжительность бурения 1 м скважины по времени углубки ведущей трубы квадратного сечения, размеченной на метровые интервалы. Строились кривые изменения продолжительности углубки (кривые механического каротажа), которые совмещались с кривыми геофизических исследований.

В качестве промывочной жидкости применялась вода. Однако при вскрытии водоносного горизонта, который представлял собой тонко и мелкозернистые пески и песчаники с прослоями пестроцветных глин и алевролитов, происходило обогащение раствора глинистыми частицами и последующая кольтматация песка. Несмотря на замену раствора в отстойнике на чистую воду на скважине №2, не удалось избежать кольтматации водовмещающих пород, и поэтому для ее освоения использовалась газодинамическая установка. При бурении скважины № 3 в технологию бурения были внесены следующие коррективы: чистая вода подавалась не в отстойник, где могло происходить ее загрязнение глинистыми частицами, а непосредственно в ствол скважины. Необходимое количество воды непрерывно подавалось из сборного водовода водозабора, подключенного к скважинам № 1 и № 2. Это положительно повлияло на качество вскрытия пласта и позволило получить на скважине № 3 более высокий удельный дебит —  $3,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Подбор состава обсыпки производился следующим образом. Строили кривую гранулометрического состава водовмещающих пород и по ней определяли значение диаметра частиц  $d_{50}$ , меньше которого в породе находится 50% частиц. Затем производился подбор механического состава обсыпки в соответствии с требуемым соотношением  $D_{50} / d_{50} = 8-12$  ( $D_{50}$  — диаметр частиц обсыпки, меньше которого содержится 50% частиц) [120]. Так как водовмещающие породы были представлены тонко и мелкозерни-

зернистыми песками, то в качестве обсыпки применялся промытый крупнозернистый песок без известковых включений, примесей пыли и глины. Подбор песчаной обсыпки с расчетным значением  $D_{50}$  производился после анализа гранулометрического состава песков ряда месторождений.

В таблице 6.1 представлены результаты определения гранулометрического состава песков высшего качества месторождений, принадлежащих ОАО «Нерудпром» (г. Минск).

Таблица 6.1. Гранулометрический состав песков

Диаметр частиц каждой фракции, мм	Месторождение «Векшичи» ДСЗ «Заславль» (31.10.03)		Месторождение «Веснянка» ДСЗ «Крапушино» (28.08.03)		Месторождение «Ваньковщина» ДСЗ «Волма» (20.05.03)	
	Содержание каждой фракции в породе, %	Содержание фракций по совокупности, начиная с самой мелкой, %	Содержание каждой фракции в породе, %	Содержание фракций по совокупности, начиная с самой мелкой, %	Содержание каждой фракции в породе, %	Содержание фракций по совокупности, начиная с самой мелкой, %
5-2,5	5	100	7,5	100	16	100
2,5-1,25	18	95	10	92,5	11,5	84
1,25-0,63	17	77	24	82,5	32,5	72,5
0,63-0,315	41,5	60	42	58,5	21	40
0,315-0,16	16,5	18,5	15,5	16,5	18	19
<0,16	2	2	1,0	1,0	1	1

Для песчаных обсыпок строились интегральные кривые granulометрического состава, по которым определялись значения действующего диаметра частиц-  $D_{10}$ , контролирующего диаметра-  $D_{60}$  и среднего диаметра  $D_{50}$  и вычислялись значения коэффициента неоднородности  $K_n = D_{60} / D_{10}$ . Характеристики песчаных обсыпок представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Расчетные характеристики песчаных обсыпок

Материал обсыпки	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{60}$	$K_n$
ДСЗ «Заславль»	0,22	0,55	0,62	2,8
ДСЗ «Крапушино»	0,24	0,54	0,66	2,75
ДСЗ «Волма»	0,22	0,78	0,96	4,4

Песок ДСЗ «Волма», несмотря на более высокое содержание фракции (1,25–0,63)мм, обладает более высокой неоднородностью состава ( $k_n = 4,4$ ) и поэтому при гравитационном способе его засыпки на забой возможно расслоение его частиц и пескование скважины. Песчаные обсыпки ДСЗ «Заславль» и «Крапушино» имеют более однородный состав с коэффициентом неоднородности ( $k_n=2,8$ ). Следует отметить, что в зимний период песок перечисленных месторождений не промывают, что делает его непригодным для использования в качестве фильтрационной загрузки скважинных фильтров. Необходимо также учитывать некоторые колебания во времени фракционного состава песков, вызванного неоднородностью его залегания в карьере.

В настоящее время на узле промывки песка и гравия на ДСЗ «Крапушино» начато производство фракционированных песков фракции 1–1,8 мм, соответствующих ТУ РБ 100016844.241-2001 «Песок кварцевый фильтрующий» со следующими характеристиками:

- минимальный размер основной фракции, мм 1,0;
- максимальный размер основной фракции, мм 1,8;
- содержание основной фракции, %, не менее 90;

- коэффициент неоднородности	1,45-1,65;
- пористость, %	38-44;
- содержание глинистых частиц, % не более	0,5;
- объемная масса, кг /м <sup>3</sup> не более	1577.

Фракционированный песок поставляется заказчику в мягких контейнерах весом 1т. К недостаткам этого песка следует отнести несоответствие требованиям ТУ по химической стойкости при использовании в условиях кислой среды. В экспериментах с соляной кислотой из-за наличия в песке карбоната кальция, прирост плотного осадка превышал требования ТУ более чем в 10 раз. Этот неблагоприятный фактор следует учитывать при декольматации скважин реагентными методами с применением соляной кислоты.

В частности исследование минералогического состава песков ДСЗ « Крапушино» показало, что с уменьшением размера фракций песка происходит его обогащение кварцевыми частицами и повышение химической стойкости.

В качестве песчаной обсыпки на пробуренных скважинах применялись пески высшего качества ДСЗ « Крапушино» и « Заславль». Это позволило выполнить качественную, практически без расслоения гравийную обсыпку. Объем обсыпки, например, на скважине №3 водозабора составил 10м<sup>3</sup>, что позволило перекрыть весь водоносный горизонт мощностью 50 метров и дренировать все прослойки малой мощности. Это также предопределило получение здесь более высокого удельного дебита, чем на 2-х предыдущих скважинах. Для создания равномерной по толщине обсыпки фильтровая колонна с отстойником при спуске в незакрепленную скважину снабжалась центраторами (фонарями) в виде продольных стальных полос. Обсыпка фильтров осуществлялась вручную одновременно со всех сторон в непрерывном режиме для предотвращения ее расслоения.

Принимались меры по исключению гидравлической связи между ниже- и вышерасположенными водоносными горизонтами, которая могла возникнуть из-за различного положения статических уровней в среднедевонских песках (11м) и в песках четвертичных отложений (5м). При смешении вод различного химического состава возможно образование нерастворимых отложений в

гравийной обсыпке и на фильтре, т.е. интенсификация кольматационных процессов.

Для предотвращения этих явлений и необходимости изоляции, вышележающих неэксплуатирующихся водоносных горизонтов, устанавливались промежуточные колонны с затрубной цементацией, доходящие до водоупоров и устраивались цементные мосты с помощью цементационного агрегата в толще днепровской морены.

Работы на скважинах водозабора подтвердили необходимость постоянного гидрогеологического контроля за процессом бурения скважины, каротажными работами, посадкой фильтров, количеством и качеством обсыпки, сдачей скважины в эксплуатацию.

Проведение каротажных исследований скважины с отбором проб породы при бурении обратной промывкой и механическим каротажом позволяет получить достоверную информацию о геологическом разрезе. По мнению авторов, в некоторых случаях для экономии средств, предусмотренных для бурения разведочного ствола, при бурении обратной промывкой чистой водой можно производить каротажные исследования непосредственно в открытом стволе конечного диаметра. Это возможно при бурении на достаточно изученных участках водозаборов с площадной формой распространения водоносных горизонтов. На рисунке 6.2 представлен геолого-гидрогеологический разрез по скважинам водозабора г. Толочина.

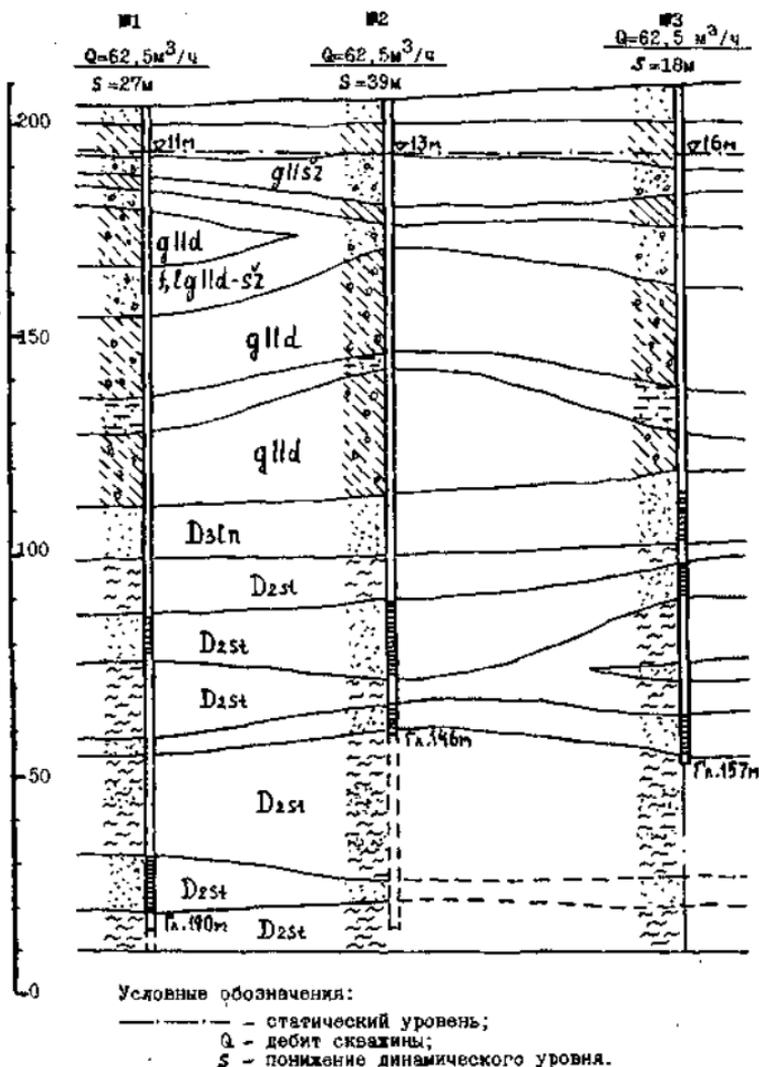


Рис. 6.2. Геолого-гидрогеологический разрез по линии скважин №1-3 водозабора г. Толочина

Результаты каротажных исследований, проведенных в открытом стволе диаметром D490мм скважины №3, хорошо согласовались с данными бурового журнала этой скважины и каротажными исследованиями опорных скважин № 1 и 2 и послужили основой

для определения интервалов посадки фильтров. Причем по разрезу видно, что из-за недостаточной мощности прослоек песка, не удалось поместить всю проектную длину фильтров в одном интервале.

В скважинах были запроектированы проволочные фильтры  $D168\text{мм}$  для обеспечения максимально-возможного контура гравийной обсыпки. Однако в условиях бурения методом обратной промывки с конечным диаметром  $D490\text{мм}$  в описанных гидрогеологических условиях наиболее оптимальным следует считать фильтр  $D219\text{ мм}$  по следующим причинам. Хотя его применение незначительно уменьшает толщину слоя гравийной обсыпки (все-го на  $25\text{мм}$ ), он обладает лучшей ремонтнопригодностью по возможности установки внутрь ремонтного фильтра в случае пескования основного, и более удобен для применения здесь импульсных методов регенерации и прокачки скважины эрлифтом с монтажом его до самого отстойника.

Применение фильтра большего диаметра очевидно. Для создания водоприемной поверхности фильтров  $D168\text{мм}$  и  $D219\text{мм}$  используется нержавеющая проволока диаметром  $2\text{мм}$ , которая при импульсной регенерации фильтра при прочих равных условиях лучше работает на растяжение в фильтре большего диаметра. По исследованиям [69], для обеспечения того же растягивающего усилия  $Np$  в фильтре меньшего радиуса  $r_1$  необходимо создать давление  $p_1$  большее, чем  $p_2$  в фильтре большего радиуса  $r_2$ , т.е.  $p_1 = p_2 r_2 / r_1$ . Отсюда следует заключить, что кольматирующие отложения, цементирующие проволочную обмотку, при прочих равных условиях легче разрушаются на фильтрах большего диаметра. Кроме этого, эти фильтры обладают меньшими входными скоростями, большей грязеемкостью и должны, поэтому иметь более длительный срок стабильной работы. В пользу установки фильтров большего диаметра указывает анализ формулы Дюпюна для дебита скважины [121].

В дальнейшем при проектировании и сооружении скважин были внесены поправки в их конструкцию и технологию буровых работ.

Данные о запроектированных и пробуренных скважинах методом обратной промывки в г. Толочине и районе при непосредственном участии авторов представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3. Результаты бурения скважин роторным способом с обратной промывкой чистой водой в г. Толочине и районе

№	Время и место сооружения скважины	Диаметр фильтра (мм) / интервал установки, м	Глубина (м) / диаметр долота (мм)	Н <sub>ст.</sub> , м	Н <sub>дин.</sub> , м	S, м	Q, м <sup>3</sup> /ч	q, м <sup>2</sup> /ч
1	04.98, г. Толочин (скв. №1 водозабора)	D168/(121-125,5; 173,5-187)	190/490	11	38	27	62,5	2,3
2	06.01, г. Толочин (скв. №2 водозабора)	D168/(107-134; 141-144)	146/490	13	52	39	62,5	1,6
3	10.03, г. Толочин (скв. №3 водозабора)	D168/(95-107; 111-118; 148-154)	157/490	16	34	18	62,5	3,5
4	12.98, д. Словени (возле башни)	D168/(120-128; 131-135,5)	137,5/490	16,5	31,5	15	40	2,7
5	05.98, д. Словени (школа)	D219/(126,5-140)	142/490	9,5	22,6	13,1	25	1,9
6	07.99 д. Озерцы (консервный завод)	D219/(165,3-171,3; 173,5-182,5)	184/490	5	19,4	14,4	60	4,2
7	10.99 д. Голошево	D219/(136-146)	148,5/490	14	31,1	17,1	48	2,8
8	11.99, д. Высокий Городец	D219/(89,5-101,5)	103,5/490	14	43	29	32	1,1
9	11.99, д. Заднево	D219/(60-66; 72-78)	80/490	5	10	5	50	10

10	16.01, г.Толочин (у озера)	D219/ (32- 40)	42/490	2,5	5,5	3	29	9,7
11	7.03, г.Толочин (райсель- хозтехни- ка)	D168/ (140-155)	157/490	17,5	30	12,5	28	2,2

В процессе бурения скважин №2 водозабора г. Толочина и в д. Высокнй Городец произошла кольматация водоносных горизонтов глинистыми частицами. Для разглинизации применяли газомпульсную регенерацию, совмещенную с эрлнфтной прокачкой, которая позволила увеличить удельный дебит скважин и довести его соответственно до 1,6 и 1,1 м<sup>2</sup>/ч. Следует отметить, что даже интенсивные работы по декольматации не обеспечивают достижения среднего удельного дебита, полученного для незакольматированных скважин, пробуренных в старооскольских песках среднего девона, который составил для 9 скважин:  $q_{\text{ср}} = 2,8 \text{ м}^2/\text{ч}$ . Средний удельный дебит 2-х скважин, пробуренных на четвертичные отложения в д. Заднево и г. Толочине (у озера), составил 9,8 м<sup>2</sup>/ч.

### **Выводы по главе 6**

Разработана конструкция извлекаемой скважины с повышенной ремонтпригодностью фильтра при проведении реагентных обработок и с возможностью его замены на новый при исчерпании ресурса работы.

Совместное применение электрокаротажа, механического каротажа и отбор образцов пород при роторном бурении скважин на воду обратной промывкой обеспечивает получение достоверной информации по всему разрезу, что позволяет в некоторых случаях отказаться от бурения разведочного ствола малого диаметра и проводить комплекс геофизических исследований в стволе конечного диаметра, что может сэкономить значительные средства.

Наибольший удельный дебит получен в скважинах при вскрытии пласта чистой водой, подаваемой в процессе бурения водоносного горизонта непосредственно в ствол скважины из системы

водоснабжения с расходом, равным производительности эрлифтного пульпоподъемника.

Использование легкосплавных буровых штанг ЛБТ147-9000 в комплекте с трехшарошечным долотом D490мм и центратором D426 мм весом более 2 т позволило пробурить скважины глубиной 150–190 м на мелко- и тонкозернистые старооскольские пески среднего девона методом обратной промывки чистой водой. Максимальный удельный дебит составил 4,2 м<sup>2</sup>/ч, средний – 2,8 м<sup>2</sup>/ч. Оптимальным в данных гидрогеологических условиях является проволочный фильтр из нержавеющей стали на трубчатом каркасе D219 мм.

## **Глава 7. РАЗРАБОТКА НАПОРНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ УСТАНОВОК С ГАЗОИМПУЛЬСНЫМИ СИСТЕМАМИ РЕГЕНЕРАЦИИ**

### **7.1. Существующие методы и конструкции напорных фильтрующих установок для удаления загрязнений из жидкостей**

Наряду с очисткой жидкостей от загрязнений в силовых полях: гравитационном, центробежном, магнитном и упругих колебаний (вибрационном), получила распространение очистка жидкостей фильтрованием [122].

Накопление загрязнений в порах фильтрующей перегородки приводит к частичному или полному закупориванию пор и образованию осадка на поверхности перегородок, в качестве которых применяются самые разные фильтрующие материалы: волокна и порошки различного происхождения, щелевые фильтры (проволочно-навивные, ленточные и пластинчатые), металлические и полимерные сетки и т.д. [123-126].

Сетчатые установки предназначены для извлечения механических примесей, мелкодисперсной взвеси, планктона и ряда других загрязнений. Вода может процеживаться через сетчатые полотна русловых и береговых водозаборов для извлечения из нее грубых примесей: речных наносов, взвеси, листьев, щепы и коры, фито- и зоопланктона. В системах коммунального и технического водоснабжения грубая очистка природных вод от минеральных взвесей и фитопланктона производится через более мелкие сетки. Несмотря на отличительные конструктивные особенности, неподвижные и вращающиеся барабанные сетки, микрофильтры характеризуются общностью физической модели процесса загрязнения полотен и единой расчетной схемой определения их основных технологических параметров.

Исследования фильтрации воды через сетчатые полотна проводились на лабораторных и натурных гидравлических и аэродинамических стендах К.Ф. Химицким, Н. С. Красновым, А.Д. Альтшулем, Ю.М. Кузьминым, Х.Я. Лондом, Н.Г. Журбой, В.А. Романенко и др. [127-134].

Размеры ячеек рабочих сеток в напорных сетчатых установках изменяются в пределах от 0,2 до 2,5 мм.

На рисунке 7.1 представлен ряд конструкций сетчатых фильтров, предназначенных для очистки загрязненных жидкостей от довольно крупных частиц механических загрязнений. Фильтры обычно имеют коническую (а) и плоскую (б) фильтрующие перегородки [122].

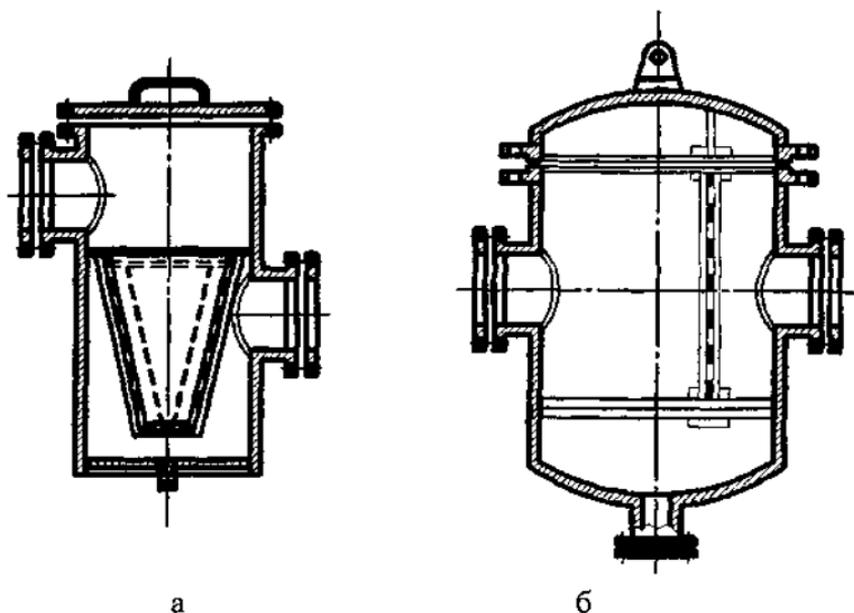


Рис. 7.1. Сетчатые фильтры с различной конфигурацией фильтрующей перегородки:  
а – конической; б – плоской

Фильтрация воды через сетчатые фильтры характеризуется уменьшением во времени расхода воды, так как частицы загрязнений задерживаются сетчатым полотном, и ростом гидравлического сопротивления. Продолжительность рабочего цикла определяется предельным значением гидравлического сопротивления, после достижения которого, возникает необходимость в удалении с поверхности полотна задержанных частиц, т.е. восстановлении его пропускной способности. Поэтому эффективность работы всех без исключения сетчатых установок определяется быстротой и качеством удаления загрязнений с полотна и их утилизацией.

Авторами работ [126,132] выполнена систематизация фильтрационных установок по способам восстановления пропускной способности фильтров: водой, воздухом, с помощью механических, вибрационных, электроимпульсных, ультразвуковых и других устройств и по периодичности действия.

Рассмотрим основные способы регенерации фильтрующих перегородок.

**Вибрационный метод очистки сеток.** Применяется для напорных сетчатых фильтров и микрофильтров (рисунок 7.2, а).

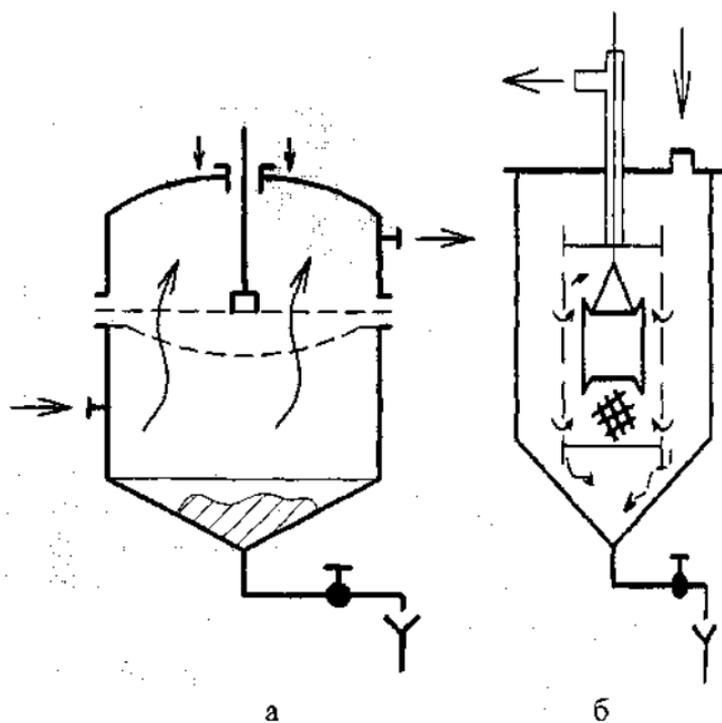


Рис. 7.2. Конструкции сетчатых установок с вибрационным (а) и ультразвуковым (б) устройствами для восстановления начальной пропускной способности сеток

Рабочая частота составляет 30-40 Гц при амплитуде колебаний до 5 мм. Сетчатое полотно жестко соединено с вибратором, установленным вне фильтра. Движущей силой процесса регенерации здесь являются инерционные силы, возникающие при изменении

направления движения перегородки с задержанными частицами загрязнений. Область применения вибрационного метода — тонкие, прочные сетчатые перегородки с низким гидравлическим сопротивлением.

**Ультразвуковой метод регенерации.** Наиболее эффективен при воздействии ультразвуковых колебаний при частотах 15–20 кГц. Колебания создаются излучателем, размещенным над сеткой (рисунки 7.2, б). При распространении колебаний в жидкости наблюдается ультразвуковая кавитация. В жидкости образуются пузырьки, которые совершают пульсирующие колебания и могут захлопываться, создавая большие местные давления. Это создает благоприятные условия для срыва твердых частиц со стенок капилляров перегородки и вымывания их обратным потоком жидкости.

Существенным недостатком ультразвуковой регенерации является значительная энергоемкость, а также ограничение размеров обрабатываемой поверхности сетчатого полотна. Область применения — сетчатые фильтры с незначительным гидравлическим сопротивлением, большой производительностью при небольших поверхностях фильтрации [126].

**Противоточная регенерация.** Основана на удалении задержанных перегородкой частиц загрязнений противоточным движением промывных агентов: фильтрата, различных жидкостей, сжатого воздуха, пара.

Обычно процесс фильтрования проводится до момента достижения предельного значения сопротивления перегородки. После этого, переключая клапаны на фильтре, изменяют на противоположное направление подачи исходной суспензии или на перегородку со стороны фильтрата подаются перечисленные выше агенты. Заслуживают внимания конструкции установок с подвижным регенерирующим устройством или подвижной фильтрующей сеткой, в которых обеспечивается необходимый для промывки перепад давления на сетчатом полотне за счет локализации воздействия.

На рисунке 7.3 показан барабанный сетчатый фильтр, в котором с 2-х сторон к сетчатому полотну прилегают две трубы, одна из которых служит для подачи промывной жидкости, а вторая труба — для отвода вторичной суспензии. Вращением барабана

осуществляется непрерывная противоточная промывка всей поверхности сетчатого полотна.

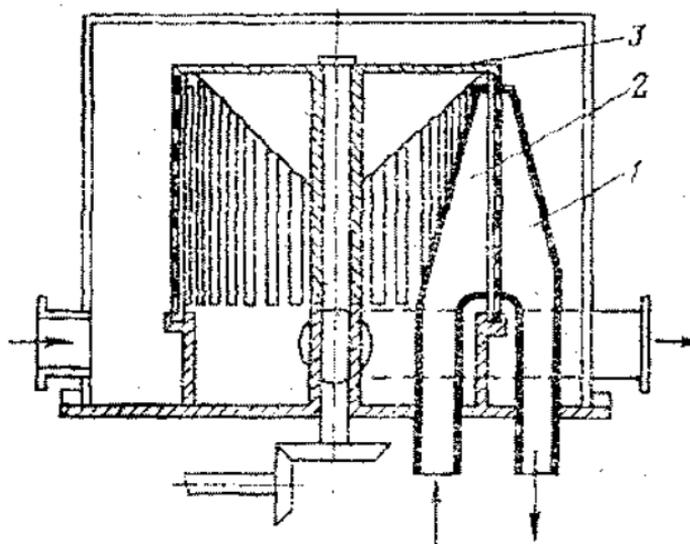


Рис. 7.3. Барабанный сетчатый фильтр с непрерывной регенерацией перегородки:  
1, 2 – трубы для отвода вторичной суспензии и подачи промывной жидкости;  
3 – сетчатый барабан

На рисунке 7.4 показана фильтровальная установка, в которой реализуется принцип струйной промывки. Качество регенерации здесь зависит от скорости движения струй, направления подачи промывной жидкости.

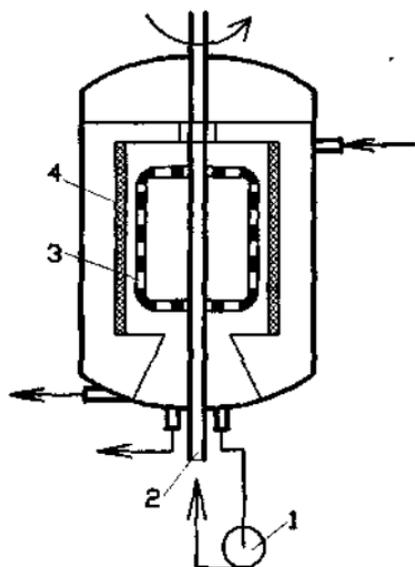


Рис. 7.4. Фильтр с обратной струйной промывкой фильтрующей перегородки:  
 1 – насос для подачи промывной жидкости; 2 – полый вал;  
 3 – перфорированные трубки; 4 – фильтр

Патронный фильтр промывается мощными струями, вытекающими из отверстий перфорированной трубки. Вода поступает сюда от насоса через полый вал. На валу жестко закреплен патрон, который вращается и его загрязненная поверхность поочередно попадает в зону струйного воздействия.

К недостаткам перечисленных конструкций относится наличие двигателя для вращения барабанов и насоса высокого давления, что повышает энергоемкость установки и увеличивает себестоимость очищенного от загрязнений фильтрата.

Противоточная система регенерации также применяется на дисковых фильтрах «ARKAL» (рисунок 7.5) [135].

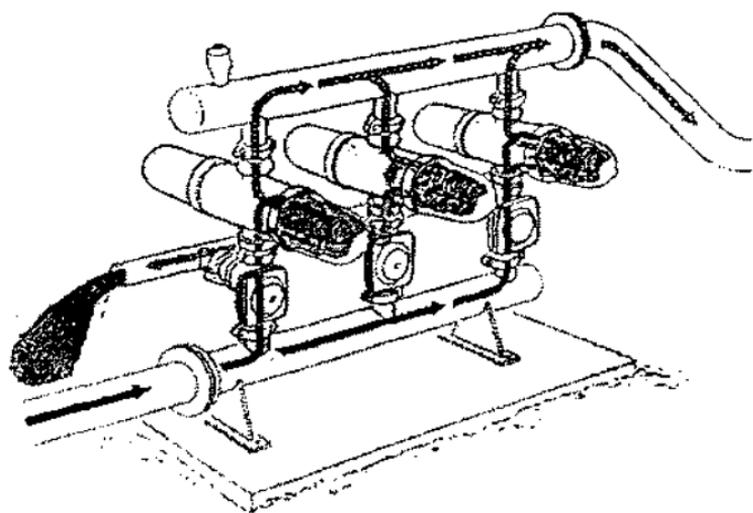


Рис. 7.5. Принципиальная схема работы фильтрующего модуля, состоящего из фильтров «ARKAL»

Здесь по мере накопления загрязнений возрастает давление в корпусе фильтрационного модуля. В некоторый момент времени освобождается пружина, и диски переходят в свободное состояние. Между ними появляется зазор и из сборного коллектора, после переключения специального клапана, подаются через сопла сильные струи воды. Под действием струй диски вращаются и с их поверхности вымываются в промывной коллектор загрязняющие вещества. Промывка осуществляется при давлении 3 атм. Время промывки 15-20с, расход промывной воды – менее 1% объема отфильтрованной жидкости. Для промывки установка «ARKAL» комплектуется дополнительным насосом либо пневмобаком при наличии на площадке станции сжатого воздуха.

Недостаток фильтров «ARKAL» - наличие вращающихся деталей – дисков фильтрующих элементов и высокая вероятность низкого качества отмытки дисков при загрязнении липкими отложениями.

Большинство серийно выпускаемых фирмами США («G.T.Woods Co», «Holly», «Jardney», «Rain-Bird», «Drip-Eze»,

«Bernad») и фирмами других стран фильтров оборудуются либо системами ручной обратной промывки с извлечением сетчатого полотна из корпуса, либо системами автоматической промывки, которые включаются при заданном перепаде давлений на фильтрующих элементах [134].

В литературе [122, 126] отмечается, что гидродинамическая противоточная регенерация не позволяет добиться полного удаления загрязнений с фильтрующей перегородки, поэтому для обеспечения существенного перепада давлений на перегородке используют пульсационную промывку фильтров и импульсную противоточную регенерацию.

*Пульсационно-противоточные методы регенерации.* Эффективность регенерации фильтрующей перегородки резко возрастает, если противоточная регенерация дополняется периодическим изменением направления движения жидкости относительно перегородки [122, 126].

Упругие колебания жидкости в порах перегородки обеспечиваются ее пульсационной подачей, при которой скорость потока периодически возрастает от нулевого до максимального значений. Эффективность пульсационной регенерации прямо пропорциональна частоте и амплитуде колебаний промывной жидкости.

Пульсационная подача может осуществляться посредством различных пульсаторов (рисунок 7.6): пневматического (а); пластинчатого (б); поршневого (в) и мембранного (г).

Преимущество схемы с пневматической пульсацией – ее простота и низкие энергозатраты для получения значительных амплитуд колебаний. Однако, применение пневматической пульсации ограничено фильтрами с малыми объемами, что объясняется инерционностью пневмосистемы.

Остальные пульсаторы (рисунок 7.6) работают с более высокими частотами (сотни и даже тысячи колебаний в минуту), однако, в силу своих конструктивных особенностей они имеют ограниченный срок службы и применяются только при периодической регенерации [126].

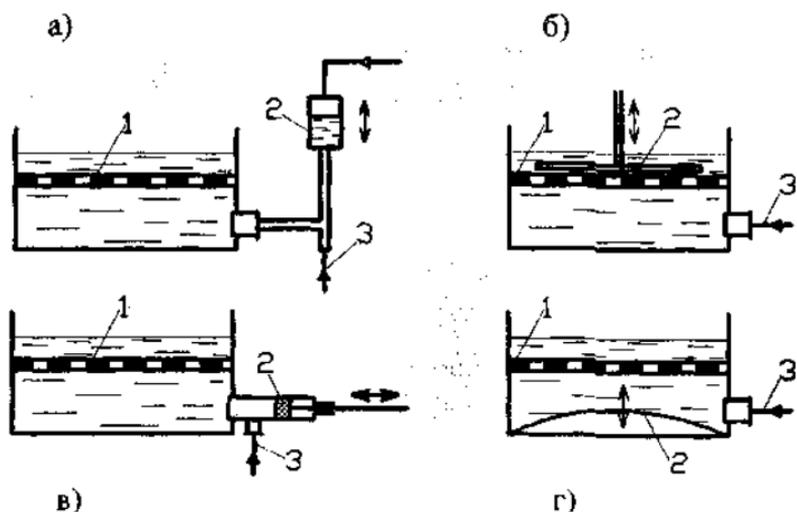


Рис. 7.6. Различные типы пульсаторов для осуществления пульсационной промывки фильтров [116];

- а – пневматический; б – пластинчатый; в – поршневой; г – мембранный;  
 1 – фильтрующая перегородка; 2 – пульсатор;  
 3 – линия подачи промывочной жидкости

**Импульсно-противоточные методы регенерации.** Указанные методы позволяют обеспечить значительный перепад давлений на фильтрующем элементе. Эффект может обеспечиваться воздействием электрического разряда в жидкости, а также другими энергоносителями.

Электрогидродинамический способ (рисунок 7.7) относится к импульсным противоточным методам регенерации. Разряды создаются между электродами разрядника и на некотором удалении от фильтрующей сетки барабана, приводимого во вращение от электропривода [136].

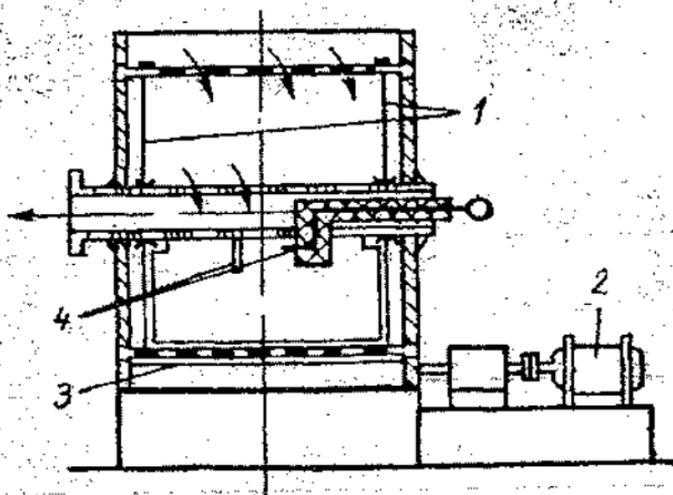


Рис. 7.7. Схема импульсной противоточной регенерации электрическими разрядами сетчатого полотна барабанного напорного фильтра [136]:  
1 – барабан; 2 – электропривод; 3 – сетка; 4 – разрядник

Приведенная установка является напорным сетчатым фильтром с местной очисткой рабочего полотна. Регенерация сетчатого полотна осуществляется ударной волной и гидротоком. Проходя через отверстия сетки, ударная волна сдвигает плотные скопления загрязнений, нарушает их сплошность. Гидроток производит отделение загрязнений от сетчатого полотна. Однако, учитывая незначительные размеры парогазового пузыря, образующегося при разряде, расстояние, на которое отбрасываются загрязнения от сетки невелико, поэтому для окончательного удаления загрязнений необходимо противоточное движение промывной жидкости.

К недостаткам способа следует отнести ограничения по его применению во взрывоопасных жидкостях, наличие высоких опасных напряжений (20-60) кВ и значительные весогабаритные показатели рабочей аппаратуры.

К импульсно-противоточным методам регенерации можно отнести методы, в которых загрязненное сетчатое полотно очищается импульсным обратным током воды, создаваемым при быстром вводе сжатого воздуха, жидкого азота или сжигании газооб-

разного топлива в рабочей камере, сообщаемой с полостью фильтра [137-140].

Один из вариантов фильтрующей установки, в которой использована система газомпульсной регенерации на основе ВКГС, установленная на всасывающем патрубке насоса, представлен на рис. 7.8 [139].

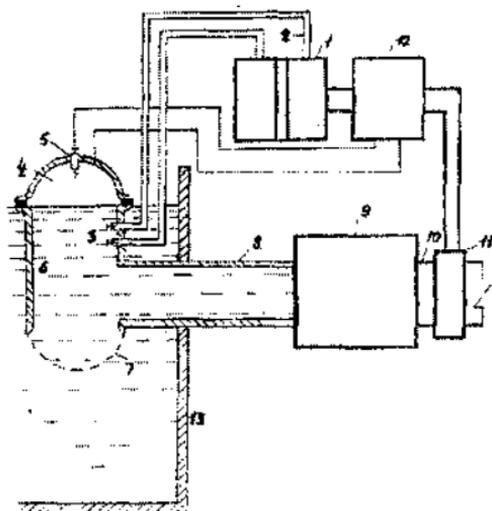


Рис. 7.8. Сетчатый фильтр всасывающего патрубка насоса с газомпульсной системой регенерации на основе ВКГС:

- 1 – электролизер; 2 – трубка; 3 – обратный клапан; 4 – камера сгорания;
- 5 – свеча поджига; 6 – пустотельный цилиндр; 7 – сетчатый фильтр;
- 8 – всасывающий патрубок; 9 – всасывающий блок; 10 – отводная труба;
- 11 – датчик расхода; 12 – источник постоянного тока; 13 – резервуар

Система регенерации обеспечивает плавную регулировку величины очистного импульса в зависимости от степени загрязнения сетки. Регулировка обеспечивается путем изменения объема газа, сжигаемого в камере сгорания. Объем газа зависит от времени электролиза и силы тока. Водород сгорает в кислороде полностью с образованием паров воды, которые конденсируются. Загрязнение окружающей среды исключается. Для исключения проскока горения в электролизер, газы подаются отдельно через водяной затвор. Учитывая высокие скорости промывного потока,

процесс очистки сетчатого фильтра может производиться без остановки всасывающего устройства.

## 7.2. Теоретические основы газоимпульсной регенерации напорных сетчатых фильтров

Рассмотрим с теоретических позиций газоимпульсный способ регенерации напорных сетчатых фильтров [137–138].

Расчетная схема процесса регенерации сетчатого полотна газоимпульсным способом представлена на рисунке 7.9.

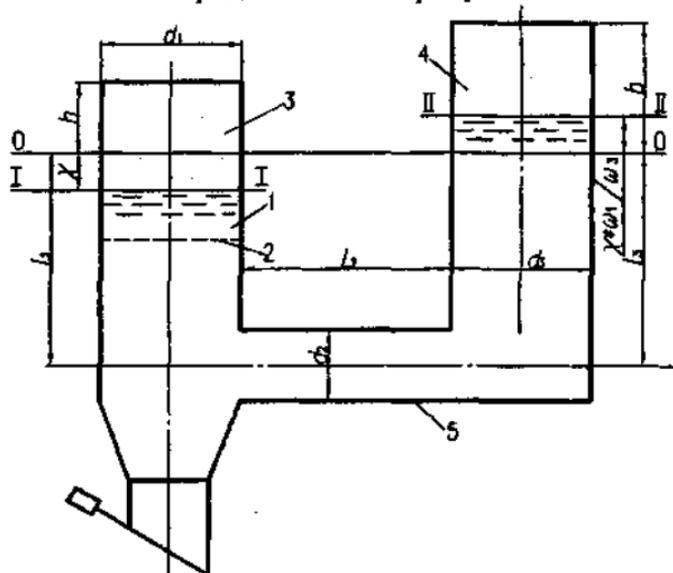


Рис. 7.9. Расчетная схема:

- 1 – корпус; 2 – фильтрующее полотно; 3 – рабочая камера;  
4 – воздушный колпак; 5 – патрубок

В рабочую камеру 1 вводят сжатый воздух, жидкий азот или горючий газообразный энергоноситель, в котором инициируют процесс горения. Давление в рабочей камере резко возрастает и в начальный момент времени будет  $p_{р.к.} = m p_0$ , где  $p_0$  – начальное давление в жидкости на уровне плоскости 0-0,  $m$  – степень повышения давления газа перед расширением.

Поскольку сжатый газ имеет избыточное давление, он расширяется, вытесняя жидкость, находящуюся над сетчатым полотном 2, через его ячейки. Жидкость по патрубку 5 устремляется в

сторону воздушного колпака 4, играющего роль демпфирующего устройства. В системе рабочая камера – сетчатое полотно – воздушный колпак возникает неустановившееся движение, являющееся затухающим, вследствие потерь напора.

Пусть граница газ – жидкость в момент времени  $t$  находится на расстоянии  $x$  от начала отсчета (сечение 0-0).

Запишем уравнение неустановившегося движения жидкости в системе рабочая камера – сетчатое полотно – воздушный колпак при следующих допущениях: жидкость несжимаема, стенки трубопровода абсолютно жесткие, потери напора рассчитываются по формулам для расчета потерь при установившемся движении.

Уравнение движения имеет вид

$$\sum_{i=1}^3 m_i \frac{d^2 x}{dt^2} = P_{р.к.} - P_{в.к.} - \sum P_{тр} - G . \quad (7.1)$$

В левой части уравнения – суммарная сила инерции жидкости в системе

$$\sum_{i=1}^3 m_i \frac{d^2 x}{dt^2} = \rho \omega_1 \left[ L_1 + L_2 + L_3 + x \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} - 1 \right) \right] \frac{d^2 x}{dt^2} . \quad (7.2)$$

Правая часть уравнения. Силы давления на жидкость в рабочей камере  $P_{р.к.}$  (в сечении I-I) и в воздушном колпаке  $P_{в.к.}$  (приведена к сечению I-I) определяем по формулам

$$P_{р.к.} = m p_0 \left( \frac{h}{h+x} \right)^n ,$$

$$P_{\text{в.к.}} = p_0 \left( \frac{b}{b - x \frac{\omega_1}{\omega_3}} \right)^{n_1} \omega_1. \quad (7.3)$$

где  $n$ ,  $n_1$  — коэффициенты политропы соответственно газа и воздуха;

Равнодействующая сил сопротивления на участке I-II

$$\sum P_{\text{тр}} = \rho \omega_1 \frac{\zeta_{\text{сист}}}{2} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (7.4)$$

где

$$\zeta_{\text{сист}} = \left[ \lambda_1 \frac{L_1}{d_1} + \frac{\zeta_c}{A^2} + \left( \lambda_2 \frac{L_2}{d_2} + \zeta_n \right) \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right] + \left[ \lambda_3 \frac{L_3}{d_3} + \zeta_n \right] \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^2 \quad ] - \text{суммарный коэффициент сопротивления}$$

системы на участке I-II;  $\zeta_c$ ,  $\zeta_n$  — соответственно коэффициенты сопротивлений сетчатого полотна, поворота;  $A$  — коэффициент живого сечения сетки,  $A = b_n^2 / (b_n + d_n)^2$ ,  $d_n$  — диаметр проволоки,  $b_n$  — размер ячейки в свету;

Равнодействующая сил тяжести

$$G = \rho g \omega_1 x \left( 1 + \frac{\omega_1}{\omega_3} \right). \quad (7.5)$$

После подстановки полученных выражений в (7.1) и группирования получаем дифференциальное уравнение

$$\left[1 + a_1(x) \frac{d^2 x}{dt^2} + \varepsilon_1 \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + u_1 (h+x)^{-n} + k_1 \left(b \frac{\omega_3}{\omega_1} - x\right)^{-n_1} + jx = 0\right. \quad (7.6)$$

$$a_1 = \frac{A_1}{L}; \quad \varepsilon_1 = \frac{B_1}{L}; \quad c_1 = \frac{C_1}{L}; \quad u_1 = \frac{U_1}{L}; \quad k_1 = \frac{K_1}{L}; \quad j_1 = \frac{J_1}{L}$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3; \quad A_1 = \frac{\omega_1}{\omega_3} - 1; \quad B_1 = \frac{\zeta_{\text{сист}}}{2}; \quad U_1 = -\frac{mp_0}{\rho} h^n;$$

$$D_1 = \frac{p_0}{\rho} \left(b \frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^{n_1}; \quad J_1 = g \left(1 + \frac{\omega_1}{\omega_3}\right).$$

Начальные условия  $t = 0; x = 0; \frac{dx}{dt} = 0$ .

Дифференциальное уравнение (7.6) является нелинейным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Оно решалось численным методом (метод Рунге-Кутты). Составлена программа «Солрак» на ЭВМ. Решение получено в виде зависимостей следующих параметров от времени: перемещения границы газ-жидкость  $x = f(t)$ ; избыточного давления в газовом пузыре  $(p - p_0) = f(t)$ ; ускорения  $a = f(t)$ ; средней скорости промывного потока перед сетчатым полотном от времени  $v = f(t)$  и перемещения  $v = f(x)$  при различных исходных данных. Расчеты (рис. 7.10) [137] показывают, что промывная скорость возрастает во времени, достигает максимального значения  $U_{\text{max}}$  и убывает до нуля, затем меняет знак, и в системе возникают затухающие колебания. Однако, в реальной схеме очистки их избегают, открывая сбросной клапан для удаления загрязнений.

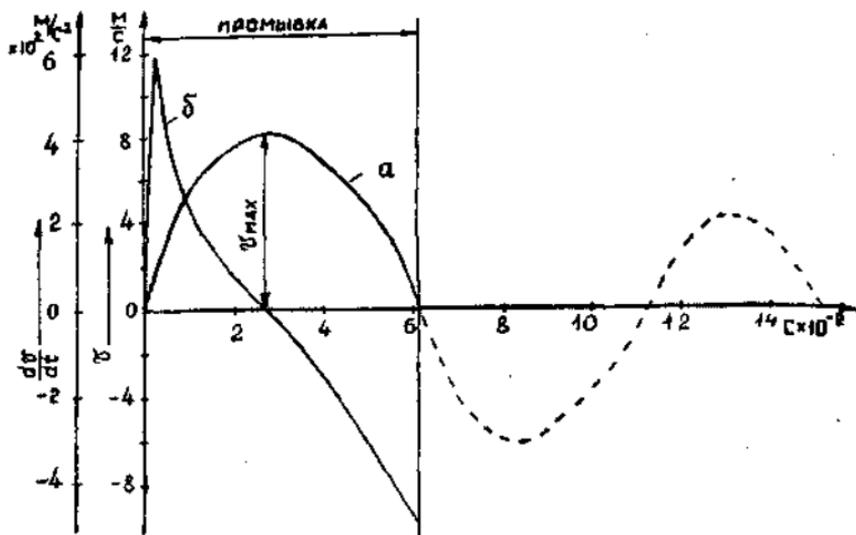


Рис. 7.10. Изменение скорости  $v$  и ускорения  $\frac{dv}{dt}$  промывного потока во времени:

$a - v=f(t)$ ;  $б - \frac{dv}{dt} = f(t)$ . — — процесс промывки; ---- — пульсации потока; для

следующих исходных данных:  $h = 0,15$  м,  $p_0 = 1,5 \cdot 10^5$  Па,  $L_1 = L_2 = L_3 = 1$  м,  
 $d_1 = d_3 = 0,15$  м,  $d_2 = 0,1$  м,  $V_{в.к.} / V_{р.к.} = 3$ ,  $m = 10$

На рисунке 7.11 приведены результаты численного расчета величины максимальной промывной скорости  $v_{\max}$  перед сетчатым полотном от соотношения исходных объемов воздуха в колпаке  $V_{в.к.} = \omega_3 b$  и газообразного энергоносителя  $V_{р.к.} = \omega_1 h$  в рабочей камере при различных значениях  $h$ .

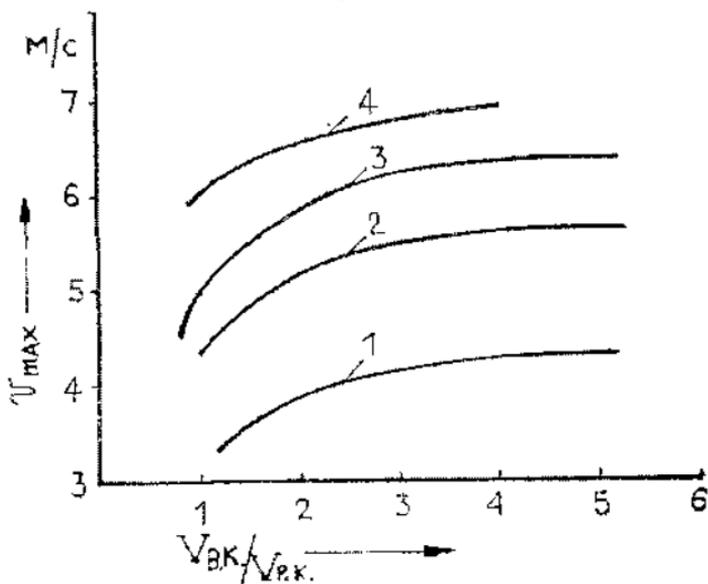


Рис. 7.11. Графики зависимости максимальной промывной скорости  $v_{\max}$  от соотношения  $V_{В.К.}/V_{Р.К.}$  при различных  $h$ : 1 —  $h=0,05$  м, 2 —  $h=0,1$  м, 3 —  $h=0,15$  м, 4 —  $h=0,2$  м; при следующих данных:  $p_0=10^5$  Па,  $L_1=L_2=L_3=1$  м,  $d_1=d_3=0,15$  м,  $d_2=0,1$  м,  $m=10$ ,  $\zeta_1=\zeta_2=1,1$ , номер сетки -0,5 (ГОСТ 6613-86)

Анализ кривых показал, что с увеличением соотношения  $V_{В.К.}/V_{Р.К.}$  от 0,5 до 2-х  $v_{\max}$  увеличивается в 1,3–1,5 раза, в диапазоне от 2 до 3-х, рост  $v_{\max}$  замедляется до 5–15%, а после  $V_{В.К.}/V_{Р.К.}=(3,5-4)$  наступает ее стабилизация. Указанные закономерности проявляются во всем рассмотренном диапазоне  $h$ .

Наибольший практический интерес при расчете энергетических и кинематических параметров системы очистки напорных фильтров представляет процесс нарастания скорости промывного потока от 0 до  $v_{\max}$  (процесс разгона), так как этот отрезок движения характеризуется наибольшей энергией жидкости, наибольшими ускорениями  $a$  (рисунок 7.9) и эффективностью промывки фильтра.

Рассмотрим задачу нахождения расчетных формул для приближенного определения скорости промывного потока на стадии его разгона в функции расстояния  $v=f(x)$  [138].

Преобразуем уравнение (7.6) при следующих дополнительных допущениях: 1) потери напора рассчитываем по значениям скорости  $v_y$  установившегося движения, полученной из уравнения Д.Бернулли для сечений I-I и II-II на данном перемещении  $x$  с учетом изменения давления (7.3) в рабочей камере; 2) пренебрегаем выражением  $x\left(\frac{\omega_1}{\omega_3} - 1\right)$  в выражении суммарных сил инерции из-за его малости.

С учетом допущений уравнение (7.6) примет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{mp_0}{\rho L} \frac{h^n}{(h+x)^n} - \frac{p_0}{\rho L} \left( \frac{b}{b-x} \frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^n - \frac{\zeta_{\text{сист}}}{2L} v_y^2 - \frac{g}{L} x \left( 1 + \frac{\omega_1}{\omega_3} \right).$$

Учитывая, что  $v = \frac{dx}{dt}$ ;  $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$ . Разделим переменные и проинтегрируем правую и левую части, получим

$$\frac{1}{2} v^2 = \frac{mp_0 h^n}{\rho L (h+x)^{n-1} (1-n)} - \frac{p_0 \omega_3 b^{n_1}}{\rho L \omega_1 (n_1-1) \left( b - x \frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^{n_1-1}} - \frac{\zeta_{\text{сист}} x}{2L} v_y^2 - \frac{g}{2L} x^2 \left( 1 + \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) + C.$$

Постоянную интегрирования  $C$  находим из начальных условий: при  $x = 0$ ;  $v = 0$ .

$$C = \frac{mp_0h}{\rho L(n-1)} + \frac{\omega_3}{\omega_1} \frac{p_0b}{\rho L(n_1-1)}$$

Получим выражение для скорости неустановившегося движения  $v$  в рабочей камере при заданном перемещении  $x$  на стадии разгона

$$v = \sqrt{\frac{1}{L} \left\{ \frac{2mp_0h}{\rho(n-1)} \left[ 1 - \left( \frac{h}{h+x} \right)^{n-1} \right] - \frac{2p_0b\omega_3}{\rho(n_1-1)\omega_1} \left[ \left( \frac{b}{b-x\left(\frac{\omega_1}{\omega_3}\right)} \right)^{n_1-1} - 1 \right] - \zeta_{\text{сист}} v_y^2 x - gx^2 \left( 1 + \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right\}} \quad (7.7)$$

Скорость  $v_y$  установившегося движения, входящую в выражение (7.7), получим из уравнения Д. Бернулли, записав его для сечений I-I и II-II относительно плоскости 0-0 [138].

$$v_y = \sqrt{\frac{\frac{2p_0}{\rho} \left[ m \left( \frac{h}{h+x} \right)^n - \left( \frac{b}{b-x} \frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^{n_1} - 2gx \left( 1 + \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right]}{\zeta_{\text{сист}} + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^2 - 1}}. \quad (7.8)$$

Сравнение вычисленных значений скорости  $v$  по формуле (7.7) и результатов численных расчетов по уравнению (7.6) показало, что формула (7.7) дает несколько заниженные значения скорости  $v$  на участке разгона промывного потока. Однако в конце участка разгона при  $x = x_1$ , когда скорость  $v$  достигает максимума и становится равной скорости  $v_y$  установившегося движения ( $v = v_y = v_{\text{max}}$ ), значения численных и аналитических расчетов совпадают. Это соответствует физической картине процесса разгона жидкости в системе рабочая камера – фильтр – воздушный колпак. Скорость в конце разгона достигает максимальной величины, когда суммарные гидравлические потери, сила давления в колпаке и силы тяжести уравновесят движущую силу со стороны газа в рабочей камере, поэтому эта скорость может быть найдена как скорость  $v_y$  установившегося движения на перемещении  $x_1$ .

Значения  $v_{\text{max}}$  и  $x_1$  можно найти, решив систему алгебраических выражений (7.7) и (7.8) при  $v = v_y = v_{\text{max}}$ ;  $x = x_1$ , любым итерационным методом.

Из анализа выражения (7.7) следует, что скорость жидкости на участке разгона пропорциональна начальному перепаду давления между рабочей камерой и воздушным колпаком  $\Delta p = p_0(m-1)$ , геометрическому объему рабочей камеры  $V_{p,k} = f(h)$  и обратно пропорциональна массе жидкости  $M = f(L)$ , вовлекаемой в движение.

На рисунке 7.12 представлены графики зависимости максимальной  $v_{\text{max}}$  и текущей  $v$  скоростей разгона гидропотока от параметров системы очистки

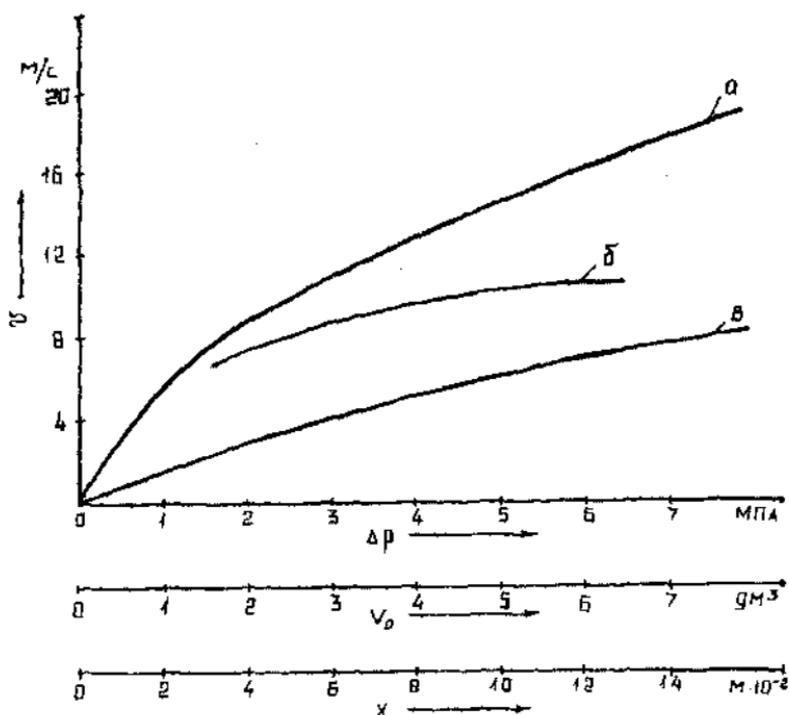


Рис. 7.12. Графики зависимости максимальной  $u_{\max}$  и текущей  $v$  скоростей разгона гидротока от параметров системы очистки: 1 -  $u_{\max} = f(\Delta p)$  при  $h=0,15$  м,  $m = \text{const}$ , 2 -  $u_{\max} = f(V_{p.k})$ , 3 -  $v = f(x)$  (при  $h=0,15$  м) для следующих исходных данных:  $\zeta_{\text{сет}} = 9,32$ ,  $p_0 = 2 \cdot 10^5$  Па,  $L_1 = L_2 = L_3 = 1$  м,  $d_1 = d_3 = 0,15$  м,  $d_2 = 0,1$  м,  $V_{в.к.} / V_{p.k} = 3$ ,  $m = 10$ ,  $n = n_1 = 1,4$

С использованием тех же уравнений может рассчитываться промывка сетчатых фильтров [139], установленных на заборных патрубках насосов, забирающих фильтрат из открытых резервуаров. В этом случае промывной поток, пройдя сетчатое полотно, образует затопленную струю в окружающей жидкости. В расчетных зависимостях можно принять  $l_2 = l_3 = 0$ , значение  $b$  на порядок больше  $h$ , а сечение II-II для записи уравнения Д.Бернулли провести по уровню жидкости в резервуаре.

Проектирование систем очистки напорных фильтров с различными газообразными энергоносителями производится следующим образом:

- по заданной производительности напорного фильтра  $Q$  и предельно допустимым размерам взвешенных частиц, выбирают стандартное сетчатое полотно;

- задают допустимую скорость воды перед сеткой при фильтрации  $u_{\text{доп}}$  и определяют рабочую площадь сетки  $\omega_1 = Q/u_{\text{доп}}$ ;

- экспериментально определяют скорость промывного потока, при которой загрязнения будут эффективно удаляться с сетчатого полотна обратным током воды и принимают эту скорость в качестве  $u_{\text{max}}$ ;

- используя программу «Colpak» или формулы (7.7) и (7.8), определяют основные параметры системы очистки при которых обеспечиваются скорости промывки  $u \geq u_{\text{max}}$ .

### ***7.3. Экспериментальные исследования газоимпульсного способа регенерации сетчатых напорных фильтров***

Эксперименты по исследованию эффективности применения газоимпульсного способа проводились в системе оборотного водоснабжения ПО «Минский тракторный завод» при очистке воды, подаваемой в радиаторы охлаждения установок электронагрева деталей токами высокой частоты (ТВЧ) [140].

Заводская оборотная вода характеризуется большим содержанием взвешенных частиц, которые образуют на патронных сетчатых фильтрах липкую корку, для удаления которой традиционные методы очистки: обратным током воды и сжатым воздухом, оказались неэффективны.

Принципиальная схема лабораторной установки для проверки эффективности различных методов регенерации патронных сетчатых фильтров, смонтированной в цехе №3 МТЗ лаборатории ТВЧ МТЗ, представлена на рисунке 7.13.

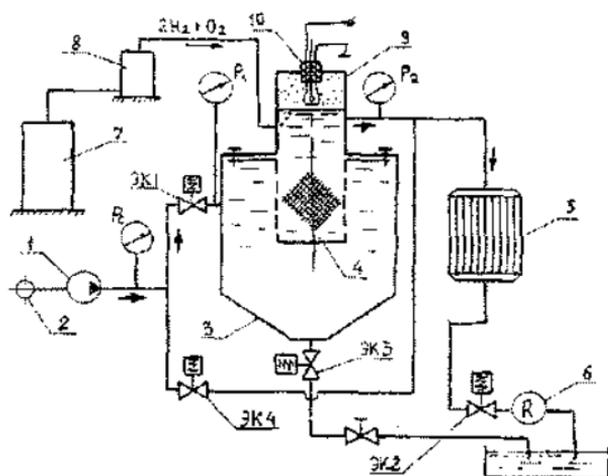


Рис. 7.13. Принципиальная схема лабораторной установки

1 - центробежный насос; 2 - напорный водовод; 3 - корпус; 4 - фильтрующий элемент; 5 - радиатор; 6 - расходомер; 7 - электролизер; 8 - предохранительный затвор; 9 - рабочая камера; 10 - свеча поджига; (ЭК1-ЭК4) - электроклапаны

Фильтрующий элемент представлял собой сетчатый патронный фильтр с внутренним диаметром 75 мм и полезной площадью  $150 \text{ см}^2$ , обтянутый сеткой квадратного плетения с ячейкой  $0.5 \times 0.5 \text{ мм}$ . Потери напора на фильтре определялись как разность показаний  $p_1$  и  $p_2$  манометров, установленных до и после фильтра.

Газовая смесь подавалась от электролизера через предохранительный затвор в рабочую камеру, где поджигалась свечей. При этом клапаны ЭК1 и ЭК2 закрывали, а ЭК3 и ЭК4 открывали, поддерживая небольшой обратный ток воды через фильтр. Количество газовой смеси дозировалось по времени и составляло  $133 \text{ см}^3$  при давлении  $1.1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

В опытах определялась надежность работы системы очистки, качество очистки полотна путем визуального изучения поверхности сетки, и интенсивность снижения гидравлического сопротивления сетки по величине потерь напора на ней в зависимости от количества импульсов. Технологические показатели эффективности газоимпульсной очистки сравнивались с аналогичными показателями очистки обратным током и сжатым воздухом.

На рисунке 7.14 представлен график зависимости изменения потерь напора на фильтрующем элементе при его засорении и регенерации. Видно, что процесс засорения фильтра идет неравномерно. Первые три суток потери на фильтре возрастают незначительно, затем после достижения примерно 3-х метров водяного столба происходит резкое увеличение сопротивления фильтрующего элемента. Это легко объяснить тем, что вначале сетка задерживает загрязнения, размеры которых превышают размеры отверстий, а затем, когда образуется слой загрязнений, последний задерживает более мелкие частички и проницаемость сетки резко уменьшается. Примерно за пять-семь суток поверхность сетки покрывается сплошным слоем загрязнений толщиной 2.5–3 мм.

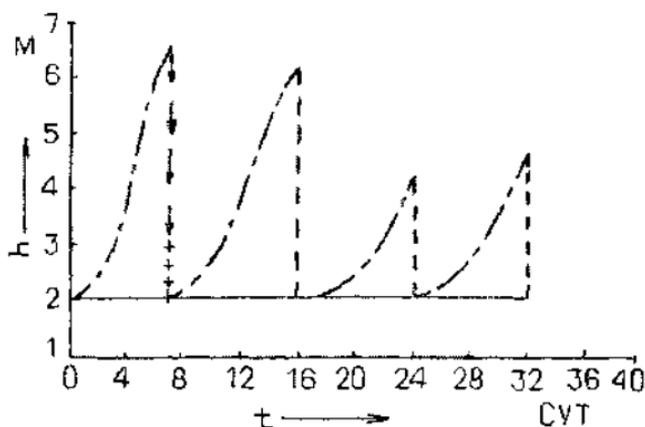


Рис. 7.14. Зависимость потерь напора  $h$  (при  $Q=0,0014\text{ м}^3/\text{с}$ ) на патронном фильтре от времени при различных видах периодической регенерации:

→→ обратным током; — — газимпульсным способом;  
 ++ отмывка под струей воды

Как показали опыты по использованию обратного тока (расход  $Q = 1.5\text{--}2$  л/с) для регенерации фильтрующего элемента, уже через 10–15 мин потерь напора снижались до 3 м вод. ст. (рисунок 7.14) и стабилизировались.

Однако после извлечения фильтрующего элемента из корпуса при визуальном осмотре было обнаружено, что загрязнения были удалены обратным током только на 15% площади сетки и очень неравномерно.

После этого фильтрующий элемент извлекали и отмывали полностью под струями воды и устанавливали в корпус.

Затем загрязненный в процессе работ фильтр очищался газомпульсным методом. После 4-х импульсов потери напора на фильтре, как правило, соответствовали значению, определенному для полностью очищенного фильтра, хотя при визуальном осмотре качество очистки сетки соответствовало 95%.

Динамика качества очистки сетки, определяемого визуально, выглядела следующим образом: после первого импульса очищаясь верхняя четверть боковой поверхности фильтра, после второго импульса такое же по высоте нижележащее кольцо и т.д. Несмотря на кажущуюся равномерность очистки поверхности сетки по высоте, первый импульс вносил наибольший вклад в снижение гидравлического сопротивления сетки (до 60%), остальные импульсы в среднем снижали гидравлическое сопротивление на (10-15)%. Это указывает на то, что метод определения эффективности очистки сетчатого полотна только по стабилизации потерь напора не может быть использован в качестве основного критерия полной очистки фильтра, так как известное начальное значение потерь напора  $\Delta p$  для чистого фильтра при рабочем расходе  $Q_p$  практически недостижимо. После первой очистки на поверхности фильтра сохраняется незначительная остаточная загрязненность, для удаления которой потребуются, возможно, негидравлические методы очистки, например, химические. Следовательно, необходимо использовать в качестве критерия полной очистки фильтра данным методом потери давления  $\Delta p_1$  на фильтре с незначительной остаточной загрязненностью при рабочем расходе  $Q_p$  не исключая при этом периодическую визуальную ревизию поверхности фильтра.

Как показали опыты, скорость очистки в течение всего процесса удаления загрязнений непрерывно изменяется, уменьшаясь по мере снижения загрязненности поверхности. Аналогично выглядит процесс очистки деталей в машиностроении когда, 90-95% загрязнений удаляется в первую половину общего времени очистки, а остальные 5-10% во вторую [141].

Функциональная зависимость скорости очистки от времени сложна и определяется экспериментально при определенных ус-

ловиях процесса очистки. На скорость очистки влияют следующие факторы:

- количество загрязнений (начальное количество загрязнений на поверхности, допустимое количество загрязнений после очистки, требования к равномерности распределения по поверхности остаточной загрязненности);

- природа загрязнений (химический и гранулометрический состав, прочностные и реологические свойства).

Опыты по регенерации сеток на стенде производились в течение месяца и подтвердили устойчивый характер результатов очистки как в части качества (95% очистки всей площади полотна), так и по количественному фактору (достижение первоначальных потерь напора). Удельная энергоёмкость очистки сетки 0.5 составила 40 Дж/см<sup>2</sup>.

По результатам экспериментов Хозрасчетным центром при Совете ВОИР БПИ была изготовлена конструкторская документация напорно-фильтрующей установки (НФУ) с газомпульсной системой очистки производительностью 18 и 72 м<sup>3</sup>/час [142-143]. Технические характеристики НФУ-18 и НФУ-72 представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Технические характеристики напорно-фильтрующих установок

№	Наименование параметров	НФУ-18	НФУ-72
1	Пропускная способность, м <sup>3</sup> /час	18	72
2	Номинальное давление, МПа	0.4	0.4
3	Объем рабочей камеры, дм <sup>3</sup>	0.5÷1.5	1.5÷5
4	Давление в импульсе, МПа	1.4	1.4
5	Площадь сетки, м <sup>2</sup>	4·10 <sup>-2</sup>	16·10 <sup>-2</sup>
6	Потребляемая мощность электролизера, кВт	1.2	1.2
7	Напряжение, В	42	42
8	Габаритные размеры	900x800x750	945x850x800

Продольный разрез НФУ представлен на рисунке 7.15.

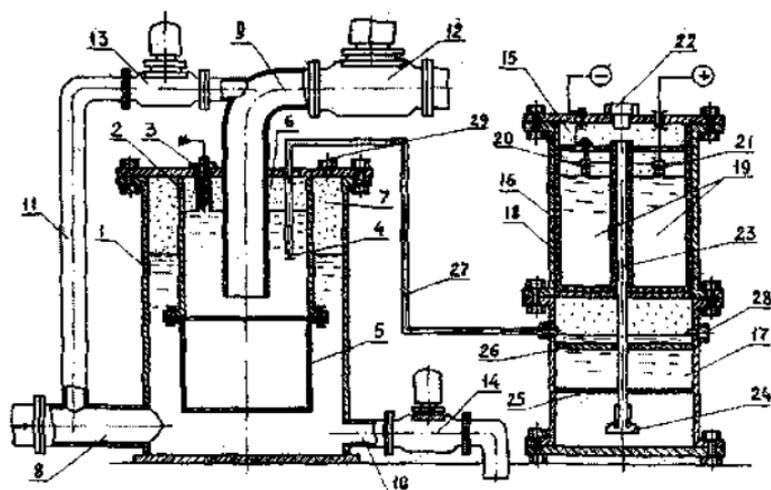


Рис. 7.15. Продольный разрез напорно-фильтрующей установки:  
 1-корпус; 2-патрубок; 3-свеча поджига; 4-предохранительный клапан;  
 5-фильтрующий патрон; 6-рабочая камера; 7-воздушный колпак;  
 8-подводящий патрубок; 9-отводящий патрубок; 10-сливной патрубок;  
 11-промывной патрубок; 12,13,14-электроклапаны; 15-электролизер;  
 16-корпус электролизера; 17-предохранительный затвор; 18-диэлектрическая  
 вставка; 19-электроды; 20,21- клеммы; 22- пробка; 23-патрубок; 24-обратный  
 клапан; 25,26-дырчатые перегородки; 27- газоотводная трубка; 28,29-пробки

Рабочий цикл НФУ можно разделить на 2 этапа: **фильтрация и регенерация.**

В режиме **фильтрации** электролизер и свеча обесточены. Исходная жидкость поступает через подводящий патрубок, проходит через фильтрующий элемент и очищенная направляется в систему чистой воды.

В режиме **регенерации** вентиль 12 перекрывают, а вентили 13, 14 открывают, при этом воды из патрубка 8 через патрубок 10 и вентиль 14 направляется на слив. Одновременно подают напряжение на электроды электролизера и свечу. Образующаяся на электродах газовая смесь поступает в рабочую камеру. Как только рабочая камера наполнится газовой смесью настолько, что раскаленная до необходимой температуры нить накаливания свечи поджига окажется в газовой смеси, начнется процесс горения. Об-

разующаяся газовая полость высокого давления вытесняет жидкость через сетчатое полотно. Смытые с сетки загрязнения поступают в сливной патрубок и утилизируются. Постоянно нагреваемая свеча в процессе регенерации позволяет легко автоматизировать процесс.

Время полной очистки фильтрующего полотна определяется опытным путем. На ПО «Минский тракторный завод» был изготовлен опытный образец НФУ-18 и установлен в цехе №3 завода.

#### ***7.4 Новые фильтрующие установки с импульсно-противоточными системами регенерации фильтрующего полотна***

После производственных испытаний была произведена доработка оборудования НФУ в направлении расширения области применения, надежности и безопасности. В качестве принципиальной схемы осталась прежняя схема: основным элементом НФУ является сетчатый напорный фильтр, обтянутый прочной полиамидной сеткой галунного плетения с необходимыми размерами отверстий. Полость фильтра сообщается с рабочей камерой, в которой монтируется оборудование для создания импульсно-волнового воздействия на загрязнения и их удаления с сетчатого полотна. Новым является то, что импульсное оборудование может быть следующих видов: на основе водорода, сжатого воздуха, жидкого азота, гидравлического удара и пневмо-пульсационное. Тип применяемого оборудования определяется на стадии пробной лабораторной регенерации фильтрующего полотна, предварительно загрязненного в оборотной системе водоснабжения (ОСВ) данного предприятия.

***Напорный фильтр с газоимпульсной системой регенерации на основе ВКГС.*** На рисунке 7.16 представлена принципиальная схема фильтрующей установки [144].

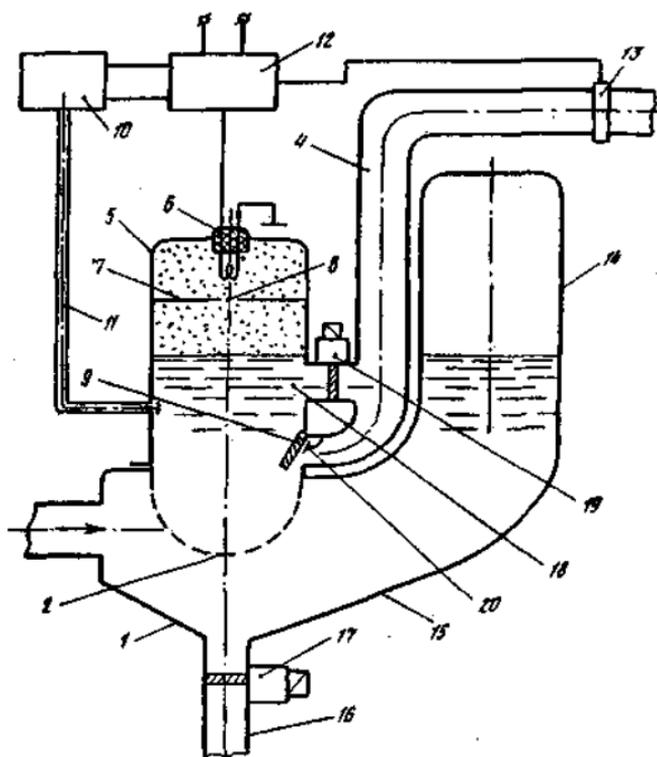


Рис. 7.16. Напорный фильтр с газоимпульсной системой регенерации на основе водорода:

- 1 – корпус; 2 – фильтрующее полотно; 3 – подводящий трубопровод; 4 – патрубок отвода очищенной жидкости; 5 – камера сгорания; 6 – свеча поджига; 7 – поперечная перегородка; 8 – калиброванное отверстие; 9 – обратный клапан; 10 – электролизер; 11 – газовая трубка; 12 – источник постоянного напряжения; 13 – датчик расхода жидкости; 14 – воздушный колпак; 15 – колено; 16 – аспирационный патрубок; 17, 19 – электромагнитные клапаны; 18, 20 – отверстия

Установка представляет напорный сетчатый фильтр с наружным подводом воды. Очищенная вода удаляется по отводящему патрубку. Камера сгорания со свечей поджига и электролизер с газовой трубкой, подключенный к источнику постоянного тока, представляют собой газоимпульсную систему регенерации сетчатого полотна. Система регенерации работает следующим образом.

Как только потери напора на сетчатом полотне превышают допустимые, расход воды уменьшается. Датчик расхода обеспечивает включение источника постоянного тока, который подает напряжение на электролизер. ВКГС заполняет камеру сгорания. Через заданное время источник тока переключается на свечу поджига. Одновременно электроклапан на аспирационном патрубке открывается, а электроклапан на отводящем патрубке закрывается. Свеча поджигает газовую смесь в верхней части камеры сгорания, которая может быть разделена перегородкой с калиброванным отверстием. После сгорания водорода во всем объеме образуется пар высокого давления, который, расширяясь подобно поршню, вытесняет воду через отверстия фильтрующей перегородки и создает мощный поток жидкости, промывающий отверстия сетчатого полотна. Пар, находящийся в верхней части камеры расширяется медленнее, так как скорость расширения определяется сопротивлением отверстия в перегородке. Пар истекает через отверстие в нижнюю камеру на завершающей стадии расширения парогазового пузыря, которая характеризуется высокой скоростью жидкости, но низким давлением в пузыре, что обеспечивает подпитку пузыря и усиливает прямой гидросток.

Эффективным фактором усиления прямого гидросточка является наличие воздушного колпака. Объем находящегося здесь воздуха многократно превышает объем парогазового пузыря, поэтому, пузырь, расширяясь, не встречает дополнительного гидравлического сопротивления.

Загрязнения удаляются через аспирационный патрубок.

При конденсации парогазового пузыря образуется обратный гидросток, который в значительной степени снижается из-за того, что скорость заполнения водой камеры сгорания также определяется гидравлическим сопротивлением отверстия в перегородке, которое работает как местное сопротивление. После конденсации парогазового пузыря может быть осуществлен новый цикл регенерации сетчатого полотна, если датчик расхода укажет на то, что первоначальный расход еще не достигнут.

Таким образом, назначение перегородки с отверстием заключается в увеличении длительности высокоскоростного промывного потока за счет подпитывающего действия верхней части камеры сгорания. Она поддерживает более высокое давление в расши-

рающемся парогазовом пузыре. Работая как местное сопротивление, отверстие замедляет обратный гидросток на стадии конденсации паров. Применение воздушного колпака в качестве демпферного устройства позволяет усилить промывной гидросток за счет обеспечения малого сопротивления движению жидкости за сетчатым полотном и уменьшения инерционных потерь.

Система газоимпульсной регенерации может устанавливаться также на всасывающей патрубке насоса [139]. Для исключения проскока горения в электролизер, газы подаются отдельно через водяной затвор. Учитывая высокие скорости промывного потока, процесс очистки сетчатого фильтра может производиться без остановки всасывающего устройства.

Качество регенерации сетчатого полотна можно повысить, если исключить негативное влияние обратного гидросточа, возникающего на стадии конденсации водяных паров и способного вернуть часть загрязнений обратно на сетчатое полотно.

С этой целью разработана усовершенствованная конструкция системы газоимпульсной регенерации [145], в которой камера сгорания состоит из 2-х секций: правой и левой, сообщающихся между собой посредством отверстия. В правой секции в верхней части установлена свеча поджига, а в нижней части — нагнетательный клапан. Левая секция содержит в нижней части всасывающий клапан. Сетчатая перегородка установлена во всасывающей трубке насоса таким образом, что нагнетательный клапан находится за перегородкой, а всасывающий клапан — до перегородки.

Таким образом, выполнение камеры сгорания двухсекционной с обратными клапанами в нижних частях каждой секции, позволяет за один цикл промывки создать дважды промывной поток через сетку: один раз в период расширения парогазового пузыря, а второй раз — при его конденсации. Это повышает эффективность регенерации и обеспечивает быструю утилизацию загрязнений.

Предложенный способ газоимпульсной регенерации может быть применен также для патронных фильтров [146].

Здесь применены фильтрующие патроны в виде конусов, расположенных с возможностью перемещения внешнего относительно внутреннего. В рабочем положении отверстия фильтрую-

щих полотен внутреннего и внешнего усеченных конусов совпадают, и очищаемая жидкость фильтруется через их полотна.

При регенерации, в камере, отделенной от полости фильтра гибкой мембраной, сжигается водород, полученный электролизом. Гибкая мембрана передает через жидкость ударный импульс давления, который действует на всю площадь фильтрующего полотна и производит его первичную очистку.

Импульс давления одновременно воздействует на нижнее основание внешнего усеченного конуса, смещая его относительно внутреннего усеченного конуса из верхнего положения вниз на половину отверстия. За счет этого достигается разрушение малопрочных частиц мусора, дробление солей и обеспечивается смыл загрязнений через клапан за пределы фильтра. Внешний усеченный конус возвращается в исходное положение с помощью пружины.

*Напорный фильтр с газомпульсной системой регенерации на основе сжатого воздуха.* Установка (см. рисунок 7.17) [147] содержит корпус с воздушным колпаком, патрубок отвода очищенной жидкости с датчиком расхода и электромагнитным клапаном, аспирационный патрубок с электромагнитным клапаном, сетчатое фильтрующее полотно и систему его регенерации, обеспечивающую очистку сетчатого полотна за счет дискретного импульсного воздействия на загрязнения, возникающего при одновременном выхлопе сжатого воздуха через специальные выхлопные окна в жидкость. Длительность, мощность и амплитуда импульсов регулируется в широких пределах. В качестве энергоносителя используется сжатый воздух.

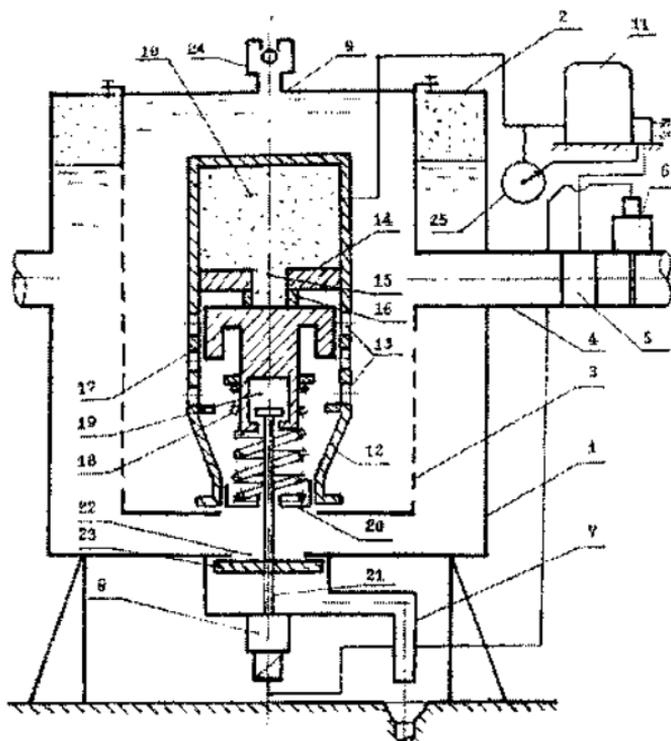


Рис. 7.17. Схема напорно-фильтрующей установки с газоимпульсной регенерацией на основе сжатого воздуха:

- 1 – корпус; 2 – воздушный колпак; 3 – фильтрующее сетчатое полотно;  
 4 – патрубок отвода очищенной жидкости; 5 – датчик расхода; 6 – электромагнитный клапан; 7 – аспирационный патрубок; 8 – электромагнитный клапан;  
 9 – камера создания импульсного давления; 10 – ресивер; 11 – электрокомпрессор;  
 12 – пневмоцилиндр; 13 – окна; 14 – перегородка; 15 – отверстия; 16 – седло;  
 17 – плунжер; 18 – пружина; 19 – полость; 20 – резьбовой стакан; 21 – тяга;  
 22 – отверстия; 23 – обратный клапан; 24 – эксплуатационный вантуз;  
 25 – реле давления

Система регенерации фильтрующего полотна содержит камеру создания импульсного давления, открытую к сетчатому фильтрующему полотну. В верхней части камеры установлены пневмоцилиндр с подпружиненным цилиндрическим плунжером, которые разделены между собой перегородкой с центральным отверстием и седлом. На боковой поверхности

пневмоцилиндра выполнены выхлопные окна. Ресивер содержит реле давления, соединенное с приводами электромагнитных клапанов и электрокомпрессора. Камера создания импульсного давления снабжена эксплуатационным вантузом для удаления воздуха, а пружина плунжера установлена с возможностью регулировки ее жесткости. Плунжер выполнен полым и содержит тягу, жестко связанную с затвором электромагнитного клапана аспирационного патрубка.

При загрязнении полотна и снижении расхода до определенного уровня датчик расхода подает сигнал на включение электрокомпрессора, начинающего подавать сжатый воздух в ресивер.

Для контроля давления в ресивере предусмотрено реле давления, подвижные контакты которого устанавливаются на предельные значения давления, при которых реле срабатывает. При достижении заданного давления, контакты реле замыкаются и электроклапан на патрубке отвода очищенной жидкости закрывается, а электроклапан аспирационного патрубка открывается. При этом открывается отверстие, через которое исходная жидкость направляется через аспирационный патрубок на слив. Одновременно тяга, установленная подвижно внутри полости плунжера, отжимает плунжер вниз, смещая его относительно седла, с которым он образует плоский клапан. В кольцевой зазор между седлом и торцевой поверхностью плунжера попадает сжатый воздух высокого давления, площадь воздействия многократно увеличивается, что приводит к скачкообразному возрастанию силы давления на плунжер. Плунжер резко смещается вниз, преодолевая жесткость пружины, и вытесняет жидкость из полости пневмоцилиндра через выхлопные окна в полость фильтра. Через окна происходит импульсное истечение сжатого воздуха в полость фильтра. В ресивере падает давление, что уменьшает силу давления на плунжер и пружина плавно возвращает его в исходное положение. Реле давления обесточивает электроклапан аспирационного патрубка, что приводит к закрытию затвора. Одновременно открывается электроклапан подводящего патрубка, и датчик расхода анализирует величину расхода очищенной жидкости. Если расход не достиг нужного уровня,

процесс очистки повторяется: включается электрокомпрессор, сжатый воздух подается в ресивер и т.д.

При истечении сжатого воздуха через выхлопные окна в полости фильтра скачкообразно возрастает давление. В отверстиях сетки формируется импульсный гидропоток, направленный как в сторону воздушного колпака, так и в направлении аспирационного патрубка. Воздушный колпак играет роль демпферного устройства и снижает инерционные потери капора при движении гидропотока через сетку. Сжатый воздух в виде воздушного пузыря, попадая в среду с меньшим давлением, расширяется, всплывает в верхнюю часть камеры и удаляется через эксплуатационный вантуз. Загрязнения, отброшенные от сетчатого полотна, увлекаются потоком и удаляются в канализацию.

Процесс регенерации фильтрующего полотна полностью автоматизирован, позволяет осуществлять в широких пределах регулирование параметрами гидропотока. Это достигается возможностью регулировки давления в ресивере.

Источниками сжатого воздуха могут являться заводская пневмосистема или электрокомпрессор, например, от бытового холодильника.

Предлагаемое устройство не имеет ограничений по технике безопасности.

*НФУ с низкочастотной пневмопульсационной системой регенерации сетчатого полотна* Принципиальная схема НФУ представлена на рисунке 7.18 [148].

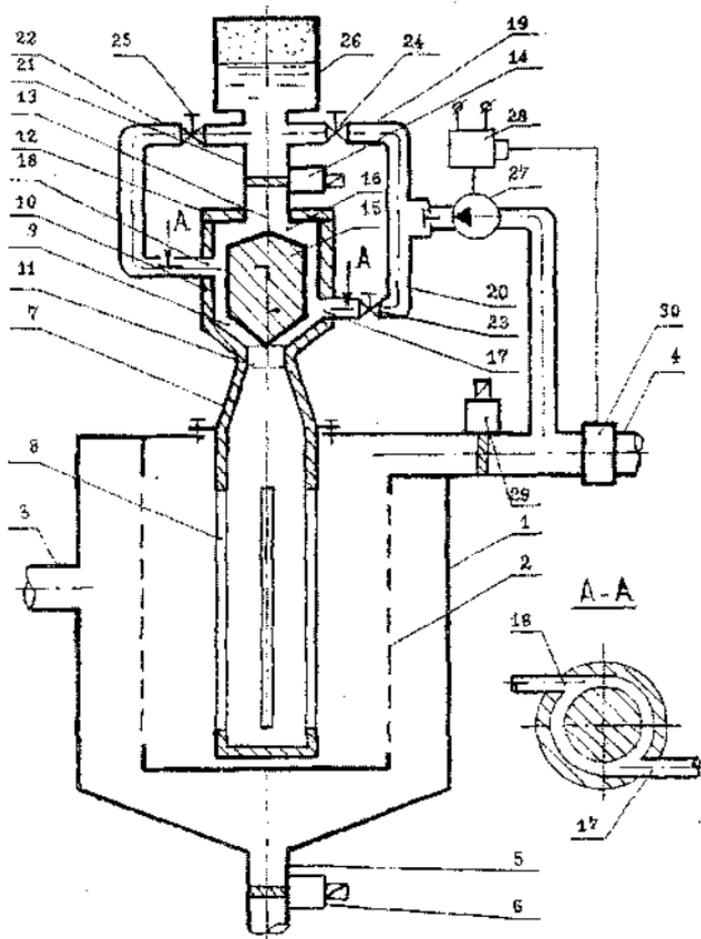


Рис. 7.18. Принципиальная схема НФУ с пневмульсационной системой регенерации сетчатого полотна

- 1 – корпус; 2 – фильтрующее сетчатое полотно; 3 – подводящий патрубок; 4 – патрубок отвода очищенной жидкости; 5 – аспирационный патрубок; 6 – электромагнитный клапан; 7 – резонатор; 8 – продольные отверстия; 9 – двухступенчатая кольцевая форсунка; 10 – боковая цилиндрическая стенка; 11 – сопло; 12 – верхняя торцовая крышка; 13 – отверстие; 14 – электромагнитный клапан; 15 – центральный элемент форсунки; 16 – кольцевой зазор; 17 и 18 – тангенциальные каналы; 19, 20, 21, 22 – патрубки; 23, 24, 25 – вентили; 26 – пневмоаккумулятор; 27 – насос; 28 – электродвигатель; 29 – электромагнитный клапан; 30 – датчик расхода жидкости

НФУ содержит корпус с воздушным колпаком, патрубок отвода очищенной жидкости с датчиком расхода и электромагнитным клапаном, аспирационный патрубок с электромагнитным клапаном, камеру создания импульсного давления, открытую к сетчатому фильтрующему потоку, источник питания и систему регенерации. Система регенерации содержит: резонатор с продольными отверстиями, установленный в верхней части камеры создания импульсного давления, питающий насос, присоединенный патрубками с вентилями к двухступенчатой кольцевой форсунке. Форсунка имеет два тангенциальных канала первой и второй ступеней и пневмоаккумулятор, установленный на трубке тангенциального канала второй ступени. Пневмоаккумулятор подключен посредством патрубка с электромагнитным клапаном к осевому каналу, выполненному в верхней торцевой крышке форсунки.

Система регенерации работает следующим образом. Как только расход снизится до определенного предела, включается датчик расхода жидкости, который подает сигнал на запуск электродвигателя насоса и открытие электромагнитного клапана на аспирационном патрубке. Насос одновременно подает воду в патрубки 19 и 20, откуда она попадает в форсунку, которая может работать в двух режимах: 1) низких частот (2-20 Гц); 2) средних частот (20-300 Гц).

Два режима могут применяться в зависимости от степени загрязнения сетки и прочностных качеств отложений.

В первом низкочастотном режиме вентили 23, 24, 25 открыты, а электромагнитный клапан 14 закрыт, это обеспечивает подачу воды в тангенциальные каналы 17 и 18, соответственно I и II ступеней форсунки. Потоки, поступающие в каналы обеих ступеней, смешиваются в камере закручивания и направляются в сопло форсунки. Особенностью течения через форсунку является развитие неустойчивого режима течения и возможность возникновения автоколебаний [80, 149].

Вихревая камера, находящаяся снаружи центрального элемента форсунки, обладает наибольшим коэффициентом усиления по мощности ( $k = 1 \div 5000$ ) среди всех струйных устройств [150].

Установка пневмоаккумулятора 26 позволяет изменять упругость патрубка и, таким образом, изменять время нарастания им-

пульса давления при автоколебаниях и регулировать частоту колебаний.

Вентиль 25 предназначен для регулировки расхода. Частота колебаний равна собственным частотам колебаний жидкости в патрубке 22 и пневмоаккумуляторе и зависит от объема газа в пневмоаккумуляторе 26, давления жидкости в патрубке 22, плотности жидкости и ее расхода. Амплитуда колебаний жидкости не зависит от частоты колебаний, а определяется форме зависимости  $p = f(Q)$ .

Возникающие колебания расхода на выходе из сопла форсунки переходят в колебания давления в резонаторе и передаются через отверстия 8 на загрязнения, находящиеся на сетке. Так как колебания накладываются на обратный ток воды через сетку, происходит эффективная отмывка сетчатого полотна.

Если сетчатое полотно загрязнено липкими, плохо смываемыми отложениями, форсунка может работать во 2-м режиме, который характеризуется большими амплитудами импульсов и большей частотой в интервале 20–300 Гц. В этом случае вентиль 25 перекрыт и открыты электромагнитный клапан 14 и вентили 23 и 24. Вода от насоса, подаваемая в тангенциальный канал 17 и отверстие 13 через кольцевой канал 16, попадает в вихревую камеру форсунки. Вентили 23 и 24 отрегулированы так, что основной поток проходит в тангенциальный канал 17, а дополнительный поток поступает через кольцевой канал 16.

На первом этапе основной закручивающий поток запирает дополнительный поток жидкости. Это приводит к росту давления в нем. Вихревое движение распространяется снизу вверх через кольцевой канал 16, отверстие 13 внутрь патрубка 21. Здесь растет давление, сжимается газ в пневмоаккумуляторе 26. На втором этапе, когда возрастание давления в дополнительном потоке уравнивается со значением центробежного давления на периферии жидкостного вихря, в кольцевом канале 16 форсунки происходит разрушение вихря, сопровождающееся выбросом жидкости из дополнительного канала и резким увеличением расхода. После этого давление в вихревой камере форсунки падает, образуется жидкостной вихрь, который запирает дополнительный поток в патрубке 21, сжимает газ в пневмоаккумуляторе, за-

тем вихрь разрушается и жидкость выбрасывается через сопло в фильтр. Автоколебания повторяются.

После регенерации насос отключают, клапан 6 закрывают, а клапан 29 открывают.

Использование 2-х режимов работы форсунки позволяет в широких пределах регулировать частоту и амплитуду гидродинамического воздействия на загрязнения, подбирать оптимальный режим регенерации. Применение форсунки для регенерации не препятствует использованию моющих веществ при сильных загрязнениях фильтра.

Главным достоинством применения двухступенчатой форсунки с пневмоаккумулятором для удаления загрязнений является отсутствие движущихся элементов, высокая надежность в работе, широкий амплитудный и частотный спектр воздействия на загрязнения, отсутствие ограничений по технике безопасности.

*НФУ с газопульсистой системой регенерации на основе жидкого азота* Гидродинамические импульсы, воздействующие на всю площадь сетчатого полотна, можно генерировать путем ввода жидкого азота в заполненную водой замкнутую полость фильтра [151].

Жидкий азот представляет собой легкоиспаряемую жидкость, имеющую температуру кипения –  $195,84^{\circ}\text{C}$ , скрытую теплоту испарения 40 ккал/кг. При испарении 1 л жидкого азота при нормальных условиях образуется приблизительно 670 л газа.

При превращении жидкого азота в газообразный могут возникнуть давления большого порядка. Скорость нарастания давления зависит от интенсивности преобразования. Эту скорость можно сделать очень большой, если мелкораспыленный жидкий азот выпрыснуть в воду. При этом в воде произойдет практически мгновенное испарение азота, вызывающее ударную волну и сопутствующий гидропоток, которые, действуя совместно, производят эффективную очистку сетчатого полотна напорного фильтра.

Испарение азота идет с поглощением теплоты из окружающей среды. Эту теплоту азот при испарении забирает у воды. Жидкий азот имеет высокую энергоемкость. При испарении 1 г-моль (28 г или 34 мл) жидкого азота выделяется энергия 2267 Дж и образуется 22100 мл газа при нормальных условиях. Работа с жидким азотом безопасна, испаряется он практически бесшумно. Азот

имеет низкую стоимость, так как является попутным продуктом при сжижении воздуха для получения инертных газов. Осуществление указанного способа не требует сложного оборудования.

На рисунке 7.19 изображена принципиальная схема фильтрующей установки, смонтированной на всасывающем патрубке насоса с газоимпульсной системой промывки на основе жидкого азота.

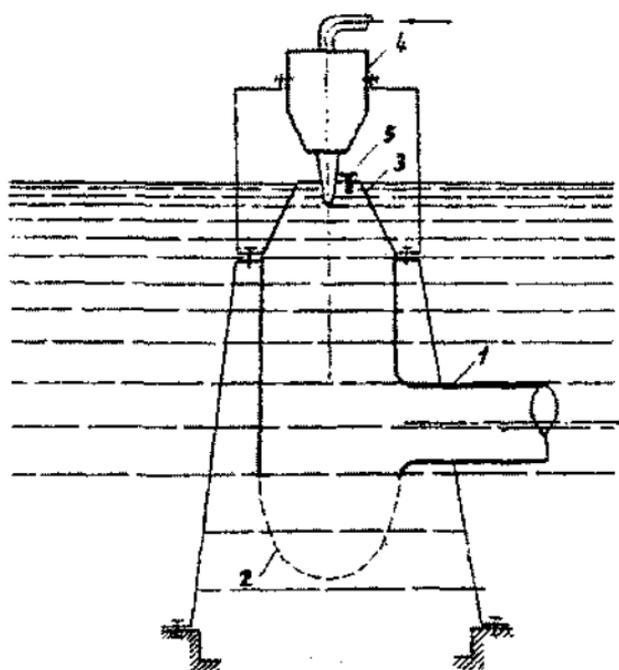


Рис. 7.19. Фильтрующая установка с газоимпульсной системой регенерации сетчатого полотна на основе жидкого газа

1 – всасывающий патрубок; 2 – сетчатый фильтр; 3 – крышка; 4 – дозатор; 5 – обратный клапан

Фильтрующая установка содержит: всасывающий патрубок, сетчатое полотно, крышку, дозатор для ввода жидкого азота и обратный клапан для его выпуска.

Как только потери на сетчатом полотне становятся выше допустимых, в замкнутую полость фильтра через дозатор впрыски-

вают жидкий азот, который, мгновенно испарившись, образует газовый поршень. Поршень воздействует на водяную пробку в фильтре и с большой скоростью вытесняет ее через сетчатое полотно. Происходит интенсивная промывка фильтра. Порционную подачу жидкого азота повторяют до полной очистки фильтра. Объем впрыскиваемого азота определяется степенью загрязненности полотна и его размерами.

**НФУ с гидроударной системой регенерации.** Для восстановления пропускной способности напорных фильтров можно использовать гидравлический удар, специально создаваемый в трубопроводе системы обратной промывки [152].

Принципиальная схема НФУ представлена на рисунке 7.20.

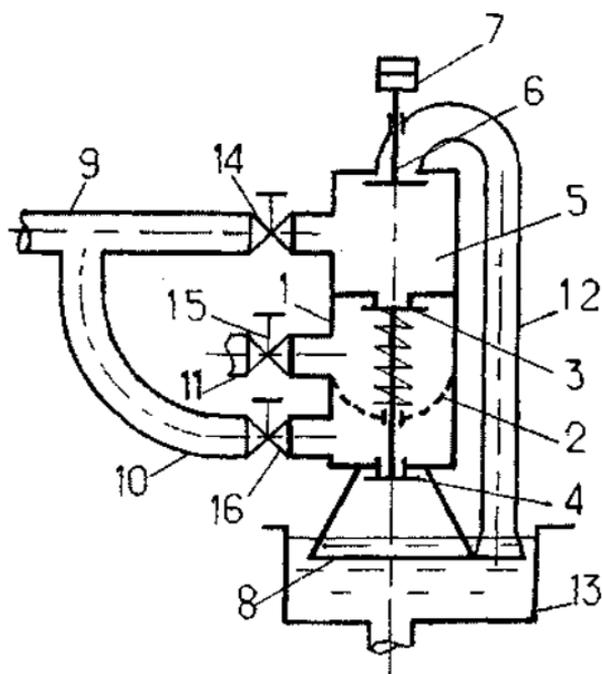


Рис. 7.20. НФУ с гидроударной системой регенерации:

- 1 – корпус фильтра; 2 – фильтрующая перегородка; 3 – нагнетательный клапан; 4 – сбросной клапан; 5 – рабочая камера; 6 – ударный клапан; 7 – сменные трузы; 8 – воздушный колпак; 9 – подводный трубопровод; 10 – входной патрубок; 11 – выходной патрубок; 12 – сифонный трубопровод; 13 – бак; 14; 15; 16 – вентили

Промывку осуществляют следующим образом. Открывают вентиль 14, а вентили 15 и 16 закрывают. Принудительно открывают ударный клапан, установленный на подводящем трубопроводе в рабочей камере. При этом вода вытекает из-под клапана через сифонный патрубок в бак для сбора загрязнений. Благодаря малому сопротивлению сифонного патрубка вода в подводящем трубопроводе разгоняется до высоких скоростей. При этом возрастает сила давления на ударный клапан, который захлопывается, и в рабочей камере возникает торможение потока, сопровождающееся гидравлическим ударом. Это приводит к быстрому открытию подпружиненных нагнетательного и сбросного клапанов. Движущаяся по инерции в подводящем трубопроводе жидкость через нагнетательный клапан попадает в воздушный колпак. Встречая по пути сетчатый фильтр, поток промывает его.

Под действием значительного перепада давлений между рабочей камерой и воздушным колпаком, создается мощный импульсный промывной поток, очищающий сетчатое полотно от загрязнений.

Изменяя вес и ход ударного клапана, жесткость пружины нагнетательного клапана, можно получать импульсный промывной поток с требуемыми промывочными скоростями.

Длительность  $t$  одного цикла промывки численно равна времени двойного пробега волны от фильтра к началу подводящего трубопровода и назад, т.е.

$$t = \frac{2l}{c}, \quad (7.9)$$

где  $l$  – длина подводящей трубы;  $c$  – скорость волны гидроудара.

При открытии нагнетательного клапана давление в рабочей камере становится равным нагнетательному напору  $H$ , который складывается из потерь напора на нагнетательном  $h_n$  и сбросном  $h_{сб}$  клапанах, сетке  $h_c$ , т.е.

$$H = h_n + h_{сб} + h_c. \quad (7.10)$$

После закрытия ударного клапана скорость в подводящей трубе уменьшается на величину [153]

$$u = \frac{gH}{c}, \quad (7.11)$$

где  $u$  – волновое изменение скорости.

В цикле промывки фильтра скорость  $v_n$  в подводящей трубе равна

$$v_n = v - u,$$

где  $v$  – скорость в подводящей трубе перед закрытием ударного клапана.

Тогда, объем воды, подаваемый при промывке на сетчатое плотно, будет равен

$$V = t \cdot v_n \cdot \omega_n = \frac{2l}{c} (v - u) \cdot \frac{\pi d_n^2}{4},$$

где  $\omega_n$  – площадь подводящей трубы диаметром  $d_n$ .

Расход промывки  $Q_n$  равен

$$Q_n = \frac{V}{t} = (v - u) \cdot \frac{\pi d_n^2}{4}.$$

Если обозначить через  $d_\phi$  диаметр корпуса фильтра, то согласно уравнению неразрывности

$$(v - u) \cdot \frac{\pi d_n^2}{4} = v_{п.с.} \cdot \frac{\pi d_\phi^2}{4}.$$

Отсюда скорость перед сеткой при промывке равна

$$v_{\text{п.с.}} = (v - u) \left( \frac{d_n}{d_\phi} \right)^2. \quad (7.12)$$

Окончательно после подстановки (7.10) и (7.11) в (7.12), получим

$$v_{\text{п.с.}} = \left[ v - \frac{g(h_n + h_{сб} + h_c)}{c} \right] \left( \frac{d_n}{d_\phi} \right)^2. \quad (7.13)$$

Из формулы (7.13) следует, что промывная скорость  $v_{\text{п.с.}}$  перед сеткой тем больше, чем меньше площадь корпуса фильтра, потери на клапанах и сетчатом полотне, а время промывки  $t$  согласно (7.9) тем дольше, чем больше длина подводящей трубы  $l$ .

### *Выводы по главе 7*

Из анализа известных способов регенерации напорных фильтров следует, что наибольшей эффективностью удаления загрязнений с поверхности фильтрующих перегородок обладают импульсно-противоточный и пульсационно-противоточный способы. Однако применяемые здесь типы устройств имеют низкую надежность и недолговечны. Поэтому перспективными являются установки с газоимпульсными системами регенерации, где для обеспечения импульсного воздействия на всю площадь фильтрующего полотна могут применяться различные газообразные энергоносители.

С учетом ряда допущений выполнены аналитические исследования расчета параметров промывного потока при очистке сетчатых напорных фильтров с использованием газообразных энергоносителей. Полученные формулы использованы при проектировании НФУ заданной производительности с системами газоимпульсной регенерации.

Эффективность регенерации проверена в лабораторных и производственных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплекса теоретических, экспериментальных и промышленных исследований изучены особенности применения газоимпульсно-реагентных и циркуляционных методов для регенерации скважинных фильтров и газоимпульсного метода на основе ВКГС для регенерации напорных фильтров.

При анализе традиционных высокоэнергетических импульсных методов установлено, что каждый из них в отдельности обладает достаточно узким спектром разрушающих факторов и поэтому не является универсальным методом для регенерации скважинных фильтров всех диаметров. Более широким спектром разрушающих факторов по сравнению с традиционными методами обладает газоимпульсный метод на основе ВКГС. Однако все методы недостаточно эффективны в длительно-эксплуатирующихся скважинах, которые в настоящее время составляют подавляющее большинство на водозаборах Республики Беларусь. Поэтому здесь более предпочтительно применение комбинированных методов, сочетающих вначале импульсную, а затем реагентную обработку фильтра, или газоимпульсную обработку непосредственно в реагенте.

Для равномерной реагентной очистки фильтра и прифилтровой зоны скважины от цементированного кольматирующего осадка предложено применять технологическую схему поинтервальной обработки с использованием скважинного устройства циркуляционной регенерации (СУЦР), предполагающего деление фильтра скважины в процессе регенерации горизонтальными и вертикальными пакерами на нагнетательные и всасывающие сектора.

Наряду с применением для газоимпульсной регенерации открытых снизу стальных взрывных камер, предложено для работы непосредственно в реагенте использовать герметичные цилиндрические и сферические взрывные камеры с тонкими эластичными оболочками.

Для описания гидродинамики подводного газового взрыва в закольматированном фильтре скважины составлены энергетические уравнения для процесса нульсаций газовых полостей в открытой снизу взрывной камере, герметичных цилиндрических и

сферических взрывных камерах с эластичными оболочками, находящихся в заполненной жидкостью скважинах. В теоретической модели учтены силы трения и инерции при движении жидкости.

Полученные нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка решались численными методами. Составлены программы расчета, позволявшие получить зависимости  $z(t)$ ,  $I$ ,  $v(t)$ ,  $R(t)$ ,  $\frac{dR}{dt}$ ,  $p(t)$  и теоретические формулы для расчета импульса давления  $I$  для перечисленных взрывных камер при различных параметрах скважин и камер.

Разработана методика теоретического расчета удельных затрат кислотного реагента  $HCl$ , позволяющая рассчитать его полный расход на скважину при планировании ее текущего ремонта. Методика основывается на балансе веществ в химических реакциях взаимодействия основных компонентов кольматирующих отложений ее фильтра с соляной кислотой. Исходными данными для расчета являются сведения о процентном содержании компонентов в кольматанте единичной массы данной скважины и параметры ее кольматации.

Лабораторные исследования эффективности комбинированной газоимпульсно-реагентной обработки натурального образца фильтра скважины показали, что несмотря на хорошие количественные результаты по увеличению удельного дебита модельной скважины после комбинированной обработки ( $q_5 = 137 q_0$ ), качественные показатели степени очистки каркаса фильтра и водоприемной поверхности соответственно составили всего (70-75)%. Это указывает на необходимость проведения последующих импульсной или виброимпульсной обработок после реагентной. Газоимпульсная обработка натурального образца фильтра взрывом ВКГС при давлениях  $p_{взр}$  менее второго предельного давления  $p_{II}$  ( $p_{взр} < p_{II}$ ) подтвердила образование мелких трещин, которые обладают эффектом «самозалечивания». Ширины созданных при таких давлениях взрыва ВКГС трещин оказались недостаточными для последующего внесения туда обратным гидропотоком относительно крупных частиц песка и их расклинивания с обеспечением устойчивой фильтрации воды.

Применение пневматического пакера подтвердило его более высокую эффективность по сравнению с манжетным пакером.

Разработано комбинированное технологическое оборудование для газоимпульсной обработки фильтра скважины, подачи реагента в фильтр, циклического его задавливания в пласт сжатым воздухом и эрлифтной откачки продуктов реакции, отличающееся простотой и безопасностью ведения работ.

Проведены геофизические и телеметрические исследования до и после газоимпульсно-реагентной обработки на скважине №56 водозабора «Боровляны», которые показали высокую эффективность разработанной в БНТУ комбинированной технологии и оборудования.

Предложена теоретическая модель движения установившегося горизонтального циркуляционного фильтрационного потока в процессе циркуляционно-реагентной регенерации, которая позволяет определять напор и скорость жидкости в любой точке прифильтровой зоны скважины с постоянной и измененной проницаемостями.

Оптимизация процесса показала, что в случае симметричной схемы циркуляции ( $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$  и  $\alpha = \beta$ ) максимальная скорость движения жидкости в закольматированной прифильтровой зоне скважины обеспечивается, когда фильтр скважины разделен на два сектора: нагнетательный и всасывающий ( $m = 1$ ).

Разработана технология циркуляционно-реагентной регенерации фильтров скважин на воду с применением СУЦР. Предложена методика определения параметров СУЦР на основе погружного электронасосного агрегата. Согласно основным конструктивным параметрам ( $m = 1$ ,  $L_y = 1,3 м$ ) и конструкторской документации, на ОАО «Завод Промбурвод» был изготовлен из коррозионно-стойких материалов опытный образец СУЦР на базе электронасосного агрегата ЭЦВ 5-10-65 с электродвигателем Franklin Electric мощностью 3 кВт. Опытный образец СУЦР был испытан на работоспособность в лаборатории ОАО «Завод Промбурвод».

В результате проведенных опытно-промышленных испытаний технологии циркуляционно-реагентной регенерации с применением СУЦР на скважине № 21<sup>в</sup> водозабора «Боровляны» удалось повысить удельный дебит скважины с 8 м<sup>2</sup>/ч до 25 м<sup>2</sup>/ч при про-

изводительности 40 м<sup>3</sup>/ч. Экономический эффект от внедрения технологии циркуляционно-реагентной регенерации составил Br24,226 млн. по состоянию на 01.11.2007 г.

Разработана конструкция извлекаемой скважины с повышенной ремонтпригодностью фильтра при проведении импульсно-реагентных обработок и с возможностью замены фильтра, при исчерпании им ресурса работы.

На основе анализа известных способов регенерации напорных фильтров установлено, что наибольшей эффективностью удаления загрязнений с поверхности фильтрующих перегородок обладают: импульсно-противоточный и пульсационно-противоточный способы. Предложено для обеспечения импульсно-противоточного воздействия на всю площадь фильтрующего полотна применять газообразные энергоносители.

С учетом ряда допущений, предложена теоретическая модель процесса промывки сетчатых напорных фильтров импульсным потоком, возникающим при расширении газообразных энергоносителей.

Разработана техническая документация на ряд напорно-фильтрующих установок с системами газоимпульсной регенерации. Эффективность регенерации проверена в лабораторных и производственных условиях. Предложены новые конструкции напорно-фильтрующих установок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
2. Ловля, С.А. Взрывные работы в водозаборных скважинах / С.А. Ловля. – М.: Недра, 1970. – 120 с.
3. Романенко, В.А. Электрофизические способы восстановления производительности водозаборных скважин / В.А. Романенко. – Л.: Недра, 1980. – 79 с.
4. Романенко, В.А. Восстановление производительности водозаборных скважин / В.А. Романенко, Э.М. Вольницкая. – Л.: Недра, 1986. – 112 с.
5. Алексеев, В.С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников. – М.: Агропромиздат, 1987. – 239 с.
6. Рекомендации по импульсно – реагентному восстановлению производительности скважин / В.С. Алексеев [и др.]; ВНИИ «ВОДГЕО»; под общей ред. В.С. Алексеева. – М., 1982. – 92 с.
7. Рекомендации по импульсным методам восстановления производительности скважин на воду / К.С. Боголюбов [и др.]; ВНИИ «ВОДГЕО»; под общей ред. К.С. Боголюбова. – М., 1979. – 114 с.
8. Щеголев, Е.Ю. Регенерация водозаборных скважин импульсными методами: дисс.... канд. техн. наук / Е.Ю. Щеголев. – М., 1987. – 140 л.
9. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
10. Балашканд, М.И. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях / М.И. Балашканд, С.А. Ловля. – М.: Недра, 1977. – 150 с.
11. Школьный, Н.П. Разработка виброимпульсного способа регенерации скважин на воду: дис. ... канд. техн. наук / Н.П. Школьный. – Ивано-Франковск, 1984. – 155 л.
12. Ивашечкин, В.В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин / В.В.Ивашечкин; под ред. А.Д. Гуриновича. – Минск: БНТУ, 2005. – 270 с.

13. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации: справочное пособие: в 6 т. / ред. кол.: Ю.М. Басарыгин [и др.]. – Москва: Недра, 2003. – Т. 5. – 431 с.

14. Carela Regeneriermittel lösen Eisen-, Mangan- und selbstverständlich alle Arten von Kalkablagerungen [Electronic resource] / R. Späne GmbH.–2007. – Mode of access: [http://www.carela.com/Trinkwasser/Regenerierung\\_von\\_Brunnen\\_und\\_Filter.htm](http://www.carela.com/Trinkwasser/Regenerierung_von_Brunnen_und_Filter.htm). – Дата доступа: 15.06.2007.

15. Технические характеристики и способ применения средств "МСК" и "Дескам" [Электронный ресурс] /ЗАО ГДХемикс. – 2007. – Режим доступа: <http://www.gdchemix.com/index.php?print=mskdesenergo3>. – Дата доступа: 01.06.2007.

16. Russel, L.F. Engineering and Design OPERATION AND MAINTENANCE OF EXTRACTION AND INJECTION WELLS AT HTRW SITES / L.F. Russel. – Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC, 2000. – 91.

17. Brunnenregenerierung. Stadtwerke osnabrück AG /SBF Wasser und Umwelt. – Moorbeerenweg, 1995. – 35 s.

18. Башкатов, Д.Н. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д.Н. Башкатов [и др.] – М.: Недра, 1988. – 268 с.

19. Ивашечкин, В.В. Опыт применения комбинированных технологий восстановления дебита водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, А.М. Шейко // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: материалы 6-й Междунар. науч.-технич. конф.: В 2 ч., Гродно, 1-2 ноября 2005 г. / ГрГУ; редкол.: А.И. Свириденко [и др.]. – Гродно, 2006. – Ч. 2. – С. 184–187.

20. Ивашечкин, В.В. Анализ эффективности восстановления дебита скважин водозабора г. Минска / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: материалы 6-й Междунар. науч.-технич. конф.: в 2 ч., Гродно, 1-2 ноября 2005 г. / ГрГУ; редкол.: А.И. Свириденко [и др.]. – Гродно, 2006. – Ч. 2. – С. 180–184.

21. Ивашечкин, В.В. Совершенствование комбинированной технологии регенерации фильтров водозаборных скважин /

В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, А.М. Шейко, А.В. Беляшев // Вестник БНТУ. – 2007. – № 6. – С. 20–26.

22. Шляйферт, М.А. Увеличение дебитов водяных скважин взрывом / М.А. Шляйфер, Э.М. Вольницкая. – М.: Недра, 1970. – 61 с.

23. Иванов, С.И. Анализ научных и практических решений закачивания скважин / С.И. Иванов [и др.]. – Книга 2. – Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 266 с.

24. Аксельруд, Г.А. Растворение твердых веществ / Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов. – Москва.: «Химия», 1977. – 272 с.

25. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: «Наука», 1967. – 491 с.

26. Алексеев, В.С. Технология реагентной регенерации скважин на воду / В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников. – М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1985. – 72 с. – (Обзорная информация / М-во мелиорации и вод. хоз-ва СССР, обводнение и сельхоз. водоснабжение).

27. Исследование режимов регенерации и технологии реагентного восстановления водозаборных скважин коммунальных систем водоснабжения. Выбор направлений исследований: отчет о НИР (Промежут.) / БелКТИГХ; рук. темы Э.А. Макарова. – Минск, 1983. – 59 с. – № ГР 01830030052.

28. Исследование режимов регенерации и технологии реагентного восстановления водозаборных скважин коммунальных систем водоснабжения. Экспериментальные исследования: отчет о НИР (Промежут.) / БелКТИГХ; рук. темы Э.А. Макарова. – Минск, 1984. – 29 с. – № ГР 01830030052.

29. Исследование режимов регенерации и технологии реагентного восстановления водозаборных скважин коммунальных систем водоснабжения: отчет о НИР (Закл. Ч. 1) / БелКТИГХ; рук. темы Э.А. Макарова. – Минск, 1987. – 70 с. – № ГР 01830030052.

30. Исследование режимов регенерации и технологии реагентного восстановления водозаборных скважин коммунальных систем водоснабжения: отчет о НИР (Закл. Ч. 2) / БелКТИГХ; рук. темы Э.А. Макарова. – Минск, 1987. – 110 с. – № ГР 01830030052.

31. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 2-е изд. – М.: Недра, 1976. – 334 с.

32. Устройство для реагентной обработки герметизированной скважины: а. с. 956760 СССР, МКИ5 Е 21В 43/00 / В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников, Б.С. Краковский, А.В. Чибисов, Г.Ф. Еремеев ; ВНИИ ВОДГЕО. – № 3245503/22 –3; заявл. 9.02.81; опубл. 07.09.82.

33. Милихикер, А.Г. Осадкообразование в скважинах водопонижения / А.Г. Милихикер. – Москва: «Энергия», 1971. – 103 с.

34. Восстановление производительности водозаборных скважин. Технология реагентной регенерации скважин [Электронный ресурс] / ГНЦ РФ ФГУП «НИИ ВОДГЕО» – 2007. – Режим доступа: [http://www.watergeo.ru/tec\\_pit\\_regen.shtml](http://www.watergeo.ru/tec_pit_regen.shtml). – Дата доступа: 04.06.2007.

35. 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.

36. Analysis of Development Methods for Gravel Envelope Wells [Electronic resource] / Roscoe Moss Company. – 2007. – Mode of access: <http://www.roscoemoss.com/development-methods.html>. – Date of access: 05.06.2007.

37. Wirtschaftliche und umweltschonende Brunnenregenerierung nach dem System Hölscher Wasserbau [Electronic resource] / Hölscher Wasserbau GmbH. – 2006. – Mode of access: [http://www.hoelscher-wassbau.de/seiten/brunnen.php?ebene=3&name=Brunnensanierung%20und%20Brunnenregenerierung&letzte\\_ebene=3](http://www.hoelscher-wassbau.de/seiten/brunnen.php?ebene=3&name=Brunnensanierung%20und%20Brunnenregenerierung&letzte_ebene=3). – Date of access: 15.05.2006.

38. Untersuchungen zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung, Dresden, Juli 2003 J. / Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V.: F. Börner (Geschäftsführer DGFZ e. V.). – Dresden, 2003. – 108 s.

39. Houben, G. Regenerierung und sanierung von Brunnen / G. Houben, C. Treskatis. – München: Oldenbourg industriever, 2003. – 280 s.

40. Brunnenregenerierung mit dem WellReg Verfahren [Electronic resource] / GmbH «Aquaplus Brunnensanierung». – 2007. – Mode of access: <http://www.brunnenservice.de/dienst/reg.html>. – Date of access: 01.06.2007.

41. Vorrichtung zum Reinigen von brunnenschächten: pat. 3445316 DE, E 03B 3/15 /J. Pfening, K. Meinig, A. Butenschön; Charlottenburger Motoren-und Geratebau KG, Berlin. – № P3445316.4; filed 7.12.1984; pub. 19.16.1986.

42. Verfahren und Vorrichtung zur hydromechanischen Regenerierung von Vertikalfilterbrunnen: pat. 243524 DD, E 03B 3/15 / D. Eichhorn, H. Klinger, W. Pftzner, H. Heppner; VEB Projektierung Wasserwirtschaft, Hale. – № WP 03 B/ 284 505 1; filed 17.12.1985; pub. 04.03.1987.

43. Brunnenregenerierung – Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen, Wiesbaden, 1992 J. / DVGW/FIGAWA-Seminar «Brunnenregenerierung und sanierung»: S.Normann-Schmidt, K.F. Paul. – Stadtwerk Wiesbaden, 1992. – 203 s.

44. Brunnenregenerierung mit dem WellReg-Online-Verfahren [Electronic resource]/ GmbH «Aquaplus Brunnensanierung». – 2007. – Mode of access: <http://www.brunnenservice.de/dienst/online.html>. – Date of access: 01.06.2007.

45. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы: учебное пособие для вузов / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.

46. Кривченко, Г.И. Гидравлические машины: Турбины и насосы: учебное пособие для вузов / Г.И. Кривченко. – Москва: Энергия, 1978. – 320 с.

47. Regenerierung von Brunnen und Filtern [Electronic resource]/ R. Späne GmbH. – 2006. – Mode of access: [http://www.carela.com/Trinkwasser/Regenerierung\\_von\\_Brunnen\\_und\\_Filter.htm](http://www.carela.com/Trinkwasser/Regenerierung_von_Brunnen_und_Filter.htm). – Date of access: 25.05.2006.

48. Тесля, В.Г. Технология циркуляционной регенерации скважин / В.Г. Тесля // Сб. науч. тр. / МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. – М., 1985. – Вып. 74: Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников. – С. 114–121.

49. Устройство для циркуляционной обработки скважин на воду: а. с. 1182129 СССР, ЕОЗВ 3/18, Е21В 43/22 / В.С. Алексеев, Г.М. Коммунар, В.Г. Тесля; ВНИИ ВОДГЕО. – № 3721443/23-26; заявл. 02.02.84; опубл. 30.09.85 // Патент. – 1985.

50. Тесля, В.Г. Циркуляционная регенерация скважин и пласта: дис. ... канд. техн. наук: 04.00.06 / В.Г. Тесля. – М., 1986. – 144 с.
51. Тесля, В.Г. Циркуляционная регенерация скважин и пласта: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 04.00.06 / В.Г. Тесля. – М., 1986. – 23 с.
52. Коул, Р. Подводные взрывы / Р. Коул. – М.: Иностранная литература, 1950. – 418 с.
53. Физика взрыва / Ф.А. Баум [и др.]. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
54. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. – М.: Мир, 1968. – 286 с.
55. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
56. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1975. – 215 с.
57. Идельчик, И.Е. Гидравлическое сопротивление кольцевых поворотов на  $180^{\circ}$  / И.Е. Идельчик, Я.Л. Гинзбург // Теплоэнергетика. – 1968. – № 4.
58. Кочетов, В.Т. Сопротивление материалов / В.Т. Кочетов, А.Д. Павленко, М.В. Кочетов. – Ростов н/Д.: Феникс, 2001. – 366 с.
59. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / Т.М. Башта [и др.]; под ред. Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1970. – 504 с.
60. Варвак, П.М. Справочник по теории упругости / П.М. Варвак, А.Ф. Рябов; под ред. П.М. Варвака. – Киев: Будивельник, 1971. – 418 с.
61. Ивашечкин, В.В. Расчет пульсаций продуктов цилиндрического подводного газового взрыва в скважине / В.В. Ивашечкин, В.В. Верременюк // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2008. – № 2. – С. 79–90.
62. Ивашечкин, В.В. Расчет пульсаций продуктов сферического подводного газового взрыва в скважине / В.В. Ивашечкин, В.В. Верременюк // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2008. – № 4. – С. 77–82.
63. Башта, Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

64. Гуленко, В.И. Теоретическое и экспериментальное исследование некоторых типов источников упругих волн на основе водородно-кислородной газовой смеси: дис. ... канд. геол. минералогич. наук / В.И. Гуленко. – М., 1982. – 218л.

65. Ивашечкин, В.В. Опыт применения комбинированных технологий восстановления дебита водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, А.М. Шейко // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: Тезисы докладов 6-й Междунар. науч.-технич. конф, Гродно, 1–2 ноября 2005 г. / Гроднен. гос. ун-т; редкол.: А.И. Свириденко [и др.]. – Гродно, 2005. – С. 78–79.

66. Ивашечкин, В.В. Опыт применения импульсно-вибро-реагентной технологии восстановления дебита водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович // Инф. Бюллетень научно-произв. ассоциации «Аквабел». – Минск, 2004. – № 7. – С. 9-10.

67. Ивашечкин, В.В. Анализ эффективности восстановления дебита скважин водозаборов г. Минска / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тезисы докладов 6-й междунар. науч.-технич. конф., Гродно, 1-2 ноября 2005 г.: / ГрГУ; редкол.: А.И. Свириденко [и др.]. – Гродно, 2005. – С. 83.

68. Ивашечкин, В.В. Лабораторные исследования по оценке эффективности декольматации фильтров скважин / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович, В.В. Губин // Вестник БНТУ. – 2008. – № 1. – С. 10–14.

69. Ивашечкин, В.В. Основы расчета необходимого давления для декольматации прифильтровой зоны водозаборной скважины // Вестник БНТУ. – 2003. – № 5. – С. 10–16.

70. Ивашечкин, В.В. Методика расчета удельных затрат кислотных реагентов для регенерации фильтров водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, Э.А. Макарова, А.Н. Кондратович // Энергетика- Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2007. – № 6. – С. 78–85.

71. Ивашечкин, В.В. Совершенствование комбинированной технологии регенерации фильтров водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, А.М. Шейко, А.В. Беляшев // Вестник БНТУ. – 2007. – № 6. – С. 20–26.

72. ГОСТ 4011-76.

73. Руководство по химическому и технологическому анализу воды. – М.: Стройиздат, 1973 г.

74. Чуриков, В.А. Разработка и исследование метода электро-вибрационной регенерации скважин на воду // Дис. канд. техн. наук. – Ивано-Франковск, 1980. – С.178.

75. Мещанский, А.Б. Экспериментальные исследования контактных фильтров и применение ультразвука для борьбы с кольматацией // Сб. трудов совещ. по вопросам понижения уровня вод. – 1966. – С.17-22.

76. Верстов, В.В. Динамические способы разглинзации скважин на воду / В.В. Верстов, М.Г. Цейтлин, Л.Л. Либин // Специальные работы в промышленном строительстве. Вып.4(45). – ЦБНТИ ММСС СССР. – 1976.

77. Гаврилко, В.М. / Опыт виброреагентной регенерации скважин на воду / Гаврилко В.М., Алексеев В.С., Верстов В.В., Соколов А.С. // Тр. ВНИИ ВОДГЕО, вып. 52. –1976. – С.8-9.

78. Гадиев, С.М. / Использование гидравлических золотниковых вибраторов для обработки скважин / С.М. Гадиев // Нефтяное хозяйство. 1972. – №2 – С.42–45.

79. Валиулин, Б.Е. / Некоторые особенности технологии виброобработки продуктивного пласта и РНТС / Б.Е. Валиулин // Сер. Нефтепромысловое дело. 1973. – № 11 – С. 13–16.

80. Бородин, В.А. / Распыление жидкости / В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.И. Ягоднн. – М.: Машиностроение, 1967. – 245 с.

81. Дыбленко, В.П. / Повышение продуктивности и реаннмация скважин с применением виброволнового воздействия / Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А. // Нефтяно-Бизнесцентр. 2000. – 381 с.

82. Дыбленко, В.П. / Технология освоения и повышения производительности скважин с использованием виброволнового воздействия / В.П. Дыбленко, А.Н. Кондратович, В.В. Ивашечкин // Вода. – Минск, 2002. – № 5. – С. 24.

83. Королькевич, А.В. / Газогидроимпульсное воздействие на призабойную зону пласта / А.В. Королькевич, А.Н. Кондратович,

Н.Ф. Кагарманов, В.П. Дыбленко // Научное обеспечение стабилизации добычи нефти в Башкирии: сб. науч. трудов БашНИПИ-нефть. Вып. 77 – Уфа. – 1988. – С. 181–185.

84. Конратович, А.Н. / Способ обработки призабойной зоны скважины и устройство для его осуществления / А.Н. Конратович, А.В. Королькевич, В.В. Ивашечкин, Н.Ф. Кагарманов, В.П. Дыбленко // А.с. СССР № 1693921. – 1991. – (ДСП).

85. Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам в скважинах / под ред. Н.Г. Григоряна. – М. Недра, 1982. – 258 с.

86. Разрушение неметаллов и композитных материалов. – М.: Мир, 1976. – Т. 7. – 470 с.

87. Шейко, А.М. Моделирование установившегося циркуляционного движения жидкости в прифильтровой зоне скважины / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин, Ю.В. Пулко // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2007. – № 4. – С. 77 – 87.

88. Шейко, А.М. Лабораторные исследования кинетики выщелачивания кольматирующих отложений дитионитом натрия / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин // Мелиорация переувлажненных земель. – 2007. – № 2. – С. 163–170.

89. Маскет, М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. – Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 628 с.

90. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики: учебник для студ. физико-математических спец. ун-тов / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. – 7-е изд. – М.: Изд-во Московского ун-та: Наука, 2004. – 798 с.

91. 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.

92. Ивашечкин, В.В. Статистический анализ продолжительности работы скважин и факторов, влияющих на их старение / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко. // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24-25 мая 2004 г.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2004. – Т. 1. – С. 113–115.

93. Муфтахов, А.Ж. К расчету дебита скважин с измененной проницаемостью призабойной зоны / А. Ж. Муфтахов // Сб. науч.

тр. / НИИ ВОДГЕО. – М., 1966. – Вып. 13: Гидрогеология. – С. 181–185.

94. САД'ы: Mathcad V11.A, Matlab v6.5, Mathematica v5.0, Maple v9.01: учебники, справочники на русском языке [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – М.: ООО «Сигма», 2005. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

95. Шейко, А.М. Определение оптимальных конструктивных параметров секторного устройства циркуляционно-реагентной регенерации / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин, В.В. Верременюк // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. – № 1. – С. 83–89.

96. Алексеев, В.С. Опыт циркуляционной регенерации водозаборных скважин / В.С. Алексеев, Г.М. Коммунар, В.Г. Тесля // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 9. – С. 9–10.

97. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциальных и интегральных исчислений: в 3 т. / Г.М. Фихтенгольц. – 4-е изд. – М.: Наука, 1966. – 3 т.

98. Старинский, В.П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: учебное пособие / В.П. Старинский, Л.Г. Михайлик. – Минск: Высшая школа, 1989. – 269 с.

99. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергия, 1975. – 600 с.

100. Ананьев, В.П. Инженерная геология: учебник для строительных вузов / В.П. Ананьев, В.И. Коробкин. – М.: Высшая школа, 1973. – 300 с.

101. Ивашечкин, В.В. Интенсификация растворения кольматирующих отложений водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин, В.В. Губин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович // Мелиорация переувлажненных земель. – 2006. – № 1. – С. 83–88.

102. Ивашечкин, В.В. Методы интенсификации разрушения и растворения кольматирующих отложений / В.В. Ивашечкин, Ю.П. Ледян, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович, В.В. Губин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2-3 мая 2005 г.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 460–461.

103. Гребенников, В.Т. Восстановление дебита скважин дитионитом натрия / В.Т. Гребенников // Гидротехника и мелиорация. – 1976. – № 1. – С. 92–95.

104. Алексеев, В.С. Применение полифосфатов для восстановления дебита скважин / В.С. Алексеев, Н.Д. Бессонов, В.Т. Гребеников // Гидротехника и мелиорация. – 1974. – № 6. – С. 90–97.

105. Шейко, А.М. Циркуляционная регенерация фильтра скважины / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, – 23-24 мая 2007 г.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 331–333.

106. Устройство для реагентной обработки скважины: пат. 10296 Респ. Беларусь, МПК Е 03В/00 Е 21В 43/00 / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин, И.А. Герасименко, Ал. М. Шейко; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20051082; заявл. 09.11.2005; опубл. 30.08.2007.

107. Устройство для реагентной обработки скважины: пат. 9930 Респ. Беларусь, МПК Е 03В/00 Е 21В 43/00 / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович, Ю.П. Ледян, В.В. Губин; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20050620; заявл. 22.06.2005; опубл. 28.02.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 5. – С. 109.

108. Устройство для циркуляционной обработки скважины на воду: пат. 10294 Респ. Беларусь, МПК Е 03В/00 Е 21В 43/00 / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин, И.А. Герасименко; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20050552; заявл. 02.06.2005; опубл. 28.02.2007.

109. Шейко, А.М. Циркуляционная регенерация фильтров водозаборных скважин / А.М. Шейко // НИРС-2005: сборник тезисов докладов 10 республикан. науч. конф. студ. и аспирантов высш. учебн. заведений РБ, Минск, 2006 г.: в 3 ч. / РУМЦ ФВН; редкол.: А.Н. Жук [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 2. – С. 17–18.

110. Шейко, А.М. Технология циркуляционной декольматации фильтров водозаборных скважин / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин // Аграрная энергетика в XXI столетии: материалы 3-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2005 г.: / Институт энергетике АПК НАН Беларуси; редкол.: В.И. Русан [и др.]. – Минск, 2005. – С. 208–210.

111. Ивашечкин, В.В. Газодинамический способ восстановления дебита водозаборных скважин с использованием водородно-

кислородной смеси: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / В.В. Ивашечкин. – М., 1987. – 19 с.

112. Козорез, А.С. Агрегаты электронасосные скважинные для воды. Каталог / А.С. Козорез, З.И. Гринцевич, В.З. Гринцевич. – Минск: 2006. – 80 с.

113. Козорез, А.С. Погружные скважинные электронасосные агрегаты. Эксплуатация и технический сервис / А.С. Козорез, В.С. Ивашко. – Минск: «Институт энергетики», 2006. – 186 с.

114. Желобовский, А.Г. Технологическая эффективность забора и подъема воды из скважин по обсадным трубам: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / А.Г. Желобовский. – Минск, 1985. – 134 с.

115. Гуринович, А.Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения. – Минск: ТЕХНОПРИНТ, 2001. – 305 с.

116. Тугай, А.М. Водоснабжение из подземных источников: справочник / А.М. Тугай, И.Т. Прокопчук. – Киев.: Урожай, 1990. – 264 с.

117. Беляков, В.М. Учебная книга мастера по бурению скважин на воду / В.М. Беляков, В.А. Попков, Г.М. Краснощеков. – М.: Колос, 1976. – 295 с.

118. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении: пат. 9453 Респ. Беларусь, МПКС1, Е21В43/00, В03В 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. – 2006.

119. Ивашечкин, В.В. Опыт бурения скважин с обратной промывкой в сложных гидрогеологических условиях / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, А.Г. Марченко, А.Т. Дрожжа // Вестник БНТУ. – 2005. – № 3. – С. 21–26.

120. СНиП 2.04.02.-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 136 с.

121. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / Дубровский В.В. [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1972. – 512 с.

122. Коваленко, В.П. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений / В.П. Коваленко, А.А. Ильинский. – М.: Химия, 1982. – 272 с.

123. Жужиков, В.А. Фильтрование / В.А. Жужиков. – М.: Химия, 1971. – 440 с.
124. Малиновская, Т.А. Разделение суспензий в промышленности органического синтеза / Т.А.Малиновская. – М.: Химия, 1971. – 320 с.
125. Чертков, Я.Б. Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив / Я.Б. Чертков, К.В. Рыбаков, В.Н. Зрелов. – М.: Химия, 1970. – 240 с.
126. Берестюк, Г.И. Регенерация фильтров для разделения суспензий / Г.И.Берестюк. – М.: Химия, 1978. – 96 с.
127. Химицкий, К.Ф. Гидравлические исследования вращающихся сеток и сетчатых камер промышленных водоприемников: автореф. ... дис. канд. техн. наук / К.Ф. Химицкий; МИСИ. – М., 1962.
128. Лонд, Х.Я. Исследование микрофильтрации для предварительной очистки питьевых вод: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Х.Я. Лонд-Каунас., 1966.
129. Альтшуль, А.Д. Гидравлическое сопротивление сеток с квадратными ячейками / А.Д. Альтшуль, Н. Краснов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1967. – № 9. – С. 19–24.
130. Краснов, Н.С. Исследование гидравлического сопротивления сетчатых фильтров: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Н.С. Краснов. – М., 1968.
131. Кузьмин, Ю.М. Напорные сетчатые фильтры систем водоснабжения: автореф. ... дис. д-ра техн. наук / Ю.М.Кузьмин; ВВИТКУ. – Л., 1969.
132. Кузьмин, Ю.М. Сетчатые установки систем водоснабжения: справочное пособие / Ю.М.Кузьмин. – Л.: Стройиздат (Ленинград. отд-ние), 1976. – 160 с.
133. Журба, М.Г. Микроорошение. Проблемы качества воды / М.Г. Журба. – М: Колос, 1994. – 205 с.
134. Водозаборно-очистные сооружения и устройства: учеб. пособие для студентов вузов / М.Г. Журба [и др.]; под ред. М.Г. Журбы. – М.: ООО «Издательство Астрель», 2003. – 569 с.
135. Колодный, Ю.И. Использование дисковых фильтров «ARKAL» / Ю.И. Колодный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 3. – С. 30–31.

136. Романенко, В.А. Экспериментальные исследования способа очистки фильтрующего полотна напорных сетчатых фильтров гидродинамическим воздействием электрического разряда в жидкости: автореф. ... дис. канд. тех. наук / В.А.Романенко. ЛИСИ. – Л., 1969. – 30 с.

137. Ивашечкин, В.В. Основы расчета газоимпульсной регенерации напорных сетчатых фильтров / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, Г.К. Добриян, В.Г. Щербаков // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 1993. – № 3-4. – С. 124–128.

138. Ивашечкин, В.В. Методика определения скорости промывного потока при газоимпульсной регенерации напорных фильтров / В.В. Ивашечкин, Г.К. Добриян, П.В. Ивашечкин // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2002. – № 5. – С. 67–73.

139. Автоматическое устройство для очистки сетчатых фильтров: а.с. 969294, МКИ В01D37/04 / Д.А.Козлов, В.В. Ивашечкин: Белорусский политехнический институт – №3210556; заявл. 02.12.80; опубл. 30.10.82//Открытия. Изобрет. – 1982. – № 40.

140. Ивашечкин, В.В. Определение эффективности регенерации напорных фильтров газоимпульсным методом. / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 1992. – № 9-10. – С. 119–122.

141. Козлов, Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, А.Ф. Темнов. – М.: Машиностроение, 1982. – 261 с.

142. Ивашечкин, В.В. Напорно-фильтрующая установка с системой газоимпульсной очистки / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович // Вода. – 2001. – № 4. – С. 20–21.

143. Ивашечкин, В.В. Напорно-фильтрующая установка для осветления воды оборотных систем водоснабжения / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович // Вода. – 2002. – № 5. – С. 24.

144. Устройство для очистки сетчатых фильтров: а.с. 1775133, МКИ В01D 35/16 / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, Д.А. Козлов, Л.С. Космович, М.Р. Слепая, Г.В. Лукинский; Белорусский политехнический институт и Минский тракторный завод – №4787295; заявл. 30.01.90; опубл. 15.11.92 // Открытия. Изобрет. – 1992. – № 42.

145. Устройство для очистки сетчатых фильтров: а.с. 1673168, МКИ В01D37/04 / Б.А. Барбанель, В.В. Ивашечкин, Ю.П. Ледян, А.Н. Кондратович; Белорусский политехнический институт-№4732884/26; заявл. 30.08.89; опубл. 30.08.91 // Открытия. Изобрет. – 1991. – № 32.

146. Патронный фильтр: а.с. 1126311, МКИ В01D27/12 / В.И. Закерничный, Д.А. Козлов, В.В. Ивашечкин, С.В. Соболевский; Белорусский политехнический институт – №3489830; заявл. 07.09.82; опубл. 30.11.84 // Открытия. Изобрет. – 1984. – № 44.

147. Устройство для очистки сетчатых фильтров: пат. 8672 Респ. Беларусь / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, И.В. Качанов, В.П. Белькевич; заявитель Белорусский национальный технический университет – №а20031238; заявл. 29.12.03, опубл. ... // Афіцыйны бюл./цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007.

148. Устройство для очистки сетчатых фильтров: пат. 8671 Респ. Беларусь / В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, И.В. Качанов, В.П. Белькевич; заявитель Белорусский национальный технический университет – №а20031235; заявл. 29.12.03, опубл. ... // Афіцыйны бюл./цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007.

149. Распыливание жидкости / Ю.Ф. Дитякин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

150. Денисов, А.А. Электрогидро-электрогазодинамические устройства автоматики / А.А. Денисов, В.С. Нагорный. – Л: Машиностроение, 1979. – 250 с.

151. Способ регенерации напорных фильтров: а.с. 1063439, МКИ В01D 35/16 / В.В. Ивашечкин, Д.А. Козлов, Н.П. Матвейко; Белорусский политехнический институт – №3435801; заявл. 12.05.82; опубл. 30.12.83 // Открытия. Изобрет. – 1983. – № 48.

152. Ивашечкин, В.В. Использование гидроудара для регенерации напорных фильтров/В.В.Ивашечкин, И.А. Шульпин // Строительство и архитектура: материалы 47-й науч.-тех.конф., посвящ. 70-летию Белорус. политех. инст.: редкол.: В.Н. Чачин [и др.]. – Минск, 1992. – С. 125.

153. Овсебян, В.М. Гидравлический таран и таранные установки / В.М. Овсебян. – М.: «Машиностроение», 1968. – 124 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА 1. Краткая характеристика высокоэнергетических импульсных и реагентных методов регенерации фильтров водозаборных скважин.....	5
1.1. Высокоэнергетические импульсные методы.....	5
1.2. Газоимпульсный метод регенерации фильтров скважин.....	11
1.3. Реагентные методы регенерации скважин.....	15
1.3.1. Анализ эффективности существующих реагентных методов и устройств регенерации скважин.....	15
1.3.2. Существующие циркуляционные способы регенерации: средства и пути совершенствования.....	19
ГЛАВА 2. Гидродинамика подводного газового взрыва в закольматированной водозаборной скважине.....	32
2.1. Основные теоретические положения.....	32
2.2. Гидродинамика подводного газового взрыва в полузамкнутой камере, находящейся в скважине.....	34
2.3. Расчет пульсаций продуктов газового взрыва в замкнутых эластичных оболочках, находящихся в скважине.....	45
2.3.1. Работа деформации тонких эластичных оболочек.....	45
2.3.2. Расчет пульсаций продуктов цилиндрического подводного газового взрыва в скважине.....	47
2.3.3. Расчет пульсаций продуктов сферического подводного газового взрыва в скважине.....	62
2.4. Влияние конденсации водяных паров на величину второго пика давления.....	73
ГЛАВА 3. Совершенствование комбинированной технологии восстановления дебита скважин.....	77

3.1. Лабораторные исследования эффективности декольматация комбинированными методами.....	77
3.2. Теоретический расчет удельных затрат кислотных реагентов.....	86
3.3. Полевые испытания комбинированной технологии .....	99
3.4. Технология виброволнового воздействия на призабойную зону скважин .....	114
3.5. Использование импульсных методов при восстановлении дебита нефтяных скважин.....	125
<b>ГЛАВА 4. Гидродинамические закономерности распределения давления и скорости в процессе циркуляции при разделении фильтра скважины на сектора.....</b>	<b>133</b>
4.1. Математическое моделирование установившегося циркуляционного движения жидкости при разделении фильтра скважины на ряд нагнетательных и всасывающих секторов.....	133
4.2. Экспериментальные и теоретические исследова- ния параметров циркуляционного потока жидкости от нагнетательного к всасывающему сектору.....	142
4.3. Исследование распределения параметров циркуляционного потока жидкости при равенстве расходов и углов нагнетательного и всасывающего секторов.....	152
4.4. Анализ радиальной и угловой составляющих скорости циркуляции жидкости в прифилтровой закольматированной зоне.....	154
<b>ГЛАВА 5. Разработка технологии циркуляционно- реагентной регенерации скважин на воду.....</b>	<b>168</b>
5.1. Лабораторные исследования кинетики выщелачивания кольматирующих отложений. Определение продолжительности процесса регенерации...	168
5.2. Оценка эффективности восстановления прои- цаемости фильтра и прифилтровой зоны модельной скважины при циркуляционно-реагентной регенерации.....	174

5.3. Обоснование технологических схем циркуляционно-реагентной регенерации.....	178
5.4. Выбор параметров технологии циркуляционно-реагентной регенерации.....	181
5.5. Методика определения длины сектора устройства циркуляционной регенерации на основе погружного электронасосного агрегата.....	183
5.6. Результаты внедрения технологии циркуляционно-реагентной регенерации.....	188
<b>ГЛАВА 6. Совершенствование ремонтпригодности и технологии сооружения водозаборных скважин.....</b>	<b>192</b>
6.1. Новая конструкция скважины с высокой степенью ремонтпригодности.....	193
6.2. Опыт бурения скважин с обратной промывкой в сложных гидрогеологических условиях.....	196
<b>ГЛАВА 7. Разработка напорных фильтрующих установок с газоимпульсными системами регенерации...</b>	<b>211</b>
7.1. Существующие методы и конструкции напорных фильтрующих установок для удаления загрязнений из жидкостей.....	211
7.2. Теоретические основы газоимпульсной регенерации напорных сетчатых фильтров.....	222
7.3. Экспериментальные исследования газоимпульсного способа регенерации сетчатых напорных фильтров.....	232
7.4. Новые фильтрующие установки с импульсно-противоточными системами регенерации фильтрующего полотна.....	238
Заключение.....	255
Литература .....	259

**Научное издание**

**ИВАШЕЧКИН Владимир Васильевич  
ШЕЙКО Андрей Михайлович  
КОНДРАТОВИЧ Александр Николаевич**

**РЕГЕНЕРАЦИЯ СКВАЖИННЫХ  
И НАПОРНЫХ ФИЛЬТРОВ СИСТЕМ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

*Монография*

**Ответственный за выпуск Л.Н. Шалаева**

---

Подписано в печать 02.11.2008.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 16,10. Уч.-изд. л. 12,59. Тираж 100. Заказ 1339.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.