

Б.Т. РАТОВ

**ГИДРОВИБРАЦИОННОЕ
ОСВОЕНИЕ
ФЛЮИДОСОДЕРЖАЩИХ
ПЛАСТОВ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
СКВАЖИН**

УДК 551(035.3)

ББК 26.34

Р 25

Рецензенты:

С.З.Кабдулов, д-р. техн. наук, профессор Казахстанско-Британского Технического Университета;

Т.Н.Мендебаев, д-р. техн. наук, профессор, академик РАЕН, президент ТОО «Алмас»;

Б.В.Федоров, д-р. техн. наук, профессор кафедры технологии и техники бурения скважин, Казахского Национального Технического Университета имени К.И. Сатпаева.

Ратов Б.Т.

Р25

Гидровибрационное освоение флюидосодержащих пластов при строительстве скважин. — Алматы: КазНТУ, 2015. — 124с.

ISBN 978-601-7529-21-5

Монография предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами бурения, освоения при строительстве скважин различного назначения. Она может быть использована студентами, магистрантами и докторантами PhD по специальности «Геология и разведка месторождения полезных ископаемых» и «Нефтегазовое дело».

УДК 551(035.3)

ББК 26.34

ISBN 978-601-7529-21-5

© Ратов Б. Т., 2015

© КазНТУ., 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Казахстане в больших объемах сооружаются гидрогеологические и геотехнологические скважины служащие для поисков и добычи подземных вод и твердых полезных ископаемых. Основным способом сооружения таких скважин является вращательное бурение с промывкой глинистым раствором. Наряду с целым рядом достоинств вращательный способ имеет крупный недостаток, заключающийся в глинизации (кольматации) стенок скважины в интервале вскрываемого водоносного пласта и фильтровой части скважины. В результате проницаемость околоскважинной части водоносного пласта снижается, что вызывает адекватное уменьшение дебита скважин. По различным данным 75-80% гидрогеологических скважин преждевременно прекращают эксплуатацию по причине кольматажа и заиливания в результате суффозии.

Для разглинизации водоносных пластов предложено более 20 способов и соответствующих технических средств. Наиболее эффективными из них являются способы, основанные на импульсных воздействиях на заглинизированные фильтр и пласт. Среди них особое место занимает гидровибрационный способ. Сущность последнего заключается в передаче колебаний с частотой 25-50 Гц. рабочему органу (трубе с поперечно расположенными дисками), который располагается в интервале установки фильтра и заглинизированного пласта. В результате в жидкости возникают знакопеременные импульсы давления. Под действием такой обработки кольматант разрушается, а продукты его разрушения удаляются откачкой.

Вместе с тем существующие технические вибрационного освоения пластов показывают высокую эффективность лишь при небольшой глубине скважин (до 100-150 м). Это связано с тем обстоятельством, что энергия от генератора импульсов (вибратора), расположенного на поверхности, поглощается материалом рабочего органа, причем это поглощение пропорционально глубине залегания пласта. Известны попытки расширить область эффективного применения гидровибрационного способа освоения глубоко залегающих водоносных пластов путем размещения генератора вибрационных импульсов в скважине. Однако эти устройства либо сложны по конструкции, либо маломощны, и по этим причинам не нашли практического применения.

В настоящее время в республике наблюдается значительное увеличение гидрогеологических и геотехнологических скважин, эксплуатирующих глубоко залегающие водоносные пласты.

В монографии изложены результаты новых исследований ученых КазНТУ им.К.И.Сатпаева совместно с сотрудниками АО «Волковгеология» в области освоения геотехнологических и гидрогеологических сква-

жин.

Автор выражают благодарность рецензентом докторам технических наук Б.В.Федорову, С.З.Кабдулову за конструктивные замечания и большую признательность за ценные советы, выражает всем сотрудникам кафедры «Технология и техника бурения скважин».

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ

Ежегодно в странах СНГ сооружается около 50 тыс. скважин на воду, которые используют для целей хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, мелиорации, понижения грунтовых вод на строительных площадках и горных предприятиях, добычи минеральных и термальных вод, добычи ряда полезных ископаемых методом подземного выщелачивания, а также рассолов, при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. В настоящее время водопотребление на одного городского жителя составляет от 100 до 1100 л/сутки.

Особенно актуально расширение объемов добычи подземных вод для Республики Казахстан, территория которого относительно бедна поверхностными водными источниками. В то же время республика обладает значительными запасами подземных вод, добыча которых поможет решить проблему дефицита воды во многих регионах нашей страны.

В связи с ростом водопотребления и объемов буровых работ необходимо развивать технику и технологию бурения и совершенствовать оборудование гидрогеологических скважин.

В практике бурения таких скважин очень сложно получить воду из горизонтов, представленных тонкозернистыми песками. Это объясняется, прежде всего, тем, что широко применяемый в настоящее время вращательный способ бурения предусматривает, как правило, применение глинистых растворов для вскрытия водоносных пластов.

Известно [1], что степень гидродинамического совершенства скважины определяется показателем сопротивления ξ движения воды. Последний может быть представлен в виде двух слагаемых: сопротивлений ξ_1 , обусловленных несовершенством скважины по степени вскрытия пласта, и сопротивлений ξ_2 , обусловленных характером его вскрытия. Сопротивления ξ_2 , в свою очередь, выразится:

$$\xi_2 = \xi_{2ф} + \xi_{2п} + \xi_{2нл}, \quad (1.1)$$

где $\xi_{2ф}$ – сопротивление, обусловленное фильтром;

$\xi_{2п}$ – сопротивление, обусловленное породой призабойной зоны;

$\xi_{2нл}$ – сопротивление, обусловленное отклонением от линейного закона фильтрации.

Следовательно, нужно применять такие способы вскрытия и в дальнейшей эксплуатации водоносных пластов, чтобы при их применении величины $\xi_{2ф}$ и $\xi_{2п}$ были бы минимальны.

Чтобы реализовать эту цель, необходимо первоначально рассмотреть

основные физико-химические процессы, протекающие в пристволевой зоне водоносного при его вскрытии, а также причины, обуславливающие повышение гидравлических сопротивлений фильтра.

1.1 Современные воззрения на механизм кольтматации фильтров и водоносных пластов при их вскрытии вращательным бурением

1.1.1 Механизм кольтматации продуктивных пластов

Вскрытие пласта практически всегда сопровождается нарушением его естественных фильтрационных свойств в призабойной зоне, что обусловлено перемещением частиц породы и проникновением в поровое пространство промывочной жидкости, ее фильтрата и шлама. Поэтому изучение природы загрязнения призабойной зоны пласта имеет первостепенное значение в практике бурения гидрогеологической скважины.

При вращательном бурении проницаемость призабойной зоны снижается главным образом в результате проникновения в пласт фильтрата промывочной жидкости и бурового шлама. Это явление обусловлено избыточным гидростатическим давлением в скважине, необходимым для предотвращения обрушения стенки скважины. Усиление процесса кольтматации возникает при бурении по глинистым породам, при недостаточной промывке, когда выбуренная порода многократно перетирается на забое скважины.

Многочисленные исследования [3, 4, 8] показали, что можно выделить три зоны кольтматации стенок скважины промывочными жидкостями (рисунок 1.1):

- зона образования глинистой корки;
- зона проникновения раствора в пласт;
- зона проникновения жидкой фазы раствора (фильтрата).

Вместе с раствором в пласт проникают частицы бурового шлама.

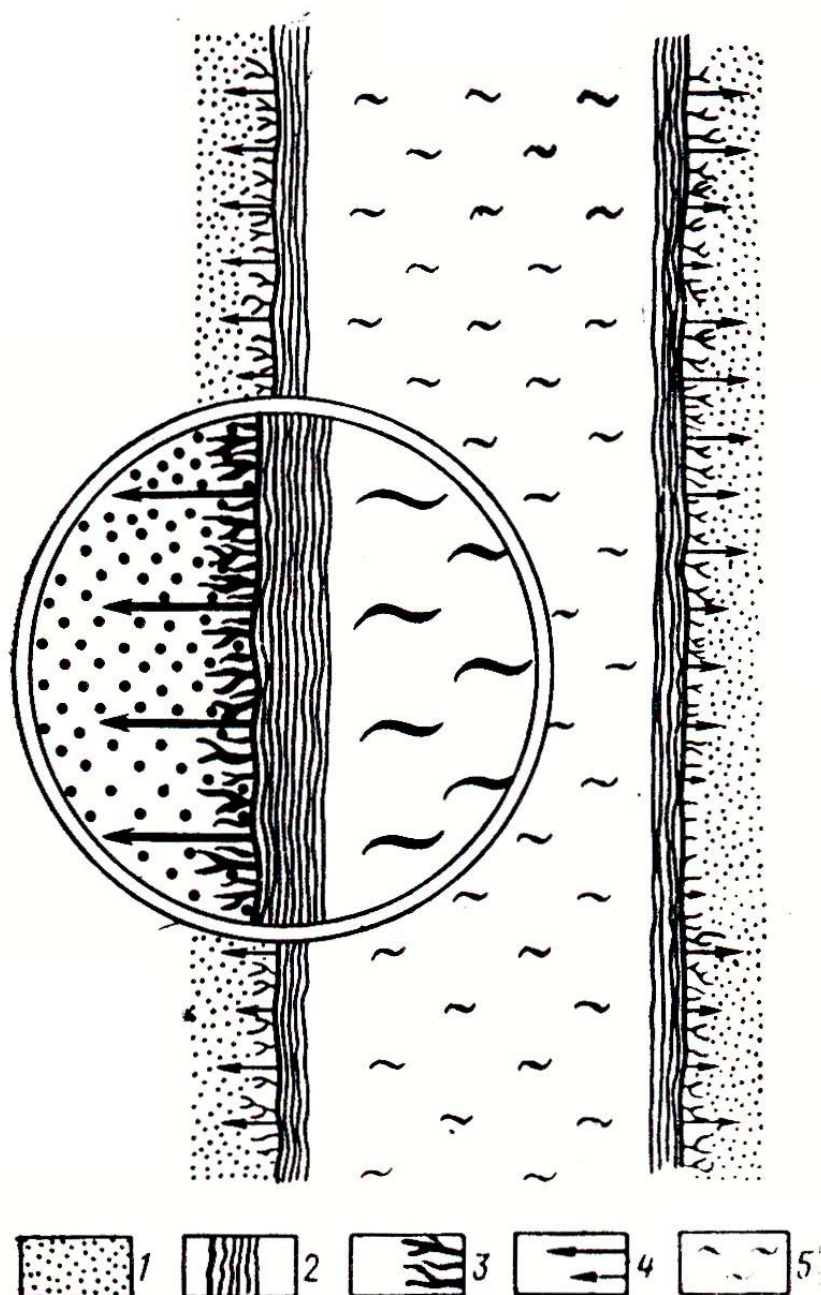
Образование глинистой корки происходит вследствие вытеснения фильтрата раствора в поры горной породы и уплотнения в стенки скважины глинистых минералов и частиц выбуренных пород. Через глинистую корку в пристволевое пространство может пройти только фильтрат раствора и мельчайшие частицы шлама.

Толщина глинистой корки зависит в основном от водоотдачи глинистого раствора, избыточного гидростатического давления на пласт, фильтрационных свойств пород и продолжительности контакта породы с промывочной жидкостью.

Во всех случаях необходимо стремиться к созданию тонкой, плотной, малопроницаемой корки. Например, растворы, приготовленные из тонкодисперсных глин с добавками, уменьшающими водоотдачу до 3-5 см³/30

мин. образуют корку толщиной несколько миллиметров.

В процессе бурения свойства промывочной жидкости изменяются в широких пределах в результате перехода в раствор частиц бурового шлама и разбавления раствора водой при вскрытии пласта. Последнее приводит к повышению водоотдачи и интенсивной фильтрации жидкой фазы в пласт. В результате на стенках скважины, сложенных пористыми породами, откладывается рыхлая толстая корка, мало препятствующая проникновению фильтрата в пласт.



1 – проницаемая порода; 2 – глинистая корка; 3 – зона проникновения твердой фазы раствора и шлама; 4 – зона проникновения жидкой фазы (фильтрата); 5 – раствор.

Рисунок 1.1 – Схема кольматации стенок скважины промывочными жидкостями (по М.Г. Оноприенко [2])

При углублении скважины в пластичных глинистых породах буровой раствор, обогащаясь коллоидальной глиной, приобретает свойство склеивать набухшие частицы шлама и откладывать на стенках скважины липкую глинистую корку.

Проникновение в пласт промывочной жидкости, обуславливающее кольматацию призабойной зоны скважины, следует рассматривать с двух позиций:

- как результат механического проникновения в поры и трещины пород бурового раствора;
- как результат физико-химического взаимодействия раствора и породы.

Величина механического проникновения промывочной жидкости в пласт зависит от его вязкостных свойств, фильтрационной способности породы и избыточного гидростатического давления на пласт.

Существуют несколько аналитических зависимостей для определения указанной глубины [6, 7,]. Наиболее универсальной является формула А.Х. Мирзаджанзаде [8]:

$$\ell = \frac{\Delta P_0 \sqrt{K}}{\alpha \tau_0}, \quad (1.2)$$

где ℓ – глубина проникновения раствора в пласт;

ΔP_0 – перепад давления на пласт в случае предельного равновесия;

K – проницаемость пористой среды при фильтрации вязкопластической жидкости;

α – безразмерная постоянная, по опытным данным для вязкопластической жидкости $\alpha = (155 \dots 180)10^4$;

τ_0 – предельное напряжение сдвига раствора.

В свою очередь величина ΔP_0 равна:

$$\Delta P_0 = 0,1\gamma \cdot h + \frac{2\tau_0 H}{R_0 - R_{\text{ж}}}, \quad (1.3)$$

где γ – удельный вес промывочной жидкости;

h – глубина статического уровня воды в скважине;

H – глубина поглощающего пласта;

$R_c, R_{\text{ж}}$ – соответственно радиусы скважины и бурильной колонны.

Под влиянием разности давлений между пластом и глинистым раствором последний будет проникать в глубь пласта до тех пор, пока разность давлений будет не в состоянии преодолеть сопротивление начального сдвига раствора. При наступлении равновесия проникновение в пласт

прекращается.

Зона проникновения фильтрата (жидкой фазы) раствора значительно больше по масштабам, чем зона проникновения промывочной жидкости, т.е. ее твердой и жидкой фазы.

Для расчета глубины R проникновения фильтрата глинистого раствора пользуются формулой [5]:

$$R = \sqrt{\frac{W}{\pi \alpha_s m}} + R_c^2, \quad (1.4)$$

где W – количество промывочной жидкости, проникающей в пласт;

R_c – радиус скважины, см;

α_s – коэффициент остаточного водонасыщения;

m – пористость пласта.

Горная порода и жидкость, заполняющая ее поры, представляют дисперсную систему, в которой вода и растворимые в ней соли рассматриваются как дисперсионная система, а твердые частицы – как дисперсная система. Поверхностная энергия такой системы измеряется произведением поверхностного натяжения на границе соприкосновения указанных систем на величину суммарной поверхности частиц дисперсной системы.

Всякая дисперсная система стремится уменьшить свою поверхностную энергию. В данном случае это происходит в результате уменьшения суммарной поверхности и понижения поверхностного натяжения воды. Совместное действие указанных факторов порождает поглощающую способность системы. Стремление такой системы уменьшить поверхностное натяжение воды приводит к концентрации веществ в слое, непосредственно примыкающем к поверхности дисперсных частиц. Это явление называется положительной адсорбцией.

Глины обладают наибольшей адсорбционной способностью, особенно в диспергированном состоянии. Поэтому они выполняют главную роль в кольматации пор и трещин пород, вскрываемых бурением с промывкой.

Водоносные горизонты, представленные рыхлыми отложениями, особенно средне- и мелкозернистыми песками, часто содержат определенное количество глинистых минералов. Последние, контактируя с привычными жидкостями, при вскрытии пластов участвуют в сложных физико-химических процессах.

Поглощение жидкости глинистой породой сопровождается увеличением их объема (набуханием). В результате реакции жидкости с глинистыми фракциями и набухания последних изменяется внутренняя геометрия порового пространства пласта. При этом проницаемость последнего может

уменьшиться в 50 раз и более [5]. Наиболее интенсивно набухают бентонитовые глины, которые могут впитывать в себя тридцатикратные объемы воды.

Кольматацию, возникшую в результате набухания глин, присутствующих в водоносном пласте, устранить невозможно без разрушения скелета грунта.

При взаимодействии пластовой воды и воды, отфильтровавшейся из раствора, в зависимости от разницы их физико-механических свойств может произойти флокуляция – коагуляция коллоидно-дисперсных частиц и оседание их в поровом пространстве [5,72,73,74].

Особенно большое влияние на выпадение в нерастворимый осадок химических соединений оказывает изменение щелочно-кислотных условий, характеризующихся величиной pH, и окислительно-восстановительного потенциала ϵH . Изменение указанных параметров при смешивании вод приводит к выпадению в осадок одних соединений и растворению других [8]. Обнаружить и устранить химическую кольматацию очень трудно. Поэтому важно, чтобы химический состав и физические свойства пластовой воды и воды, используемой для приготовления бурового раствора, были одинаковыми.

Кольматация водоносных пластов возникает даже тогда, когда во вскрываемом пласте отсутствуют глинистые частицы, а вскрытие осуществляется с промывкой водой. Такое явление, названное механической кольматацией, обусловлено проникновением в поровое пространство призабойной зоны бурового шлама в результате избыточного давления и поглотительной способности пласта.

При увеличении гидростатического давления на пласт последнего расширяются. В восходящем от забоя потоке воды содержится определенное количество твердых частиц. Последние, проникая вместе с водой в поры и трещины околоскважинного массива, закупоривают их, вызывая механическую кольматацию.

При снятии избыточного давления на пласт размеры пор призабойной зоны уменьшаются, а проникшие в пласт твердые частицы шлама оказываются защемленными, вследствие чего проницаемость призабойной зоны понижается. Устранить такую кольматацию очень трудно. Для ее уменьшения следует создавать минимально необходимое избыточное давление, предотвращающее обрушение стенок скважины.

1.1.2 Кольматация фильтров

Кольматация фильтров вызывает увеличение гидравлических сопротивлений при пропуске воды в скважину и, как следствие, снижение ее

дебита.

Различают три вида кольматации: механическую, химическую и биологическую [9].

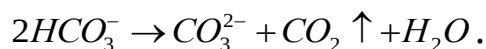
Механическая кольматация наблюдается в сетчатых, щелевых, блочных фильтрах вследствие несоответствия проходных отверстий фильтрующих поверхностей гранулометрическому составу водоносного пласта. В результате такой кольматации водоприемные отверстия фильтров заклиниваются или перекрываются песком, глиной, в связи с чем удельный дебит снижается на 20-30% [1, 10].

К механической кольматации следует также отнести глинизацию фильтра при вращательном бурении с промывкой глинистым раствором. С течением времени глинистая корка на фильтре уплотняется за счет усиления адсорбционных и молекулярных связей между глинистыми частицами, и ее удаление представляет значительную сложность.

При установке фильтра необходимо стремиться к уменьшению его глинизации. Для этого следует опускать фильтр с нижним открытым концом или с промывочными окнами, устанавливать выше фильтра цементный мост, разбурываемый после установки фильтра, покрывать фильтр специальными составами, растворяемыми после его установки в скважине. Снижению механической кольматации способствует также создание вокруг фильтра правильно выполненной гравийной обсыпки [1, 2, 56,69,70].

Химическая кольматация обусловлена нарушением химического состава подземных вод в результате изменения гидродинамических параметров фильтрационного потока.

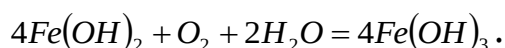
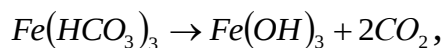
При уменьшении давления воды в ней уменьшается растворимость газов (в основном CO_2), происходит их выделение и нарушается углекислотное равновесие, в соответствии со следующей реакцией:



Присутствие в воде катионов кальция и магния приводит к образованию трудно растворимых осадков $CaCO_3$ и $MgCO_3$. Наиболее интенсивно происходит выделение карбонатных осадков в зоне фильтров. В фильтрах, имеющих большие гидравлические сопротивления, возрастают потери давления, что приводит к более активному выделению из воды CO_2 и еще большему увеличению количества карбонатных осадков.

Заращение фильтров и прифильтровых зон карбонатными отложениями происходит в основном в скважинах, заложенных в известняках и доломитах [1, 10].

Наиболее распространенными колюматирующими отложениями являются железистые осадки, которые выделяются при заборе подземных вод, содержащих закисное железо. Переход железа из закисного в окисное и выпадение в осадок происходит при наличии в воде растворимого кислорода. Этому также способствует выделение CO_2 и повышение рН воды вследствие нарушения углекислотного равновесия:



Гидрат окиси железа, имеющий студнеобразный вид, отлагается на поверхности фильтров и в поровом пространстве прифильтровых зон пласта. Интенсивность выпадения железистых осадков возрастает при неравномерной откачке воды из скважины, использовании эрлифта или эжекторного насоса, способствующих насыщению воды кислородом.

Нарушение химического состава подземных вод эксплуатируемого пласта может произойти при взаимодействии с водами других водоносных горизонтов при недостаточной мощности разделяющего водоупора или отсутствии цементации затрубного пространства. При смешивании мягких и жестких вод может увеличиться концентрация углекислоты, что вызывает образование карбонатных осадков.

На зарастание фильтров большое влияние оказывает наличие в подземных водах сероводорода H_2S . Содержание гидросульфитов HS^- приводит к образованию труднорастворимых и непроницаемых сернистых отложений железа, меди, цинка в результате реакции подземных вод с материалом каркаса фильтра. Сульфиды металлов в виде корковидных наростов черного цвета образуют прочное пленочное покрытие на сетках, проволочных обмотках, каркасах фильтров и способствуют их постепенному разрушению. Следует отметить, что сернистые отложения не откладываются в прифильтровых зонах пласта.

При наличии в железосодержащих подземных водах кремнекислоты наблюдается образование труднорастворимых силикатных отложений с примесью закисного железа.

Предотвратить химическую колюматацию при использовании вод с неустойчивым химическим составом невозможно, так как ее причиной является нарушение естественного режима водоносного пласта.

Для уменьшения интенсивности колюматации следует не допускать неравномерного режима эксплуатации скважин, не использовать водоподъемники, при работе которых происходит поступление аэрированных вод в зону фильтров.

Помимо выпадения осадков накопление отложений может происходить в результате коррозии самого фильтра вследствие агрессивности подземной воды, обладающей свойством электролита.

Электрохимической коррозии в большей степени подвержены сетчатые фильтры, представляющие стальную перфорированную трубу, обмотанную стальной или медной сеткой. Эти процессы значительно ослабляются при изготовлении фильтров из пластмасс, использовании фильтрующей сетки из нержавеющей стали, применение вместо обмоточной проволоки шнуров из полимерных материалов.

Биологическая кольматация обусловлена жизнедеятельностью микроорганизмов. Наиболее активно бактерии размножаются у фильтров, где откладываются осадки, образовавшиеся под действием химических или электрохимических процессов. В результате жизнедеятельности бактерий (железобактерий) выделяется гидрат окиси железа, что способствует переводу закиси железа в нерастворимую окись, осаждающуюся на рабочей поверхности фильтров. Присутствующие в подземных водах марганцевые бактерии используют энергию окисления закисных соединений и переводят их в малорастворимые окисные соединения. Интенсивная биологическая кольматация характерна для подземных вод с содержанием кислорода 5 мг/л и более, находящихся в первых от поверхности земли водоносных горизонтах. Бактерии обнаруживаются также на больших глубинах в зонах, значительно удаленных от водотоков и водоемов [1].

Благоприятные условия для развития железобактерий имеются в большинстве гидрогеологических районов, поэтому для подавления их жизнедеятельности необходимо периодически проводить хлорирование скважин.

В результате анализа большого числа литературных источников установлено [2,71], что причинами выхода из строя является (по удельному весу каждого нижеприведенного фактора): кольматаж фильтров – 40,9%; заиливание и пескование скважины 37,77%, износ насосного оборудования – 12,52%; прочие причины – 8,81%. Таким образом, разрабатываемые средства должны быть направлены на периодические декольматации фильтров и борьбу с пескованием и заиливанием скважины (вместе эти причины составили 78%).

1.2 Анализ способов и технических средств, применяемых при освоении гидрогеологических и геотехнологических скважин

Изложенное в предыдущем подразделе показывает, что причины кольматации фильтров и водоносных пластов при их вскрытии весьма многообразны.

Многообразие этих причин вызвало необходимость разработки многочисленных способов декольматации (разглинизации) водоносных пластов. Разглинизация, направленная на увеличение проницаемости пласта вплоть до естественной ее величины, практически сводится к разрушению или удалению из зоны фильтра глинистой корки, образовавшейся при вскрытии пласта с промывкой.

1.2.1 Систематизации способов разглинизации освоения водоносных пластов

В практике освоения гидрогеологических и геотехнологических скважин используют свыше 20 способов разглинизации.

Многочисленность способов разглинизации водоносных пластов вызывает необходимость создания их способов разглинизации.

Профессор Д.Н. Башкатов [12, 13] все способы освоения скважин подразделяет на гидромеханические, физические, химические и комбинированные. На наш взгляд, такая систематизация имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что гидравлика и механика являются разделами физики, и поэтому нет оснований выделять гидромеханические способы в отдельную группу.

Нами предложен новый систематизации способов разглинизации водоносных пластов (рисунок 1.2). Главный принцип, положенный в ее основу, – вид энергии (поля), воздействующей на пласт. В соответствии с указанным принципом все способы освоения пластов делятся на физические, химические и комбинированные.

Каждый из указанных способов в свою очередь систематизируется по методам и средствам воздействия на пласт.

Так, физический способ по методам воздействия на пласт делится на механический, гидравлический и гидроимпульсный, химический – по воздействию того или иного химреагента, физико-химический – на конкретных технико-технологическим средствам воздействия на пласт (рисунок 1.2).

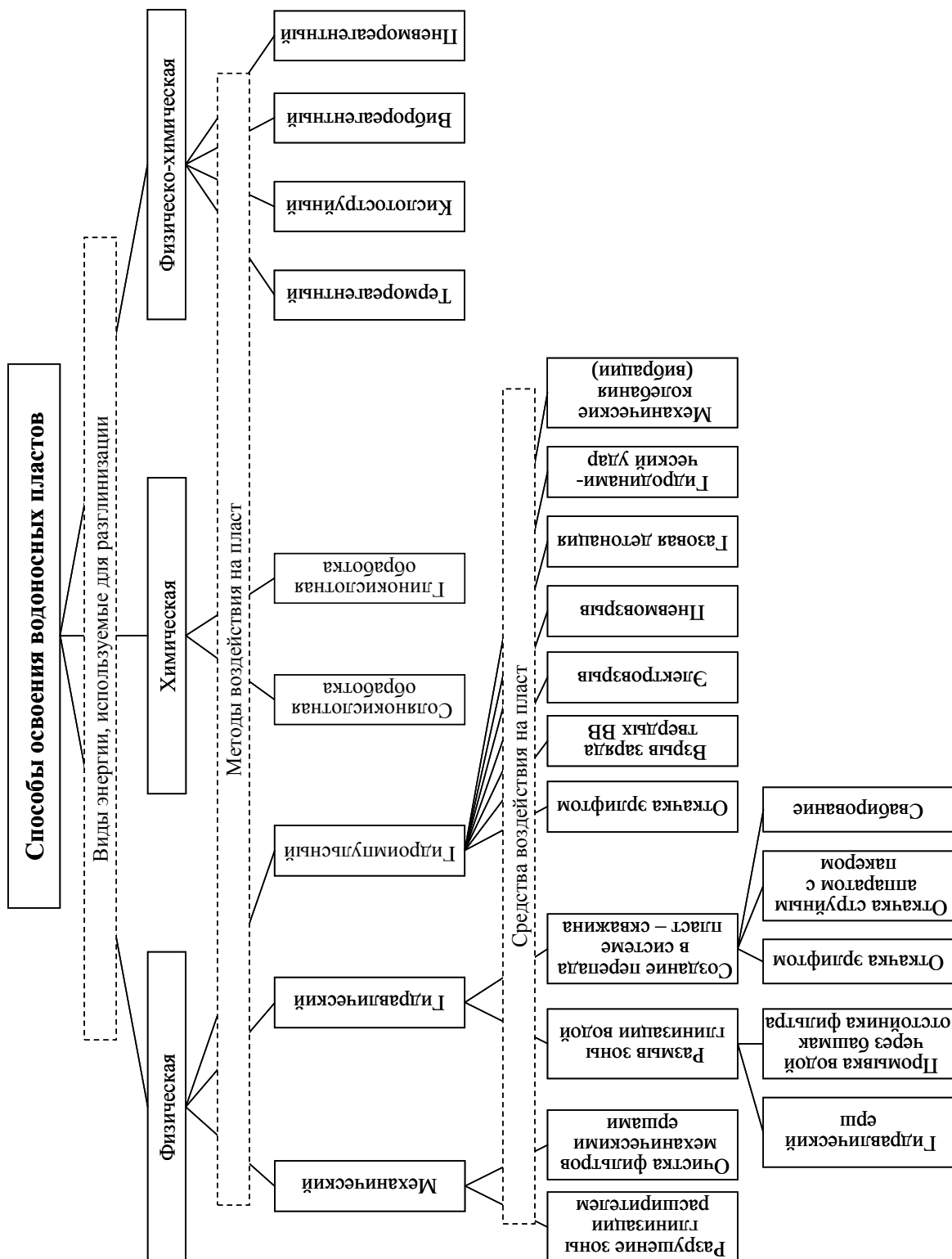


Рисунок 1.2 – Систематизация способов разглинизации и технико-технологические средства освоения водоносных пластов

Кратко охарактеризуем некоторые из наиболее распространенных методов разглинизации водоносных пластов.

1.2.2 Физические методы восстановления водоотдачи

В эту группу входят методы, основанные на гидравлической и механической очистках фильтров, и гидроимпульсные методы.

Гидравлические методы основаны на размыве глинистой корки струей воды и создании перепада давлений в системе пласт – скважина. В результате происходит обрушение заглинизированной зоны ствола. Гидравлические методы применяются для разглинизации высоконапорных пластов и осуществляются по следующим технологическим схемам.

Промывка зафильтрового пространства через башмак отстойника фильтра заключается в том, что вода нагнетается по бурильным трубам, соединенным с крышкой отстойника, в которую вмонтирован обратный клапан. В результате поток воды устремляется в кольцевой зазор между фильтром и стенками скважины, размывая и удаляя глинистую корку. По окончании разглинизации бурильные трубы вывинчивают, а дно отстойника засыпают гравием.

Откачка эрлифтом или струйным насосом создает понижение воды в скважине. Тем самым создаются условия, при которых пластовое давление становится больше гидростатического давления столба жидкости в скважине. Под действием возникшего перепада давления глинистая корка обрушается. Продукты разрушения удаляются при откачке.

Метод разглинизации пластов обратновсасывающей промывкой, разработанный ВСЕГИНГЕО [14], заключается в удалении породы (обрушенной в зафильтровом пространстве) через специальные окна в период откачки (рисунок 1.3). Для этого в обсаженную кондуктором 3 скважину между фильтром 4 и отстойником монтируют устройство, состоящее из насадки 9 с упорным кольцом 8, промывочных окон 7, скользящей втулки 5, которая фиксируется срезными штифтами 6. В процессе откачки эрлифтом 1 вследствие понижения уровня воды создается перепад давления в системе пласт – скважина. В результате происходит обрушение стенок и удаление породы вместе с жидкостью через промывочные окна 7 и водоподъемную колонну 2 на поверхность. После окончания разглинизации ударом водоподъемной колонны 2 по скользящей втулке 5 срезают штифты 6. Втулка перемещается вниз, перекрывая окна 7.

Гидроерши также используют для удаления глинистого раствора из пространства между рабочей частью фильтра и водоносным пластом и размыва глинистой корки. Гидроерш Ф.И.Письменского и

И.Р.Мельникова [15] (рисунок 1.4) состоит из следующих узлов: верхнего 1 и нижнего 4 поршней с грузом для создания гидравлического удара в рабочей части фильтра, приемного клапана 3, механического ерша 5 для очистки внутренней поверхности фильтра и гидравлических насадок 2.

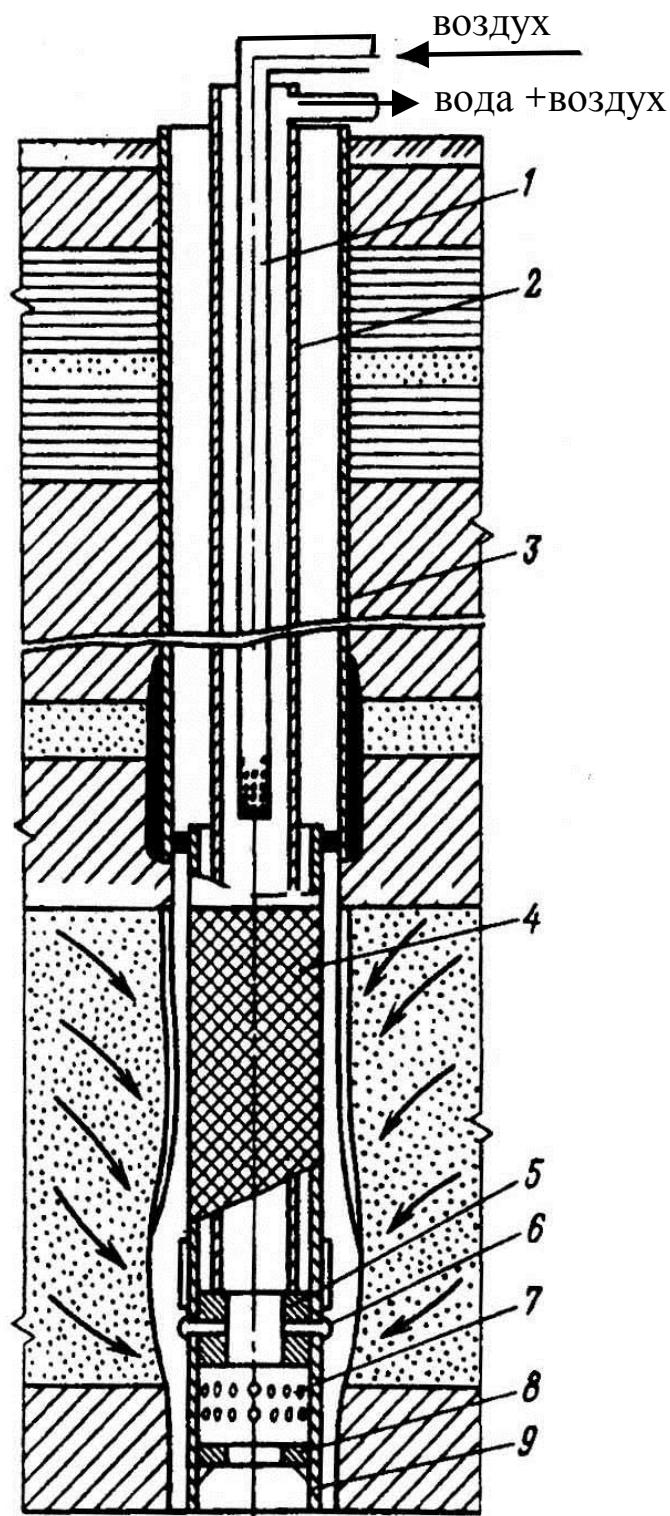


Рисунок 1.3 – Схема разглинизации пластов обратновсасывающей промывкой (метод ВСЕГИНГЕО)

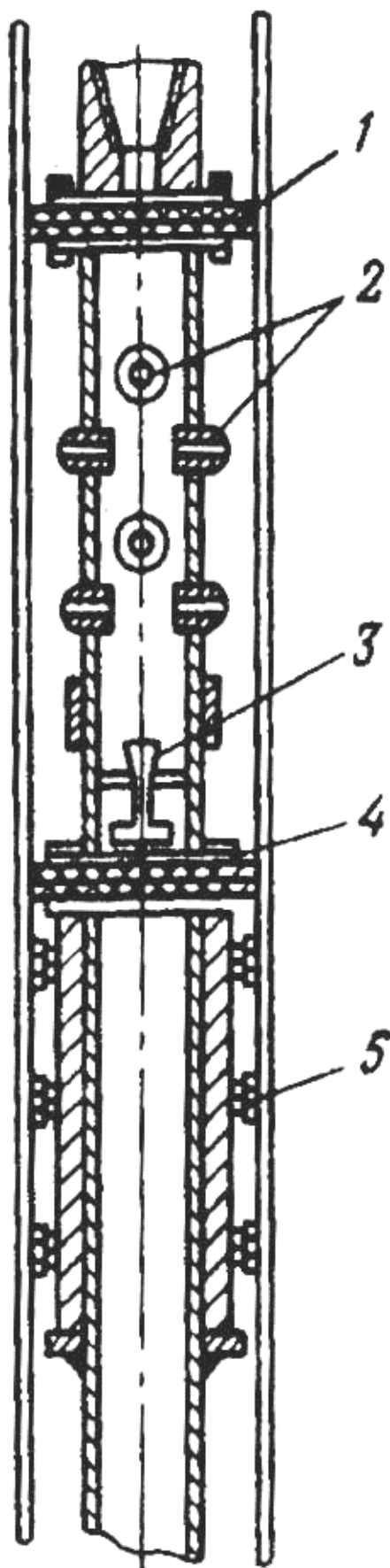


Рисунок 1.4 – Гидроерш

Устройство на бурильных трубах опускают в скважину без верхнего поршня 1 и придают ему возвратно-поступательное перемещение. Нижний поршень с приемным клапаном представляет собой сваб, с помощью которого жидкость перемещается в надпоршневое пространство и создается перепад давления в системе пласт – скважина. С установленным верхним поршнем устройство используется для промывки рабочей поверхности фильтра и стенок скважины в пространстве между поршнями высоконапорными струями воды, выбрасываемыми через гидронасадки.

Гидроимпульсные методы освоения скважин наиболее эффективны [10, 15] и заключаются в воздействии ударных волн на вскрытый водоносный пласт в сочетании с откачкой. Средства для создания гидроимпульсов давления могут быть самыми различными: вибрации, откачка эрлифтом с прерывателем потока жидкости, электровзрыв, пневмовзрыв, взрыв заряда твердых ВВ, свабирование и т.д.

Метод освоения путем возбуждения гидроимпульсов с помощью прерывателя при откачке эрлифтом применяется для освоения водоносных горизонтов в трещиноватых породах. Эрлифт с концентрическим расположением труб опускают в скважину. Затрубное пространство между эксплуатационной колонной и водоподъемными трубами выше пласта герметизируют пакером. На выходе в трубопроводе для откачиваемой воды монтируют заслонку с приводом, обеспечивающим перекрытие потока с частотой 0,2-1 Гц. В результате на водоносный пласт действуют знакопеременные давления, способствующие раскрытию трещин, очистке их от шлама и глинистого раствора.

Электровзрывной (электрогидравлический) метод обработки скважин основан на импульсном выделении электрической энергии в виде искрового разряда. Для реализации метода используются генераторы импульсов тока с накопителем электрической энергии в виде конденсаторной батареи. При высоковольтном электрическом разряде внутри фильтра возникает ударная волна, которая, распространяясь в радиальном направлении, разрушает осадки на поверхности фильтра и стенках скважины. Последующее движение воды при захлопывании парогазового пузыря вызывает отделение разрушенных осадков и глинистых частиц и их вынос в ствол скважины.

Преимущества электровзрывного метода заключаются в возможности многократного воспроизведения электрических разрядов и плавного регулирования гидродинамических параметров путем изменения емкости и напряжения конденсаторов. Недостаток метода – сложность применяемого оборудования.

Пневмовзрывной способ освоения водоносных пластов основан на применении скважинных пневмоснарядов, обеспечивающих быстрый выпуск сжатого до высокого давления (10-12 МПа) воздуха. В результате в жидкости возникают волны давления, разрушающие глинистые и химические осадки на фильтре и стенках скважины. Существенное преимущество пневмовзрывного способа – возможность регулирования частоты и интенсивности выхлопов сжатого воздуха, доступность и безопасность рабочего тела – воздуха, недостаток – сложность применяемого оборудования.

Взрыв заряда твердых взрывчатых веществ (торпедирование) применяется для освоения водоносных горизонтов, представленных как неустойчивыми, так и крепкими трещиноватыми породами. Возникающая при взрыве ударная волна очищает рабочую поверхность фильтра и, распространяясь далее в пространстве за фильтром, деформирует глинистую зону водоносного пласта. При разрыве газового пузыря возникает депрессия на пласт, и смесь глинистого раствора с песком устремляется внутрь фильтра. Пульсация газового пузыря способствует интенсивной разглинизации пласта.

Для проведения взрывных работ изготавливают специальные торпеды, представляющие собой цилиндр с центрирующими фонарями. Внутри цилиндра находится заряд взрывчатого вещества.

Для разглинизации водоносных песков в качестве ВВ используется детонирующий шнур. Торпеду опускают в скважину на электрическом кабеле. С помощью электродетонатора торпеда взрывается, и скважина очищается от разрушенной породы. Недостатком метода являются повышенные требования к технике безопасности и сложность его применения при оборудовании скважины пластмассовыми трубами.

Свабирование заключается в том, что при возвратно-поступательном перемещении сваба (поршень 4 с клапаном 3 на рисунке 1.4) жидкость порциями перемещается в надпоршневое пространство. В результате создается депрессия на водоносный пласт, вызывающая приток воды из пласта в скважину, очистку фильтра и стенок скважины от глинистой корки, осадков и загустевшего раствора. Свабирование наиболее эффективно при освоении напорных водоносных пластов при глубине их залегания свыше 100 м.

Механические методы освоения водоносных пластов заключаются в разрушении зоны глинизации лопастным расширителем, установленным под башмаком фильтра. Образовавшаяся каверна заполняется гравийной обсыпкой. Для очистки рабочей поверхности фильтра от осадков применяются механические ерши.

1.2.3 Химические методы восстановления водоотдачи

Эти методы широко распространены в отечественной и зарубежной практике [17]. Сущность их заключается в воздействии на фильтр и прифильтровую зону реагентов, растворяющих колюматирующие вещества. Кроме того, реагенты могут воздействовать на более удаленную зону пласта, формируя в породе новые фильтрационные каналы. В качестве химических реагентов применяют соляную кислоту, глинокислоту (смесь плавиковой и соляной кислот), дитионит натрия $Na_2S_2O_4$, триполифосфат натрия $Na_5P_3O_{10}$ и др.

Наиболее часто применяется **солянокислотная обработка пластов**, представленных карбонатными породами. В результате химической реакции образуются растворимые в воде соли $CaCl_2$ и $MgCl_2$, которые удаляются из пор и трещин пласта при откачке воды. Для разглинизации используется 10-15%-ный раствор HCl , нагнетаемый в скважину по трубам, перфорированным в нижней части. Химическая обработка заколюматированных водоносных горизонтов может осуществляться по трем технологическим схемам: создание реагентной ванны в водоприемной части скважины; обработка прифильтровой зоны с однократным вытеснением реагентного раствора из ствола в пласт; многоциклическая схема с периодическим перемещением раствора от ствола в прифильтровую зону и в обратном направлении.

Для химической обработки скважин используется типовое химическое оборудование (резервуары, насосы), защищенное специальными покрытиями. Работы с химическими реагентами ведутся после инструктажа по технике безопасности в спецодежде: резиновый костюм, перчатки, сапоги, противогаз. Химическую обработку скважины следует выполнять в строгом соответствии с проектом работ и требований охраны природы. Недостатком химических методов является ограниченная область применения, повышенные экологические опасности и требования к технике безопасности.

1.2.4 Физико-химические методы восстановления водоотдачи

К этой группе относятся термореагентный, кислотоструйный, вибромореагентный, термовибромореагентный и другие методы.

Термореагентный метод основан на интенсификации процесса растворения колюматирующих соединений путем использования разогретого раствора, поступающего в водоприемную часть скважины. При солянокислотной обработке в качестве термореагента (вещество, взаимодей-

ствующее с химическим реагентом с выделением тепла) обычно используется металлический магний.

Кислотоструйный метод основан на сочетании химической активности реагента и действия струи химического раствора, выбрасываемых с большой скоростью из гидромониторных насадок. Кислотоструйная обработка применяется в скважинах с открытой (бесфильтровой) водоприемной частью.

Виброреагентный метод основан на одновременном воздействии химического реагента и вибраций на прифильтровую зону. В результате интенсифицируется процесс растворения в зоне контактирования реагента с кольматантом. Технологическая схема декольматации этим методом заключается в том, что в скважину, оборудованную вибратором с рабочим органом обычного типа (см. рисунок 1.5), через устье подается реагентный раствор, затем осуществляется вибрирование. Применение виброреагентного метода позволяет увеличить удельные дебиты скважин в 1,5-1,7 раза. Метод весьма перспективен для широкого использования в практике восстановления водоотдачи водозаборных скважин.

Термовиброреагентный метод усиливает эффект применения виброреагентной обработки скважин за счет подогрева реагентного раствора в призабойной части до температуры 60-80°C. Подогрев осуществляется скважинными электронагревателями или с помощью термореагентов.

Пневмореагентный метод представляет собой рациональное сочетание химической обработки и пневмовзрыва. В результате пульсирующее воздействие газовой полости на закольматированную зону дополняется растворяющим воздействием химического реагента.

Недостатки физико-химических методов аналогичны химическим методам освоения пластов.

1.3 Методы и средства, основанные на передаче гидромеханических колебаний заглинизированному пласту

Более подробно остановимся на группе физических методов, указанных в названии подраздела.

При механических колебаниях столба жидкости внутри скважины возникают знакопеременные гидродинамические давления или кавитация, разрушающее воздействие которых с одновременной откачкой или промывкой скважины вызывает разжижение грунта и вынос из призабойной зоны мелких фракций водоносного пласта (частиц глины и кольматанта).

Механические колебания столба жидкости с частотой до 1000 Гц могут создаваться механическими или гидравлическими вибраторами. Ме-

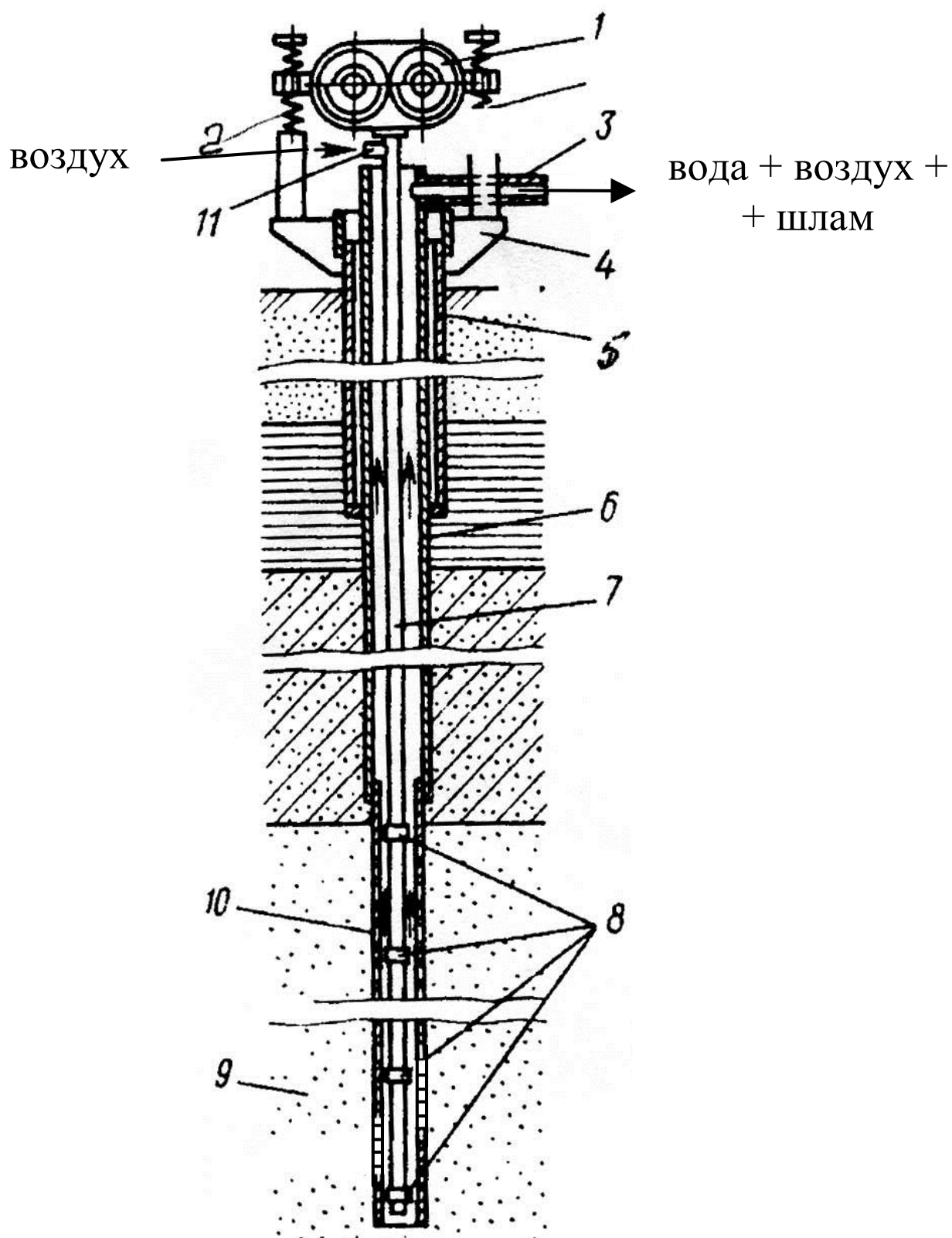
ханические колебания с частотой более 1000 Гц создаются ультразвуковыми генераторами различных типов.

При обработке скважин действием механических колебаний разрушаются коьматирующие отложения в прифилтровой зоне, нарушаются структурные связи между коьматантом и водоносной породой и удаляется коьматант в ходе прокачки скважины при незначительном (до 30%) уплотнении пород или гравийной обсыпки. Указанные методы восстановления производительности скважин предпочтительно применять при небольших зонах коьматации пород (до 20 см от стенки фильтра) и слабосцементированных коьматирующих осадках.

Ниже рассмотрены методы, основанные на передаче столбу жидкости в скважине механических колебаний.

1.3.1 Гидровибрационный метод

Гидровибрационный метод заключается в том, что одновременно с промывкой или откачкой на водоносный пласт и фильтр воздействуют гидравлические импульсы, которые возбуждаются в столбе жидкости рабочим органом (рисунок 1.5), представляющим собой трубу 7 с дисками 8. Рабочий орган совершает продольные колебания с амплитудой 5-10 мм при частоте 10-14 Гц с помощью вибратора, расположенного на поверхности. Возникающие перепады давления в пределах 0,2-0,5 МПа достаточны для эффективной разглинизации зоны водоносного пласта и фильтра [10, 18].



- 1 – вибратор; 2 – амортизационные пружины; 3 – патрубок для вывода воды со шламом;
 4 – опорная рама; 5 – обсадная труба; 6 – эксплуатационная труба;
 7 – насосно-компрессорная труба; 8 – диски; 9 – водоносный пласт;
 10 – фильтр скважины; 11 – патрубок для подачи воды или воздуха

Рисунок 1.5 – Схема вибрационного метода восстановления водоотдачи водоносных пластов

Для реализации способа созданы и достаточно широко применяются установки ВУР-2, ВУР-3 и ВУР-4 [9].

Установки ВУР-2 и ВУР-3 состоят из вибратора продольно-направленного действия, установленного на раме. Привод вибратора осуществляется электродвигателем. Опорная рама устанавливается на обсадной трубе скважины с помощью патрубка с резиновой диафрагмой, служащей для герметизации устья скважины. При вращении шестерен вибратора, выполненных в виде дебалансов, возбуждаются механические колебания, которые передаются колонне труб и рабочему органу в интервале фильтра, а также за калматированному водоносному пласту. Вибрационную обработку скважин целесообразно совмещать с эрлифтной откачкой. Для этого воздух подается в колонну труб, на конце которой установлен смеситель, а водо-воздушная смесь выносится из скважины по кольцевому пространству, образованному эксплуатационной колонной и трубами (рисунок 1.5).

Установки ВУР-2 и ВУР-3 могут быть использованы при обработке фильтров скважин глубиной до 200 м. Применение поверхностных виброустановок для более глубоких скважин неэкономично, так как значительная масса вибрирующей колонны труб требует вибратора большой мощности.

Таблица 1.1 – Технические характеристики виброустановок

Показатели	ВУР-2	ВУР-3	ВУР-4
Предельная глубина обрабатываемой скважины, м	120	250	800
Минимальный диаметр колонны, мм: эксплуатационной фильтровой	168 114	168 114	219 114
Максимальная масса рабочего органа, кг	1000	2000	400
Амплитуда колебаний рабочего органа при его максимальной массе, мм	6	6	7
Частота колебаний рабочего органа, Гц	11,6	11,6	13,3
Мощность приводного электродвигателя, кВт	7,5	13,0	5,5
Масса (без рабочего органа), кг	800	1300	240
Размеры в плане, мм	780×510	1400×680	-
Высота (без рабочего органа), мм	1300	1200	3260
Тип агрегата, с которым может работать виброустановка	АВО-2	АВО-1	АВО-1, АВО-2 или буровая установка

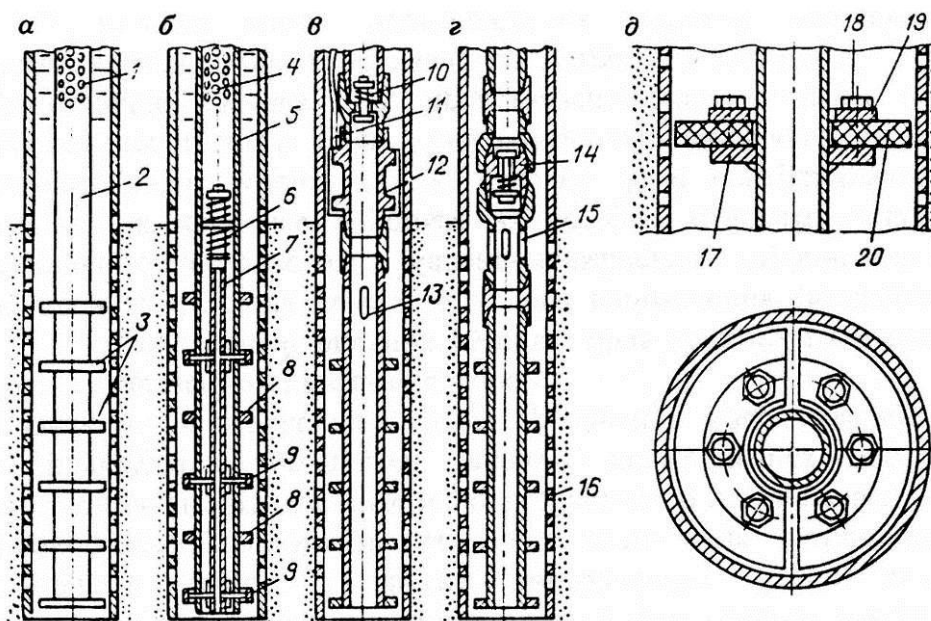
Погружная виброустановка ВУР-4 подвергает вибрированию не всю колонну труб, а лишь рабочий орган с дисками, что позволяет использовать ее на скважинах глубиной более 200 м. Установка ВУР-4 состоит из глубинного вибратора кинематического типа, выполненного на базе водозаполненного электродвигателя от погружного насоса, заключенного в полый стальной каркас. Электродвигатель передает вращающий момент через зубчатую передачу эксцентриковому валу, к которому присоединен рабочий орган, состоящий из

штанги с дисками. В случае выполнения рабочего органа с коаксиально расположенными трубами, присоединенными к шатунам вибратора, движущимся в противофазе, может быть получено встречное движение соседних дисков.

Перепад гидродинамических давлений, создаваемых установкой ВУР-4, составляет 0,25-0,30 МПа, что является достаточным для эффективной разглинизации фильтра и призабойной зоны водоносного пласта.

Рабочий орган виброустановок представляет собой насосно-компрессорную трубу диаметром 60-73 мм, в нижней части которой на длине, равной высоте фильтра, с шагом 0,5 м прикрепляют диски (рисунок 1.6, а) толщиной 10 мм, наружный диаметр которых на 2-5 мм меньше внутреннего диаметра фильтра.

Диски выполняются из стальных колец, на которых закрепляют сменные (в зависимости от диаметра фильтровой колонны скважины) резиновые полукольца (рисунок 1.6, б). Такая конструкция дисков позволяет легко монтировать рабочий орган и дает возможность увеличивать эффект гидродинамического воздействия за счет малого (1-2 мм) радиального зазора между каркасом фильтра скважины и наружным диаметром дисков. Вибрационный рабочий орган со стальными дисками можно использовать в фильтрах диаметром 114 и 127 мм рабочий орган с резиново-металлическими дисками предназначен для работы в фильтрах диаметром 168, 219, 273 и 326 мм.



а – с жестко закрепленными стальными дисками; б – со встречным движением дисков;
в – с вибромагнетителем; г – с вибронасосом; д – диск с резиновыми полукольцами;
1, 4 – смесители эрлифта; 2 – штанга; 3 – диски; 5 – наружная штанга; 6 – узел пружинной подвески; 7 – внутренняя штанга; 8, 9 – диски, закрепленные соответственно на наружной и внутренней штанге; 10 – клапанный узел вибромагнетителя; 11 – шланг подачи сжатого воздуха к пакеру; 12 – пакерный узел; 13 – отверстия для выхода реагента; 14 – клапанный узел вибронасоса; 15 – приемные отверстия вибронасоса; 16 – фильтровая труба; 17 – опора; 18 – болт; 19 – прижимное кольцо; 20 – резиновое полукольцо

Рисунок 1.6 – Схемы вибрационных рабочих органов

О существенном сокращении сроков освоения скважин свидетельствуют данные опытов, проведенных трестом Промбурвод на объектах России, в которых после прокачки эрлифта осуществлялась гидровибрационная обработка пластов (таблица 1.2) [10].

Таблица 1.2 – Результаты виброобработки при разглинизации скважин

Местоположение скважины	Глубина скважины, м	Состав пород водоносного пласта	Виброустановка	Время работы вибратора, мин	Продолжительность виброобработки, сут.	Дебит скважины, м ³ /ч	
						до виброобработки	после виброобработки
пос. Громово	122	песчаник среднезернистый	ВУР-3	6	4,0	1,5	5,0
пос. Лосево	75	песчаник мелкозернистый	ВУР-3	7	1,5	4,5	11,0
д. Горка	77	песок разномзернистый	ВУР-3	15	0,2	0,5	0,7
пос. Солнечное	154	то же	ВУР-3	20	2,0	0,0	10,0
г. Кингисепп	152	то же	ВУР-3	28	0,5	2,0	5,0
пос. Ковалеве	42	то же	ВУР-3	13	0,3	0,2	1,0
ст. Заводское *	50	галечник	ВУР-4	20	1,0	1,0	4,3

Во всех случаях достигнуто значительное увеличение дебита скважин. Гидровибрационная обработка оказалась весьма эффективной при де-кольтмации скважин, эксплуатирующихся относительно короткое время (до 5 лет) и снизивших дебит вследствие отложений на фильтрах и в прифильтровых зонах необезвоженных гидроокислов железа (таблица 1.3) [10].

Таблица 1.3 – Результаты виброобработки при декольтмации скважин

Местоположение и номер скважины	Глубина скважины, м	Состав пород водоносного пласта	Длительность эксплуатации, годы	Виброустановка	Время работы вибратора, мин.	Дебит скважины, м ³ /ч		
						При сдаче в эксплуатацию	до виброобработки	после виброобработки
ст.Войбокало, 22635	35	песок разномзернистый	4	ВУР-2	5	7,2	1	4
г.Воронеж, 32158	65	песок крупнозернистый	6	ВУР-3	15	98	12	100
16070	50	то же	7	ВУР-3	20	90	42	60
24456	27	то же	5	ВУР-2	12	70	60	90
28311	44	то же	5	ВУР-3	5	220	180	220
32271	61	то же	6	ВУР-3	8	80	30	60

Вместе с тем, установки ВУР-1, ВУР-2, ВУР-3 не применяются в скважинах глубиной 200 м. из-за поглощения значительной части энергии колебаний колонной насосно-компрессорных труб, а установка ВУР-4 с погружным вибратором имеет очень сложную кинематическую схему, что затрудняет ее изготовление и эксплуатацию. Кроме того, большие габариты погружного вибратора установки не позволяют ее использовать для разглинизации фильтров малых диаметров (например, фильтры, диаметры которых, при разглинизации геотехнологических скважин внутренний диаметр часто составляет 70-90 мм).

1.3.2 Существующие погружные рабочие органы для гидровибрационной разглинизации пластов

Ряд авторов [19, 20] предложили более простые по конструкции погружные рабочие органы для гидровибрационной разглинизации пластов.

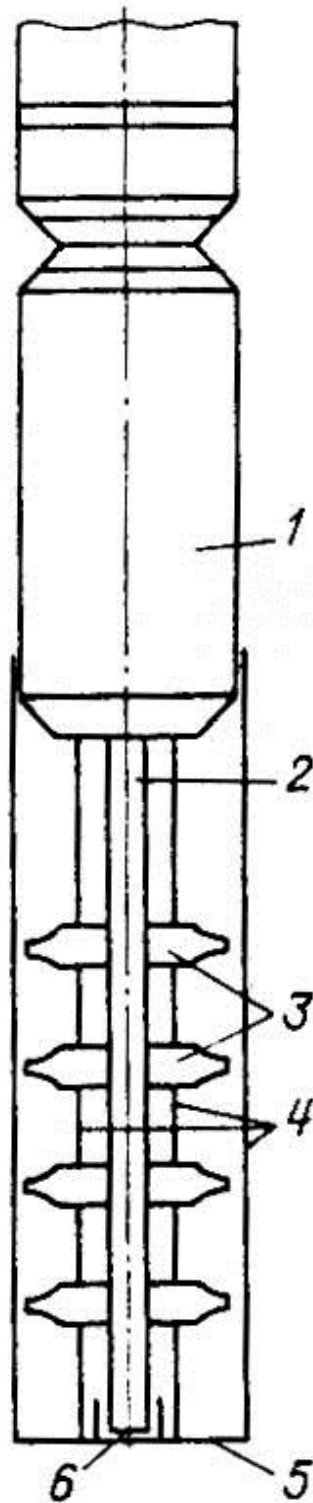
Вихревой скважинный аппарат [19] выполнен на основе устанавливаемого внутри фильтра погружного насосного агрегата типа АП или ЭЦВ с водозаполненным электродвигателем (рисунок 1.7). Вал электродвигателя имеет шлицевое соединение с пропущенной через пятю электродвигателя штангой 2. В месте сопряжения вращающейся штанги 2 с пятой электродвигателя установлено сальниковое уплотнение. На штанге через 0,4-0,5 м закреплены радиально расположенные пластинчатые лопасти 3, имеющие на концах криволинейное сужение. Вал 2 с лопастями 3 заключен в стержневой цилиндрический каркас 4, предотвращающий касание лопастями поверхности фильтра. Основание каркаса 4 выполнено в виде диска 5 с подпятником 6 для вала 2.

При обработке скважины аппарат устанавливается на напорной трубе в верхней части фильтра, после чего включается насос 1. При вращении вала 2 на концах его лопастей, имеющих криволинейную форму, происходит образование вихрей. Воздействие вихревых пульсирующих токов воды обеспечивает разрушение, диспергирование и вымывание малопрочных слабосцементированных кольматирующих отложений. Одновременно при работе аппарата скважинная вода вместе с находящимся в ней диспергированным шламом, отделившимся от фильтра под действием вихревых пульсирующих токов жидкости, откачивается насосом 1 из скважины и по нагнетательной трубе выносится к устью скважины.

После обработки верхнего интервала фильтра аппарат опускается ниже (путем наращивания напорной трубы насоса) и производится очистка следующего участка фильтровой трубы. Перемещение аппарата вдоль фильтра соответствует расстоянию от насоса 1 до диска 5. Таким образом,

фильтр последовательно очищается по всей длине.

Хотя данные об испытании вихревого аппарата отсутствуют, следует ожидать недостаточную эффективность его использования, так как он не обеспечивает знакопеременность гидродинамического давления на фильтр и заглинизированный пласт.



1 – насос; 2 – вал; 3 – пластинчатые лопасти; 4 – стержневой каркас;
5 – опорный диск; 6 – подпятник

Рисунок 1.7 – Вихревой скважинный аппарат [19]

Гидравлический вибратор [20] может быть использован в комплекте с промывочными насосами, создающими давление в 3-10 МПа. Гидравлический вибратор (рисунок 1.8) выполнен в виде цилиндрического корпуса 15, внутри которого между фланцами 14 жестко закреплена мембрана 13, из упругой стали или резины. Через мембрану 13 по оси корпуса пропущена труба 16, жестко закрепленная на мембране. На трубе 16 установлен перепускной клапан 17, который перекрывает отверстие 6 в основании корпуса 15. Клапан 17 прижат к седлу пружины 11, расположенной между направляющей трубкой 10 и кольцом 12, прикрепленным к трубе 16. Подача воды в полость 7 между мембраной 13 и клапаном 17 производится по трубкам 8, сообщаясь с буровой трубой 9, присоединенной к насосу высокого давления, расположенному на поверхности земли вблизи устья скважины.

Под отверстием 6 установлена замкнутая камера 18, через основание которой проходит труба 16; при этом место стыка снабжено сальником 19, предотвращающим утечку воды. Внутри камеры 18 труба 16 имеет на боковой поверхности входные отверстия 5. За пределами камеры 18 на трубе 16 установлены с интервалом 40-50 см диски 4, диаметром на 0,5-1,0 см меньше диаметра фильтра. Между дисками 4 на боковой поверхности трубы 16 находятся выходные отверстия 3. Труба 16 с дисками 4, заключена в цилиндрический стержневой каркас 2, служащий для предотвращения касания дисками 4 боковой поверхности фильтров. Каркас 2 сверху крепится к корпусу 15, а снизу – к опорному диску 1.

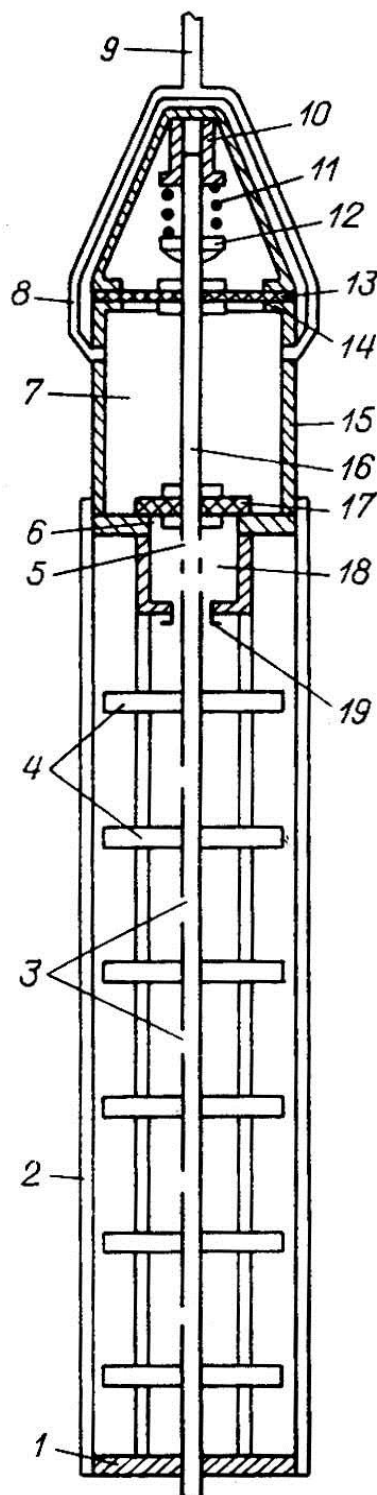
Скважинный аппарат монтируется на колонне буровых труб 9 и устанавливается внутри фильтра скважины, после чего вода нагнетается насосом по трубе 9 и трубкам 8 в полость 7. Под действием давления воды мембрана 13 отжимается, и жестко связанный с ней клапан 17 открывает отверстие в днище корпуса 15. Вода устремляется в камеру 18, входит в отверстие 5, проходит по трубе 16 и выбрасывается из отверстий 3, расположенных между дисками 4.

После этого давление воды в полости 7 падает, и под действием пружины 11 мембрана 13 и клапан 17 возвращаются в начальное положение, перекрывая отверстие в днище корпуса. Затем цикл повторяется в той же последовательности.

При вибрации трубы 16 с дисками 4 в воде, заполняющей фильтр, образуются гидродинамические импульсы с давлением 0,2-0,5 МПа. При одновременном воздействии импульсных высокочастотных нагрузок и высоконапорных пульсирующих струй воды кольматирующие фильтр и прифильтровую зону отложения разрушаются, диспергируются и выносятся с потоком воды через затрубное пространство.

После обработки первой зоны фильтра, соответствующей длине трубы 16 наращивают колонну труб 9 на указанную длину и производят обра-

ботку следующего интервала фильтровой трубы. Таким образом, фильтр скважины обрабатывают по всей длине.



- 1 – опорный диск; 2 – стержневой каркас; 3 – выходные отверстия; 4 – диски;
 5 – входные отверстия; 6 – отверстие; 7 – полость; 8 – распределительные трубки;
 9 – бурильная труба; 10 – направляющая трубка; 11 – пружина; 12 – опорное кольцо;
 13 – упругая мембрана; 14 – фланцы; 15 – цилиндрический корпус; 16 – труба;
 17 – клапан; 18 – замкнутая камера; 19 – уплотнение

Рисунок 1.8 – Гидравлический вибратор для обработки фильтров [20]

Испытания показали, что гидравлический вибратор при давлении 5 МПа и расходе воды 5,0 л/с обеспечивает частоту колебаний 8-10 Гц при амплитуде

4-6 мм, т.е. имеет такие же параметры, как широко используемые установки типа ВУР.

Недостатком аппарата являются относительно большие габариты, большой расход воды для его работы и невозможность его применения для разглинизации фильтров диаметром менее 100 мм, что характерно для конструкций геотехнологических скважин.

1.3.3 Разработка погружных технических средств, основанных на акустическом методе разглинизации пластов

Разновидностью методов, основанных на использовании гидромеханических колебаний для освоения скважин, является акустический метод, разработанный под руководством А.Б. Мещенского [21].

Для реализации способа создана установка УЗРС, смонтированная на автоприцепе грузоподъемностью 4 т. В комплект установки входят генератор тока высокой частоты ВПЧ-30/8000, щит управления и контроля, электролебедка с силовым кабелем типа КРИТ для питания излучателей ультразвукового снаряда, центробежный насос для водяного охлаждения преобразователя частоты, проволоочный ерш для обработки внутренней полости фильтра, два резиновых шланга длиной по 150 м, вентилятор и электронагреватель.

Основным рабочим органом установки является ультразвуковой снаряд. Он состоит из двух магнитострикционных излучателей, соосно закрепленных на стальной опорной трубе. Излучатели представляют собой полые цилиндры, набранные из плоских никелевых колец толщиной 0,1-0,2 мм. Внешний диаметр излучателя 220 мм, внутренний 150 мм, высота активной части 250 мм. Резонансная частота питающего тока 8 кГц. Обмотка излучателей выполнена в закрытых вертикальных пазах.

Излучатели сверху и снизу ограничены пневматическими пакерами с резиновыми оболочками, закрепленными на опорной трубе. Между излучателями и трубой имеется полость шириной 30 мм. Участок трубы между пакерами перфорирован отверстиями диаметром 18 мм. Общая длина снаряда 1500 мм, внешний диаметр (излучатели и пакеры) – 240 мм. Длина рабочей части 750 мм.

При испытаниях установка дала положительные результаты.

Однако установка имеет высокую стоимость, значительную массу и поперечные размеры, что ограничивает ее область применения.

Скважинные ультразвуковые аппараты, создающие акустические ко-

лебания под действием струи высокой скорости [22] просты по конструкции, дешевы, компактны, позволяют совместить обработку акустическими колебаниями с промывкой. Однако они маломощны и способны создавать амплитуду давления всего до 0,01 Мпа, что в ряде случаев достаточно для разглинизации фильтра, но недостаточно для декольметации прифилтровой зоны пласта.

Одной из новых разработок, использующих импульсы давления жидкости в качестве энергии разрушения кольматанта является гидравлический генератор импульсов давления (ГИДГ-1), разработанный И.И. Толокновым и др. [23]. Принцип действия основан на выхлопе в призабойную зону порции жидкости под высоким давлением с образованием и схлопыванием вакуумной полости.

Генератор предназначен для освоения и восстановления гидрогеологических и нефтяных скважин. Привод генератора осуществляется буровыми насосами, оборудованными бустерами или компрессорами высокого давления, а в качестве рабочей жидкости может служить вода, воздух или двухфазная жидкость. Гидроимпульсы высокого давления получают посредством продавливания резинового шара через седло клапана (патенты № 1797659, 2010973, 2011801 и др.).

Преимуществами ГИДГ-1 являются возможность его применения с предварительным насыщением рабочего агента углеводородным газом, двуокисью углерода, азотом или дымными газами с последующей закачкой вместе с раствором соляной кислоты или ПАВ, что позволяет увеличить эффективность воздействия на кольматант буровой скважины. К недостаткам данного способа можно отнести необходимость применения высокоэнергоемкого оборудования и труб, обеспечивающих свободное прохождение резиновых шаров и выдерживающих высокое давление.

Освоение скважин при помощи струйных аппаратов частично устраняет недостатки, присущие способам, перечисленным выше за счет применения в качестве привода водоструйного насоса серийных буровых насосов серии НБ-3 и НБ-4, исследования, которые проводили С.Л. Драхлис и В.В. Беретов, показали положительное воздействие жидкости, создаваемое работой поршневого насоса, на процесс разрушения и удаления кольматанта из призабойной зоны скважины.

Положительными факторами, проявляющимися при использовании струйных насосов, являются совмещение окончания бурения скважины с началом процесса ее освоения, а также обработка пласта в режиме репрессии пласта и его резкой разгрузки, сочетающаяся с колебаниями давления жидкости, вызываемыми неравномерностью подачи бурового насоса.

К недостаткам данного способа можно отнести необходимость освоения пласта через фильтр, что снижает эффект очистки за счет увеличения

сопротивлений, а также ограничений по глубине применения (не более 90 м), обусловленных напорными характеристиками водоструйных насосов.

Проведенный анализ методов и средств разглинизации водоносных пластов позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее перспективными для декольматации водоносных пластов и фильтров буровых скважин является гидровибрационный метод, обеспечивающий создание знакопеременных давлений на объекты и сжатые сроки разглинизации.

2. Существующие устройства для гидровибрационной декольматации либо не обеспечивают эффективную работу при глубине скважин свыше 200 м (привод рабочего органа расположен на поверхности), либо сложны по конструкции и обладают достаточно большими габаритами (погружные вибраторы).

3. Создание малогабаритных рабочих погружных органов для гидровибрационной разглинизации глубокозалегающих водоносных пластов (до 500 м), обладающих достаточной мощностью и малыми поперечными размерами, является актуальной проблемой, ждущей своего решения.

2 ПАРАМЕТРЫ ГИДРОВИБРАЦИОННОЙ ДЕКОЛЬМАТАЦИИ ФИЛЬТРОВ И ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

Как было отмечено выше, основная идея работы заключается в использовании забойной ударной машины в качестве генератора знакопеременных давлений, передающихся столбу жидкости, заполняющей скважины. Целью исследования, изложенных в настоящем разделе, является установление закономерностей между основными параметрами колебательной системы «генератор – жидкость» и прочностными характеристиками кольматантов на фильтре и водоносном пласте, вскрытом с промывкой глинистым раствором.

2.1 Основные закономерности распространения упругих колебаний в жидкости

Современные забойные машины способны генерировать колебания в жидкости с частотой до 50 Гц [25, 26, 27, 57], что значительно меньше ультразвуковых колебаний, частота которых превышает 20 кГц.

Известны устройство для разрушения горных пород, выполненное в виде перфорированной трубы, размещаемой в предварительно заполненном жидкостью шпуре с последующим созданием в полости перфорированной трубы гидроударной волны [75], а также устройства для разглинизации горных пород, реализующие энергию гидравлического удара, инициируемую в столбе жидкости, заполняющей шпур [76, 77], в устройствах направленной колки блоков крепких горных пород [78].

Рассмотрим процесс периодического ударного воздействия на столб жидкости, находящейся в длинном цилиндрическом сосуде, с жестким дном. Периодические удары наносятся коротким жестким грузом (ударником), имеющим массу m_1 и предударную скорость v_1 (рисунок 2.1).

Согласно волновой теории Сен-Венана [28] при ударе скорости распространения напряжений и деформаций ограничиваются скоростями звука в материале соударяющихся тел. В этой связи при ударе по телу большой протяженности (в данном случае по столбу жидкости) в соударении участвует не вся ее масса, а только та ее часть m_{y2} , на которую успела распространиться ударная волна за время t . При этом последнее не должно превышать длительности ударного импульса T_u (продолжительности удара t_y), т.е. $0 < t_y$ [29].

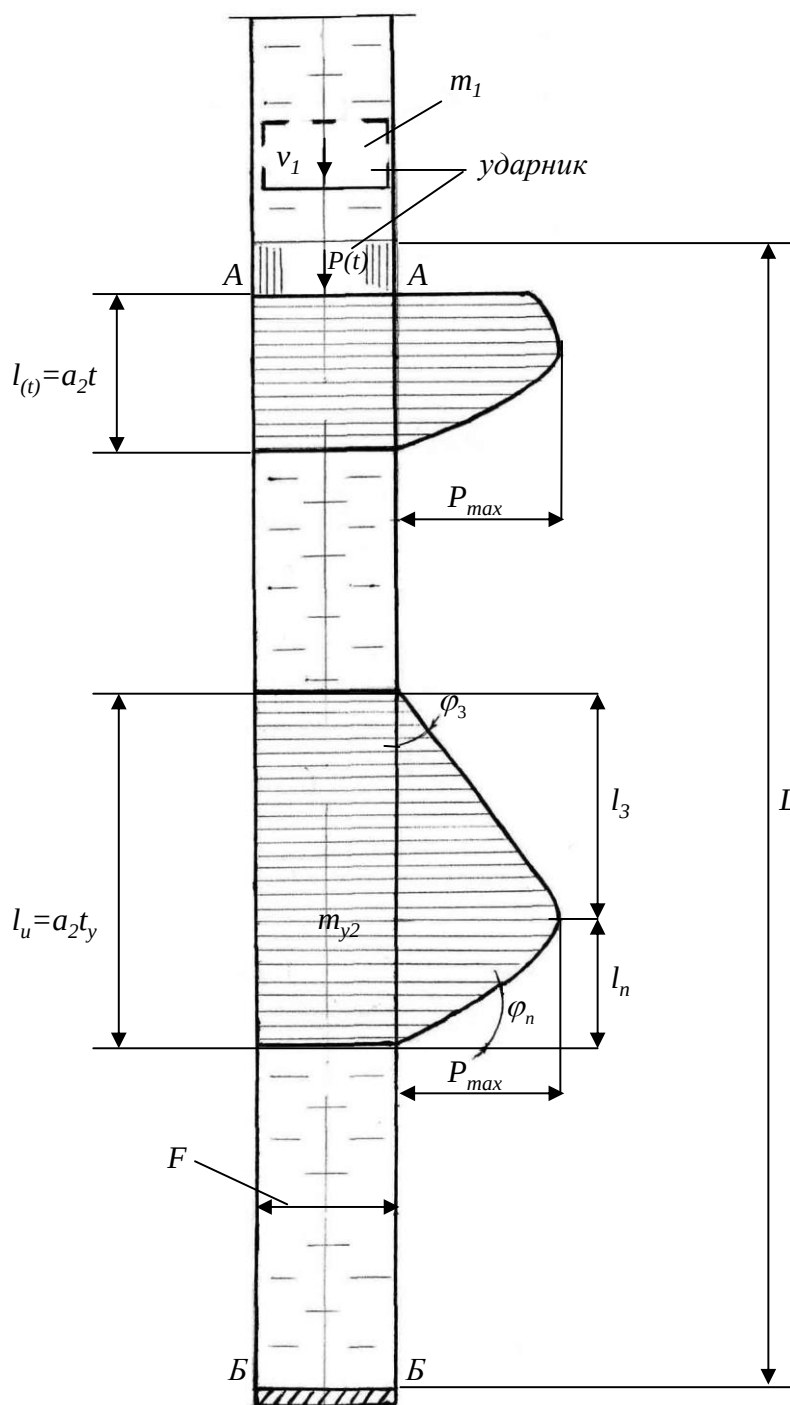
Тогда масса жидкости m_{y2} , охваченная волной, выразится [28]:

$$m_{y2} = \rho_{ж} F a_2 t, \quad (2.1)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

F – площадь поперечного сечения столба жидкости, м²;

a_2 – скорость звука в жидкости, которая, в свою очередь, определяется из



m_1 – масса ударника; v_1 – скорость ударника; m_{y2} – масса жидкости, охваченная волной в период t удара; a_2 – скорость звука в жидкости; t_u – длительность импульса, равная продолжительности удара t_y ; $l_u = a_2 t_y$ – длина импульса; P_{max} – амплитуда импульса; φ_n, φ_3 – крутизна переднего и заднего фронтов импульса; l_n, l_3 – длина переднего и заднего фронтов импульса

Рисунок 2.1 – Удар в волновой системе

соотношения:

$$a_2 = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho_{ж}\beta}}, \quad (2.2)$$

где $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости, Па;
 β – сжимаемость жидкости, Па⁻¹.

Сила, приложенная к торцу $A-A$ жидкостного стержня в течение времени t , заставит охваченный волной участок жидкости двигаться со скоростью v в соответствии с известной зависимостью:

$$Pt = m_{y2}v_0. \quad (2.3)$$

Подставляя (2.1) в (2.3), получим:

$$P = \rho_{ж} a_2 F v, \quad (2.4)$$

откуда

$$v = \frac{P}{\rho_{ж} a_2 F_0}. \quad (2.5)$$

Перемещение торца $A-A$ за время удара равно:

$$x_2 = vt = \frac{Pt}{\rho_{ж} a_2 F}, \quad (2.6)$$

Работа силы P на пути x_2 равна:

$$A = Px_2 = \frac{P^2 t}{\rho_{ж} a_2 F} = \frac{P^2 t}{C}. \quad (2.7)$$

Показатель $C = \rho_{ж} a_2 F$ называется ударной жидкостью или импедансом, или волновым сопротивлением.

Кинетическая энергия A_k охваченной ударной волной части стержня с учетом (2.1) и (2.5) равна [28]:

$$A_k = \frac{m_{y2} v^2}{2} = \frac{P^2 t}{2C}. \quad (2.8)$$

Сравнивая (2.7) и (2.8), можно видеть, что в кинетической форме жид-

костной волновод получает только половину переданной ему энергии. Вторую половину составляет потенциальная энергия упругой деформации, которая проявляется в повышении давления в охваченной волной части жидкостного стержня. Если через время T_u действие силы P со стороны ударника прекратится, то к этому моменту волной будет охвачен участок жидкостного волновода длиной $L_u = a_2 T_u$ (рисунок 2.1). Эта волна будет распространяться по жидкости и после окончания действия силы P . Охваченный напряжениями участок столба жидкости длиной L_u , перемещающийся со скоростью звука, называют силовым (ударным) импульсом.

Различают (рисунок 2.1) длительность импульса T_u , равную продолжительности удара t_y , длину импульса $L_u = at_y$; амплитуду импульса $P_{\max}$, скорость сечений жидкости v в импульсе, напряжения (давления) в импульсе $\sigma = P/F$. Если последние не превосходят предела упругости жидкости, импульс распространяется без искажений длительности и амплитуды, т.е. почти без потерь энергии, что подтверждается экспериментальными данными [28,59,60,61,62].

Сила удара P может быть не только постоянной, но и переменной во времени величиной. Поэтому силы и скорости в отдельных сечениях в импульсе могут быть различными. При $P = \text{const}$ диаграмма импульса имеет форму прямоугольника. Прямоугольный импульс характеризуется постоянной амплитудой $P_{\max}$ и продолжительностью T_u . Если $P \neq \text{const}$, то, помимо указанных двух параметров, импульс дополнительно характеризуется длиной и крутизной переднего L_u , φ_n и заднего l_3 , φ_3 фронтов импульса (рисунок 2.1).

В рассмотренной на рисунке 2.1 схеме удара направление волны напряжений совпадает с направлением смещения частиц жидкости в импульсе. Такие волны называются продольными. Существуют такие поперечные волны, или волны сдвига, у которых смещение частиц происходит в перпендикулярном направлении относительно распространения продольных волн. Как будет показано в дальнейшем, продольные волны возникают при гидровибрационной разглинизации при забойной части скважины.

Скорость распространения поперечных волн a_n определяется из соотношения [30]:

$$a_n = \sqrt{G / \rho_{жс} \beta}, \quad (2.9)$$

где G – модуль сдвига жидкости, Па.

Скорость продольных волн в $\sqrt{3}$ раз больше, чем скорость поперечных.

Важно отметить, что ударный импульс (рисунок 2.1), перемещающийся в направлении ко дну жидкостного волновода в виде волны сжатия, дойдя до преграды *ББ*, отражается от последней в виде волны растяжения. Если преграда совершенно жесткая, недеформируемая, то амплитуда отраженного импульса удваивается. В реальных условиях часть энергии поглощается преградой. Например, при падении волны из воды на стальную преграду будет отражено 86% энергии и только 14% пройдет в сталь [30].

Важной особенностью воздействия ударных импульсов на жидкость, является чрезвычайная чувствительность последней к растягивающим напряжениям, возникающим при движении отраженного от преграды импульса. При его движении в направлении *А-А* (рисунок 2.1) в жидкости образуется большое количество разрывов в виде пузырьков. Эти мельчайшие полости, так называемые кавитационные пузырьки, после кратковременного существования захлопываются во время фазы сжатия в волне, развивая при этом большие местные мгновенные давления. Это явление используется в ряде случаев для промышленных целей и, очевидно, в значительной степени присутствует при декольматации фильтров и заглинизированных водоносных пластов.

При движении отраженного от преграды *Б-Б* импульса возможны два варианта:

- отраженный импульс не встретит на своем пути длиной *L* (рисунок 2.1) к торцу *А-А* жидкостного волновода встречного импульса, сформированного следующим ударом по волноводу;
- отраженный импульс встретит последующий ударный импульс, несущий волну сжатия и будет взаимодействовать с ним.

Первый случай подразумевает, что торец *А-А* свободен от нагрузки поэтому при встрече со свободной поверхностью произойдет удваивание скорости движения частиц в импульсе.

Во втором случае произойдет наложение двух импульсов сжатия и разрежения друг на друга, т.е. интерференция волн. В результате энергия суммарного импульса будет значительно ослаблена. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе частоты ударных импульсов, передаваемых от ударника жидкостному волноводу.

Из изложенного следует, что для усиления ударного эффекта последующий удар по верхнему торцу жидкостного волновода следует наносить в момент, когда волна растяжения отразится от упомянутого торца.

2.2 Параметры гидравлических ударов при гидровибрационном освоении геотехнологических водозаборных скважин

Рассмотренные общие закономерности распространения ударных импульсов в столбе жидкости позволяют обосновать модель процесса гидро-

вибрационной декольматации фильтров и водоносных пластов гидрогеологических и геотехнологических скважин. Первоначально кратко рассмотрим технологию сооружения фильтровой части водозаборной скважины при широко применяемом роторном бурении.

После вскрытия водоносного пласта с промывкой глинистым раствором, установки и цементирования эксплуатационной колонны в скважину опускается фильтровая колонна, которая чаще всего устанавливается «впотай». При спуске сетчатые и другие фильтры, имеющие малые пропускные отверстия, как правило, покрываются глинистой коркой ввиду того, что в скважине имеется глинистый раствор необходимой плотности для предотвращения обрушения стенок скважины в интервале водоносного пласта. Таким образом, перед разглинизацией фильтра и пласта призабойная часть скважины будет иметь вид, показанный на рисунке 2.2.

Для возбуждения ударных импульсов в жидкости, находящейся в призабойной части скважины, в зону фильтра на бурильных трубах опускается генератор колебаний (гидро- или пневмоударник) (рисунок 2.3). Последний оснащен подпружиненной наковальней, оканчивающейся диском, диаметр которого близок к внутреннему диаметру фильтра. При работе генератора боек наносит по наковальне с определенной частотой периодические удары, которые через диск передаются жидкости. В результате в последней формируются волны сжатия, которые со скоростью звука перемещаются к заглушке отстойника и, отражаясь, трансформируются в обратные волны растяжения. Как было указано выше, прочность жидкости при этом виде деформации мала. Поэтому в жидкости образуются разрывы, которые затем захлопываются под действием большого перепада давления.

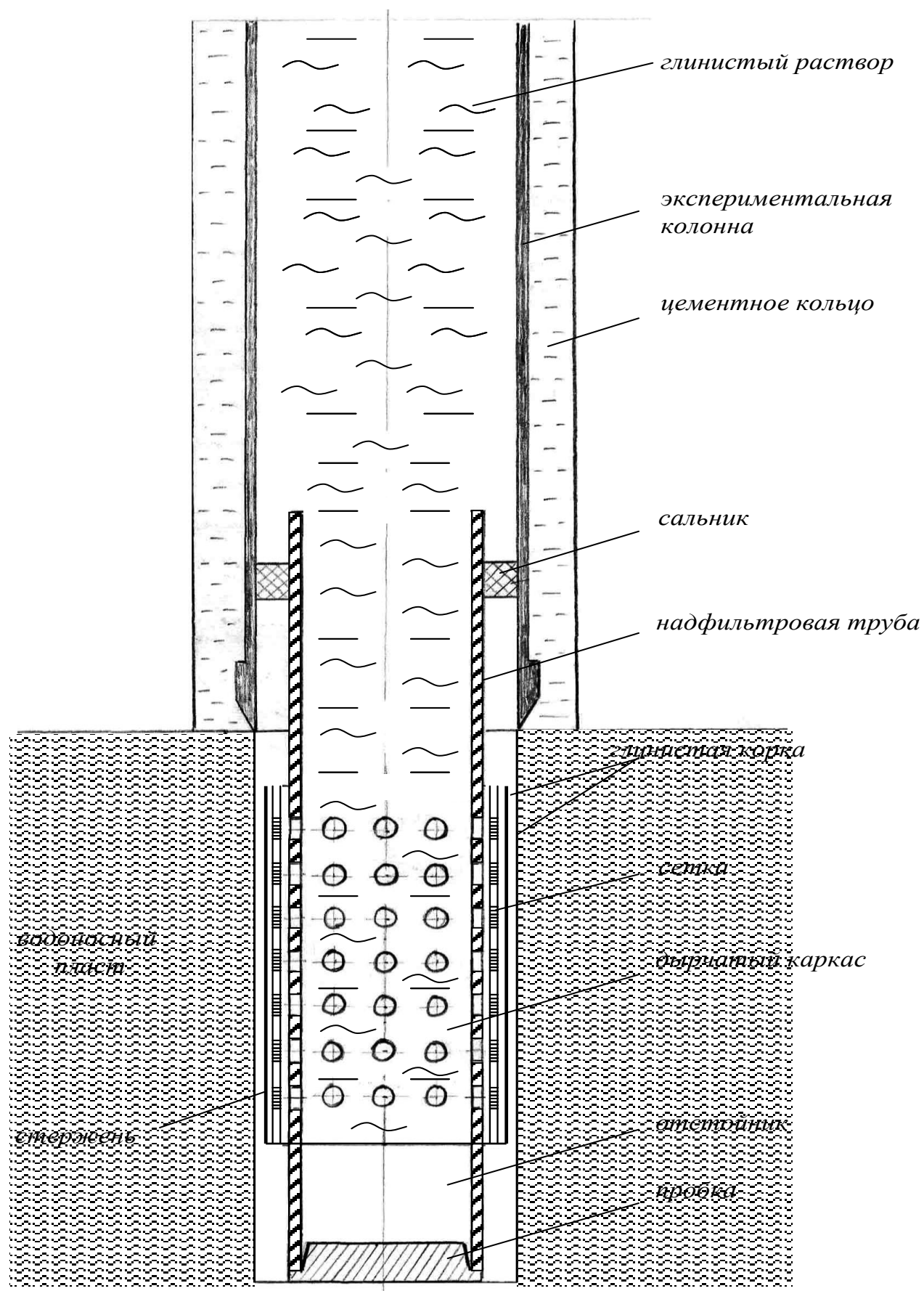


Рисунок 2.2 – Фильтровая часть скважины перед разглинизацией

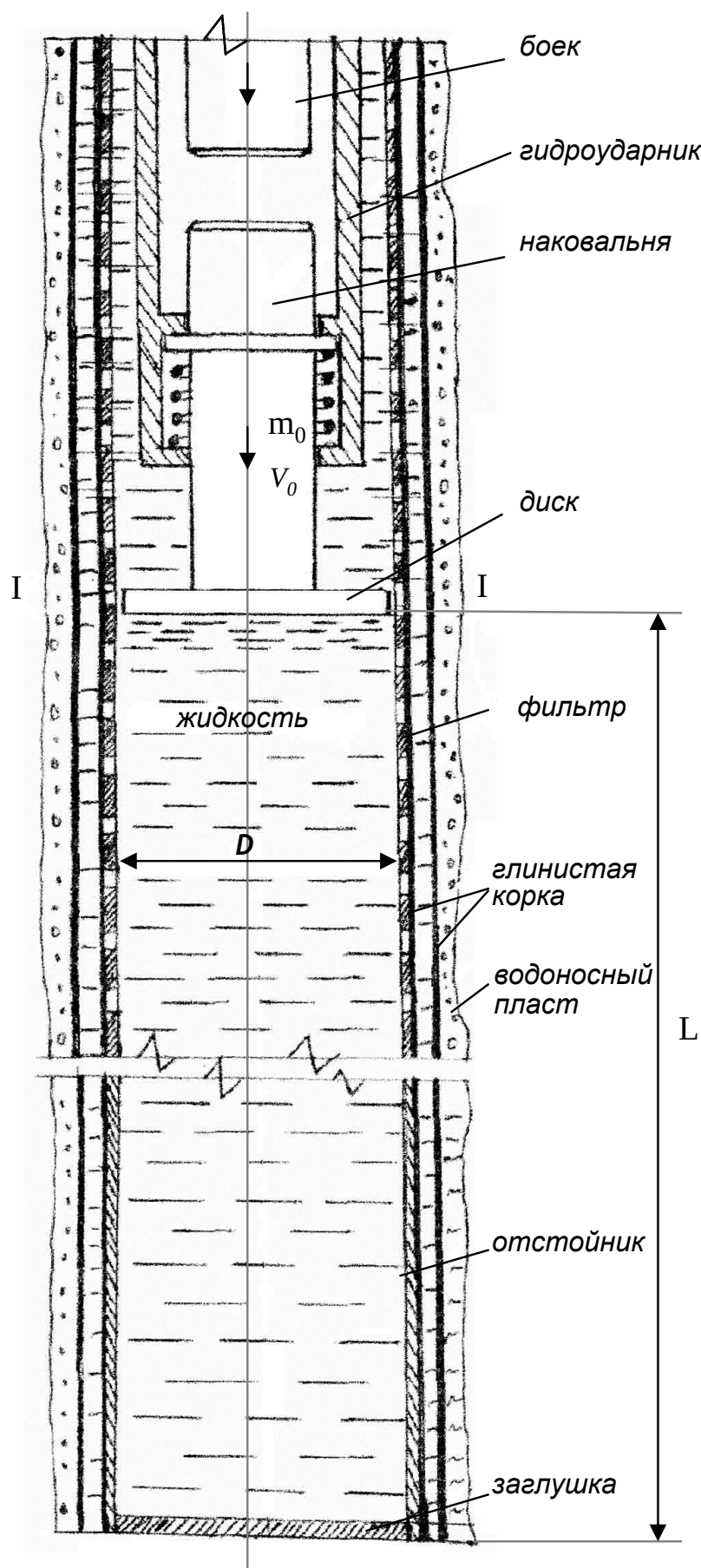


Рисунок 2.3 – Схема вибрационного освоения водоносного пласта

В результате возникающих знакопеременных давлений глинистая корка на фильтре и водоносном пласте обрушается, а последующая откачка выносит продукты декольматации на поверхность. Здесь, очевидно, значительное влияние на прочность глинистой корки оказывают усталостные процессы, возникающие в результате высокочастотного знакопеременного давления в жидкости, которое передается на фильтр и стенки закольматированного пласта.

Определим параметры гидравлического удара диском наковальни по жидкости (рисунок 2.3).

Первоначально рассмотрим процесс ударного взаимодействия бойка генератора с наковальней. Для того, чтобы определиться, какой теорией пользоваться при изучении указанного процесса (классической или волновой), вычислим критерий применимости β , который определяется из соотношения [7]:

$$\beta = \frac{\pi C_2 a_2}{g_0 L_B \delta}, \quad (2.10)$$

где $C_2 = \rho_2 a_2 F_2$ – волновое сопротивление ударяемого тела (наковальни);

ρ_2 , a_2 , F_2 – соответственно плотность, скорость звука в наковальне, площадь ее поперечного сечения; a_1 – скорость звука в материале бойка (ударника); для стали $a_1 = a_2 = 5000$ м/сек;

g_0 – ударная жесткость; для стали $g_0 = 1,6 \cdot 10^8$ н/м;

L_B – длина бойка (ударника);

δ – параметр, определяемый по формуле:

$$\delta^2 = \frac{4C_2^2}{Mg_0} - 1,$$

где M – масса бойка ударника.

Если критерий $\beta > 3$, то для соударения бойка с наковальней правомерно использование законов классической теории удара Ньютона.

В качестве примера вычислим критерий β для гидроударника Г59В, имеющего энергию единичного удара $E = 7$ Дж, который можно применить в качестве генератора ударных импульсов в фильтровой колонне геотехнологических скважин, имеющей внутренний диаметр 74 мм и длину фильтровой части вместе с отстойником порядка 20 м (указанные размеры фильтровых колонн применяются для сооружения геотехностических скважин на объектах ОАО «Волковгеология»).

Боек гидроударника Г59В имеет массу $M = 4$ кг, длину $L_B = 0,3$ м и предударную скорость $V = 1,87$ м/с.

Наковальня (рабочий орган) с учетом толщины корпуса и необходимости размещения пружины ориентировочно должен иметь диаметр $d_2=0,03$ м; плотность стали $\rho=7850$ кг/м³; средняя площадь сечения наковальни:

$$F = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi}{4} (0,03)^2 = 0,0007 \text{ м}^2.$$

С учетом указанных исходных данных получены следующие значения параметров:

$$C_2 = 7850 \cdot 5000 \cdot 0,0007 = 27475 \text{ кг/с},$$

$$\delta = \sqrt{\frac{4 \cdot (27475)^2}{L \cdot 1,6 \cdot 10^8} - 1} = 1,42,$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot 27475 \cdot 5000}{1,6 \cdot 10^8 \cdot 0,3 \cdot 1,42} = 8,8 > 3.$$

Подобные расчеты были проведены и для других известных моделей гидро- и пневмоударников. Во всех случаях, при соударении бойка с наковальней с учетом их конструктивных размеров оказалось, что критерий применимости β варьирует от 5,8 до 9.

Поэтому при вычислении коэффициента η передачи энергии от бойка наковальне при ударе правомерно пользоваться известным законом Ньютона [28]:

$$\eta = \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2}. \quad (2.11)$$

Как показывают эксперименты, при существующих конструктивных размерах бойка и наковальни забойных машин КПД передачи энергии η составляет 75-80% [31, 32].

Таким образом, наковальне будет передано энергии:

$$A_n = \eta A_o. \quad (2.12)$$

При известной массе рабочего органа m_0 (наковальня с диском) вычисляется его начальная скорость v_0 :

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\eta A_o}{m_0}}. \quad (2.13)$$

Следовательно, схема расчета сводится к динамической модели, изоб-

раженной на рисунке 2.4. Жесткий груз (боек), имеющий массу M , наносит удар со скоростью V , по торцу массы m_0 , которая опирается на пружину податливости $\delta_{пр}$. Масса m_0 в свою очередь наносит жесткий удар по жидкоостному волноводу, который моделируется пружиной, имеющей податливость $\delta_{ж}$ и длину L (как следует из вышеизложенного, местной податливостью при ударе массы M по массе m_0 пренебрегаем).

В данном случае имеется параллельное соединение пружин. Поэтому при расчете их жесткости $K_{пр}$ и $K_{ж}$ можно заменить эквивалентной жесткостью K_{Σ} по формуле [33]:

$$K_{\Sigma} = K_{пр} + K_{ж}. \quad (2.14)$$

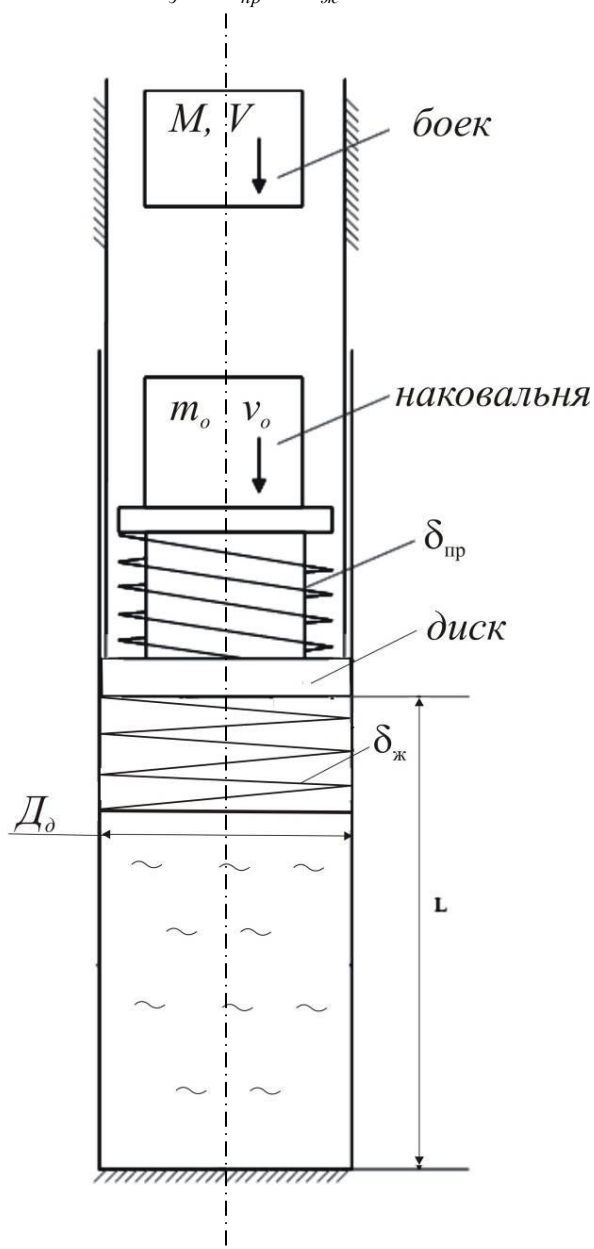


Рисунок 2.4 – Динамическая модель процесса

Так как $K_{np} = 1/\delta_{np}$, $K_{жс} = 1/\delta_{жс}$ и $K_{\vartheta} = 1/\delta_{\vartheta}$, то эквивалентная податливость определяется из соотношения

$$\frac{1}{\delta_{\vartheta}} = \frac{1}{\delta_{np}} + \frac{1}{\delta_{жс}}. \quad (2.15)$$

Из (2.15) имеем

$$\delta_{\vartheta} = \frac{\delta_{np} \delta_{жс}}{\delta_{жс} + \delta_{np}}. \quad (2.16)$$

Для динамической модели (рисунок 2.4) определяются следующие параметры:

- длина L_1 , пройденной волной сжатия за время удара;
- время удара t_y ;
- максимальная сила удара $P_{\max}$;
- максимальное давление, $P_{\max}$ в волне сжатия.

Решение задачи об ударе жесткого груза по стержню (в данном случае, жидкостному волноводу) известно.

Приведем формулы изменения контактной силы $P_H(t)$ для указанных этапов удара.

Первый этап удара $\left(0 \leq t \leq \frac{2L}{a}\right)$:

$$P_{H1}(t) = \frac{V_0}{n\delta_{\vartheta}} e^{-mt} \sin(nt), \quad (2.17)$$

где $n = \sqrt{\frac{1}{\delta_{\vartheta}(M + m_0)} - \frac{a^2}{4\delta_{\vartheta}^2(EF)^2}};$

$$m = \frac{a}{2\delta_{\vartheta}(EF)}.$$

Расшифровка всех величин, входящих в формулу (2.17) дана выше. Если удар не заканчивается на первом этапе, т.е. сила $P_{H1}(t)$ не обращается в ноль, то вычисления следует продолжить.

Второй этап удара $\left(\frac{2L}{a} \leq t \leq \frac{4L}{a}\right)$:

$$P_{H2}(t) = \frac{V_0}{n\delta_{\vartheta}} \left\{ e^{-mt} \sin nt + 2 \frac{m}{n} e^{-m\theta} \cdot \left[\left(n\theta - \frac{m}{n} \right) \sin n\theta + m\theta \cos n\theta \right] \right\}, \quad (2.18)$$

где $\theta = t - \frac{2L}{a}$.

Если сила $P_{H2}(t)$ не обращается в ноль и на втором этапе удара, то вычисления продолжают для третьего этапа удара.

Третий этап удара $\left(\frac{4L}{a} \leq t \leq \frac{6L}{a}\right)$:

$$P_{H3}(t) = \frac{v_0}{n\delta_s} \left\{ e^{-mt} \sin t + 2 \frac{m}{n} e^{-m\theta} \left[\left(n\theta - \frac{m}{n} \right) \sin \theta + m\theta \cos n\theta \right] - 2 \frac{m}{n} e^{-m\theta_1} \left[\left(n\theta_1 - \frac{m}{n} \right) \sin \theta_1 + m\theta_1 \cos n\theta_1 \right] + \right. \\ \left. + 2 \frac{m^2}{n^2} e^{-m\theta_1} \left[\frac{3m^2 + n^2}{n^2} - 2m\theta_1 + (n^2 + m^2)\theta_1^2 \right] \sin n\theta_1 + 2 \frac{m^2}{n^2} e^{-m\theta_1} \left[-\frac{3m^2 + n^2}{n^2} + 2mn\theta_1^2 \right] \cos n\theta_1 \right\}, \quad (2.19)$$

где $\theta_1 = t - \frac{4L}{a}$.

Как следует из (2.17), (2.18), (2.19), по мере увеличения этапов удара вычисления $P_H(t)$ быстро усложняются.

В то же время из практики оборудования гидрогеологических скважин известно, что длина фильтра вместе с отстойником, т.е. длина L жидкостного волновода, как правило, превышает 10 м. Поэтому с большой вероятностью следует ожидать, что удар закончится на первом этапе и при расчете параметров следует пользоваться простой формулой (2.17).

Определим длину жидкостного волновода L_1 , при которой удар заканчивается на первом этапе [35] (приложение В). Подставим значение параметра n и время $t = 2L_1/a$ в формулу (2.17) и приравняем $P_{H1}(t)=0$:

$$\frac{v_0 e^{-mt}}{\sqrt{\frac{1}{\delta_s(M+m_0)} - \frac{a^2}{4\delta_s^2(EF)^2}}} \sin \left(\sqrt{\frac{1}{\delta_s(M+m_0)} - \frac{a^2}{4\delta_s^2(EF)^2}} \cdot \frac{2L_1}{a} \right) = 0. \quad (2.20)$$

Из (2.20) следует, что $P_{H1}(t)=0$ тогда, когда:

$$\sqrt{\frac{1}{\delta_s(M+m_0)} - \frac{a^2}{4\delta_s^2(EF)^2}} \cdot \frac{2L_1}{a} = \pi. \quad (2.21)$$

Из (2.21) определяем длину L_1 :

$$l_1 = \frac{a\pi}{2\sqrt{\frac{1}{\delta_s(M+m_0)} - \frac{a^2}{4\delta_s^2(EF)^2}}}. \quad (2.22)$$

Время удара t_y , если последний заканчивается на первом этапе, равно:

$$t_y = \frac{2L_1}{a_{жс}} \text{ с}, \quad (2.23)$$

а соответствующая частота ударов будет:

$$f = \frac{1}{t_y} \quad \text{Гц.} \quad (2.24)$$

Из зависимости (2.17) следует, что усилие по длине L , ударного импульса в начале удара возрастает, а к концу времени $t = 2L_1/a$ убывает до нуля. Найдем максимум усилия $P_{H1}(t)$. Взяв производную $dP_{H1}(t)/dt$ и приравняв ее к нулю, получим:

$$\frac{V_0}{\delta_3} [ne^{-mt} \cos(nt) - me^{-mt} \sin(nt)] = 0. \quad (2.25)$$

Зависимость (2.25) позволяет найти время t^* , при котором усилие $P_{H1}(t)$ максимально:

$$t^* = \frac{1}{n} \operatorname{arctg}\left(\frac{n}{m}\right). \quad (2.26)$$

Подставив значение t^* из (2.26) в (2.17), получим максимальную силу удара (амплитуду импульса):

$$P_{H1\max}^1 = \frac{V_0}{n\delta_3} \exp\left[-\frac{m}{n} \operatorname{arctg}\left(\frac{n}{m}\right)\right] \sin\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{n}{m}\right)\right]. \quad (2.27)$$

Максимальное давление волны $P_{g\max}$ будет в месте нахождения в рассматриваемый момент времени амплитуды импульса.

Величина $P_{g\max}$ определится из соотношения:

$$P_{g\max} = \frac{P_{H1\max}}{F_3} = \frac{4P_{H1\max}}{\pi D_0^2}, \quad (2.28)$$

где D_0 – диаметр диска, который приблизительно равен диаметру жидкост-

ного волновода (рисунок 2.3), т.е. $D_{\partial} \approx D_{ж}$.

В качестве примера приведем расчет параметров гидровибрационного рабочего органа, генератором ударных импульсов которого используется вышеуказанный гидроударник Г59В.

Исходные данные для расчета:

- энергия удара бойка гидроударника по наковальне $A=7$ Дж;
- масса бойка $M=4$ кг;
- ориентировочная масса рабочего органа (наковальни с диском) $m_0 \approx 6$ кг;
- коэффициент передачи энергии удара бойка рабочему органу $\eta=0,8$;
- длина жидкостного волновода $L_{ж}=20$ м;
- диаметр жидкостного волновода $D_{ж}=0,074$ м;
- податливость жидкости $\delta_{ж}=20 \cdot 10^{-6}$ м/Н;
- скорость звука в жидкости $a_{ж}=1200$ м/с;
- модуль упругости жидкости $E_{ж}=2 \cdot 10^9$ Па.

Расчет проводится в следующей последовательности.

1. По формуле (2.13) определяем скорость перемещения наковальни с диском после удара бойка гидроударника:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\eta A}{m_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,8 \cdot 7}{6}} \approx 1,37 \text{ м/с.}$$

2. Примем, что податливость пружины рабочего органа в 4 раза превышает податливость жидкости:

$$\delta_{np} = 4\delta_{ж} = 4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м/Н.}$$

3. Тогда по формуле (2.16) определяем эквивалентную податливость δ_{∂} :

$$\delta_{\partial} = \frac{\delta_{np}\delta_{не}}{\delta_{np} + \delta_{не}} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м/Н.}$$

4. Вычисляем параметры n и m , входящие в формулу (2.17):

$$n = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 10^{-6} \cdot (2+6)} - \frac{(1200)^2}{4 \cdot (4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (2 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-3})^2}} = 1,758 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1},$$

$$m = \frac{a_{жс}}{2\delta_3 EF} = \frac{1200}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 18,75 \text{сек}^{-1},$$

$$m = \frac{1200}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 18,75 \cdot 10^2 \text{с}^{-1}.$$

5. По формуле (2.22) определяем длину L_1 жидкостного волновода, при которой удар заканчивается на первом этапе:

$$L_1 = \frac{1200 \cdot \pi}{2 \cdot 1,758 \cdot 10^2} = 10,7 \text{ м}.$$

Так как $L_1 < L_{жс}$ по заданию, то удар закончится на первом этапе, и дальнейшие выкладки упрощаются, так как используется только формула (2.17).

1. Определяем время t_y удара по формуле (2.23):

$$t_y = \frac{2L_1}{a_{жс}} = \frac{2 \cdot 10,7}{1200} = 0,0178 \text{ с}.$$

7. По формуле (2.24) вычисляется максимальная частота ударов при полученном времени одного удара:

$$f = \frac{1}{0,0178} \approx 56 \text{ Гц (3360 уд/мин)}.$$

8. Время удара t_y делим на K (в данном случае на 8) частей и для каждого момента времени $\frac{t_y}{K}$; $2\frac{t_y}{K}$; $3\frac{t_y}{K}$... t_y вычисляем по формуле усилие (2,17) $P_H(t)$.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.1 и на рисунке 2.5.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов изменения контактной силы $P_H(t)$ на первом этапе удара

Время t	$\frac{t_y}{8}, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 2, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 3, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 4, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 5, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 6, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 7, \text{с}$	$\frac{t_y}{8} \cdot 8, \text{с}$
	0,00222	0,00445	0,00668	0,0089	0,0111	0,01335	0,01557	0,0178
усилие $P_H(t), \text{Н}$	711	1264	1583	1648	1465	1081	571	0

9. Время t^* , при котором $P_H(t)$ максимально на первом этапе удара,

рассчитывается по формуле (2.25):

$$t^* = \frac{1}{n} \operatorname{arctg}\left(\frac{n}{m}\right) = \frac{1}{175,8} \operatorname{arctg} \frac{175,8}{18,75} = \frac{1,46}{175,8} = 0,0083 \text{ с.}$$

Максимальная сила $P_{H1\max}$ удара, соответствующая времени t^* ; рассчитывается по формуле (2.27):

$$\begin{aligned} P_{H1\max} &= \frac{V_0}{n\delta_s} \exp\left[-\frac{m}{n} \operatorname{arctg}\left(\frac{m}{n}\right)\right] \sin\left[\operatorname{arctg} \frac{m}{n}\right] = \frac{1,37}{175,8 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} \exp\left[-\frac{18,75}{175,8} \cdot 1,46\right] \sin 84^\circ = \\ &= 0,00195 \cdot 10^6 l^{-0,1557} \cdot 0,9945 = \frac{1950}{l^{0,1557}} \cdot 0,9945 = \frac{1950 \cdot 0,9945}{1,168} = 1660 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Полученная величина $P_{H1\max}$ совпадает с таковой, приведенной на рисунке 2.5.

10. Принимаем диаметр диска рабочего органа, которым осуществляется непосредственный удар по жидкости, на 0,002 м меньше, чем диаметр жидкостного водовода. Тогда диаметр диска будет $D_\delta=0,072$ м, а площадь его торца:

$$F = \frac{\pi}{4} D_\delta^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0,072)^2 \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

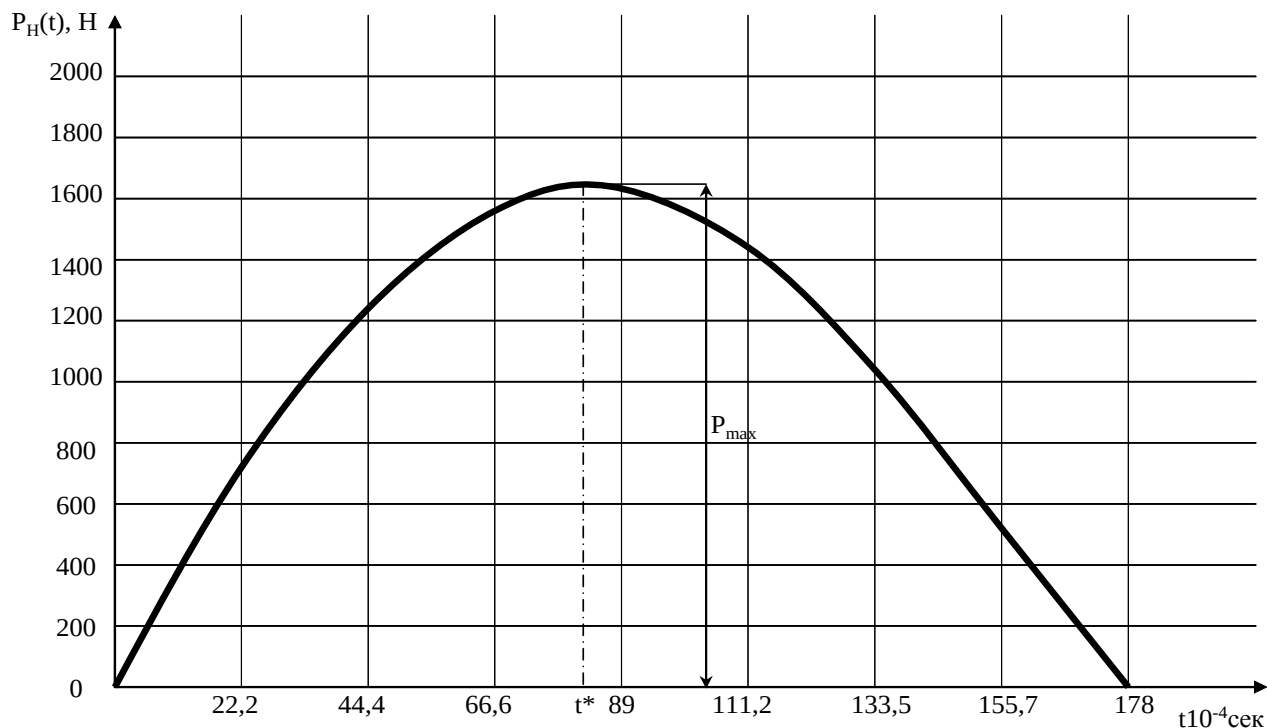


Рисунок 2.5 – Зависимость усилия $P_H(t)$ в жидкостном волноводе от времени удара t (энергия удара $A=7$ Дж, $m_0=6$ кг)

Максимальное давление в волне будет:

$$P_{g \max} = \frac{P_{H(t) \max}}{F} = \frac{1660}{4 \cdot 10^{-3}} = 415000 \frac{H}{M^2} = 4 \text{ атм.}$$

Такой перепад давления, как известно из работы [10, 13, 23], достаточен для эффективной разглинизации водоносного пласта и фильтра.

2.3 Оптимизация параметров экспериментального рабочего органа для гидровибрационного освоения водоносных пластов

Полученные в подразделе 2.2 закономерности позволяют установить оптимальные параметры рабочего органа для конструирования экспериментального образца устройства.

При этом, в качестве генератора ударных импульсов следует использовать серийно выпускаемые отечественные гидро- и пневмоударники, широко применяющиеся в горной промышленности и геологоразведке. Техническая характеристика некоторых наиболее известных забойных машин приведена в таблице 2.2 [25, 27, 36, 37, 38].

Выбираемая для освоения водоносных пластов забойная машина должна отвечать следующим требованиям:

1. Поперечные размеры рабочего органа и генератора ударных импульсов должны позволять размещать указанные механизмы внутри фильтровой колонны.

2. Сумма перепадов давления в генераторе ударных импульсов и перепадов, обусловленных сопротивлениями движению рабочего тела (жидкости или воздуха) по бурильной колонне и затрубном пространстве не должна превышать соответствующих паспортных данных бурового насоса (при использовании гидроударников или компрессора (при использовании пневмоударников).

3. Для эффективной декольматации фильтра и водоносного пласта необходимо, чтобы наибольшее давление в ударном импульсе по перемещающемуся жидкостному волноводу было бы не менее 0,4-0,5 МПа.

Таблица 2.2 – Техническая характеристика гидро- и пневмоударников

Параметры забойной машины	Гидроударники				Пневмоударники			
	Г-7	Г-9	ГВ-5	ГВ-6	П-105	РП-94	РП-111	РП-130
Диаметр корпуса, мм	70	54	73	57	100	94	111	130

Расход очистного агента; воды (в л/мин); воздуха (в м ³ /мин).	100-200	140-180	13-150	80-100	5-6	5-6	7-9	10-12
Перепад давления в машине, даН/см ²	15-30	15	10-15	5-8	2-3	2-3	2-3	2-3
Масса ударника (бойка) М ₀ , кг	11	10	8	6	3,0	4,4	6,4	8,4
Энергия единичного удара А, дж.	60-70	50-60	10-15	5-6	95	90-100	140-160	250-300
Число ударов в минуту	1200	1200	2800-3600	2500-3200	1600	1500-1800	1500-1800	90-1100
Длина, мм	2000	2500	1280	1570	650	958	982	1027
Масса машины, кг	50	31	26	25	30	36	46	62

Выполнение первого требования обеспечивает перемещение генератора ударных импульсов с рабочим органом внутри фильтра, что позволит создать условия, препятствующие гашению в результате наложения друг на друга прямой волны, движущейся к пробке отстойника фильтра, и обратной волны, отраженной от упомянутого отстойника.

Выполнение второго требования позволяет определить предельную глубину скважины, при которой возможно эффективное использование той или иной забойной машины. Например, эффективное применение гидроударников, используемых для бурения, а, значит, и для привода рабочего органа ограничивается глубиной скважины 800-900 м [39], а пневмоударников – с приводом от двух ступенчатых компрессоров, развивающих рабочее давление 0,7-0,8 МПа – глубиной до 100-150 м [40].

Выполнение третьего требования позволит определить максимальный диаметр дисков рабочего органа, при котором создается перепад давления в волне, равный 0,5 МПа, а следовательно, предельный внутренний диаметр фильтра, при котором возможна его эффективная декольматация.

Для реализации этих требований разработана программа для ЭВМ в системе Delphi 7, которая позволяет проводить по алгоритму, изложенному в 2.2, расчеты основных параметров процесса передачи ударных нагрузок от конкретного генератора ударных импульсов (гидро- или пневмоударника) через рабочий орган жидкостному волноводу (столбу жидкости, заполняющему фильтровую часть скважины) [41]. Блок-схема программы представлена в приложении Г. Особый интерес представляют следующие параметры процесса:

– максимальное усилие $P_{\max}$ в ударном импульсе, перемещающемся по жидкостному волноводу;

- максимальное давление, $P_{g\max}$, в жидкостном волноводе при прохождении ударного импульса максимальным усилием $P_{\max}$;
- длительность ударного импульса t_y , от которого зависит продолжительность силового воздействия на заглинизированный пласт и фильтр.

Разработанная программа расчета на ЭВМ позволила оперативно получить зависимости максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от податливости пружинной подвески рабочего органа δ_{np} . Указанные зависимости для известных типов гидро- и пневмоударников, отличающихся энергией единичного удара, массой поршня-бойка (ударной части машины), его предударной скоростью и частотой ударов, представлены на рисунках 2.6, 2.7, 2.8, 2.9.

Из рисунков 2.6-2.9 следует, что зависимости $P_{\max} = f(\delta_{np})$ и $t_y = f(\delta_{np})$ качественно однотипны: в интервале изменения податливости пружинной подвески рабочего органа $10 \cdot 10^{-6} \text{ м/н} < \delta_{np} < 20 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$ величина $P_{\max}$ незначительно повышается в направлении уменьшения δ_{np} . При уменьшении δ_{np} в два раза (с $20 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$) величина $P_{\max}$ повышается всего на 80-10%. Дальнейшее уменьшение податливости пружинной подвески рабочего органа, в особенности с $5 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$ до $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$ вызывает более интенсивный прирост силы $P_{\max}$. Например, уменьшение податливости δ_{np} с $5 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$ до $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$, т.е. в 2 раза вызывает повышение максимальной силы удара $P_{\max}$ на 12-15%.

Время ударного импульса t_y , напротив, с повышением податливости δ_{np} пружинной подвески рабочего органа увеличивается, причем в интервале $10 \cdot 10^{-6} \text{ м/н} < \delta_{np} < 20 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$ темп роста t_y замедляется.

Из рисунков 2.6, 2.8 следует, что для повышения максимальной силы удара $P_{\max}$ следует уменьшать податливость пружинной подвески рабочего органа до величины, равной $\delta_{np} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$.

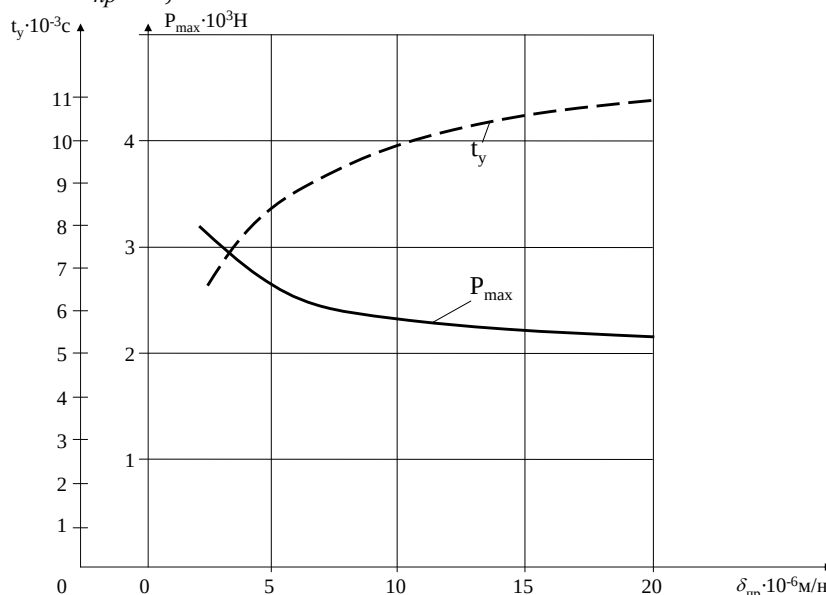


Рисунок 2.6 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от податливости δ_{np} пружины рабочего органа (гидроударник Г59В, внутренний диаметр фильтра – 0,074 м; масса рабочего органа $m=8 \text{ кг}$)

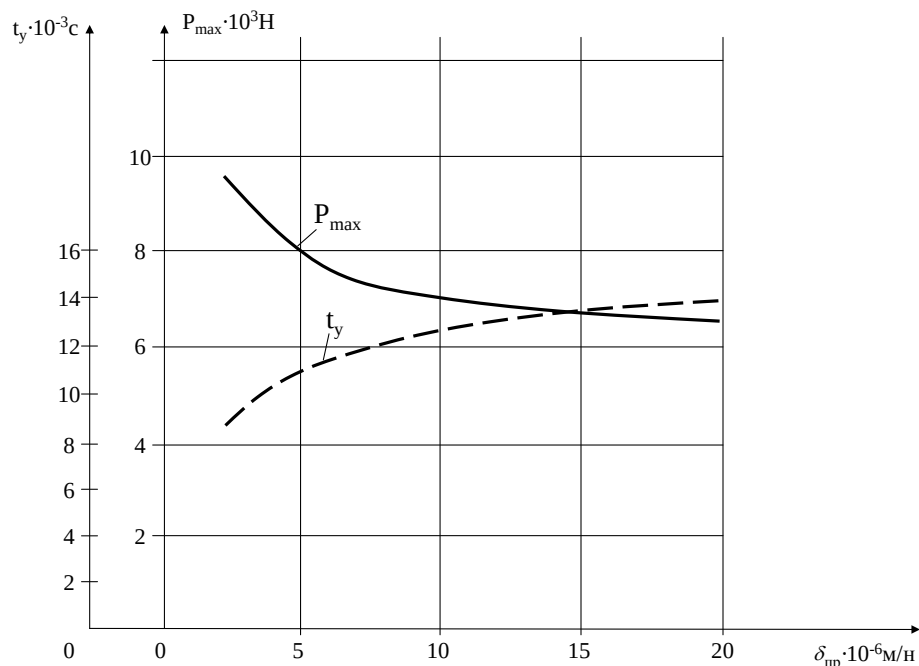


Рисунок 2.7 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от податливости пружины δ_{np} рабочего органа (гидроударник Г-7, внутренний диаметр фильтра – 0,098 м; масса рабочего органа $m=11$ кг)

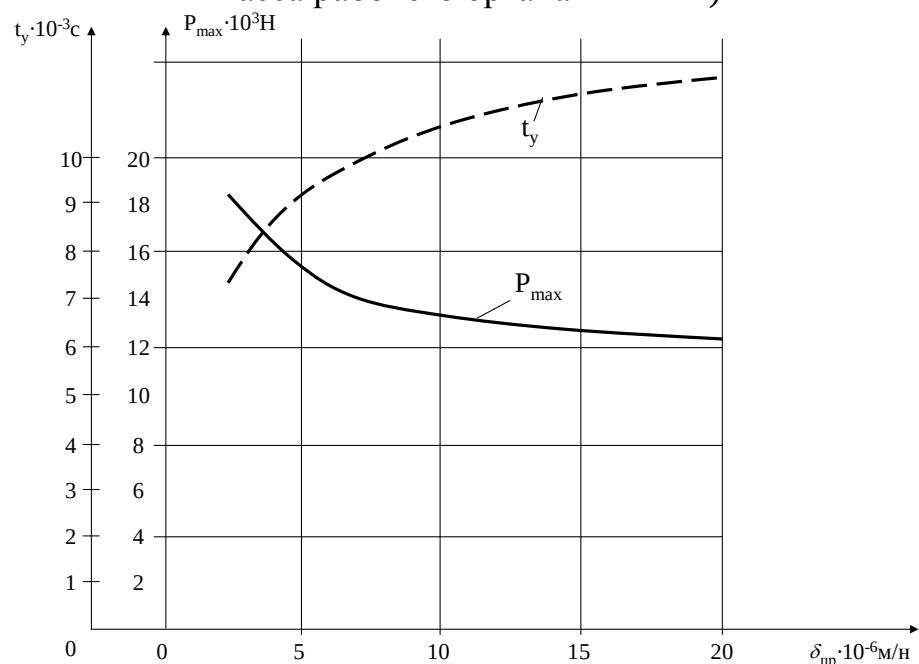


Рисунок 2.8 – Зависимость максимальной силы $P_{\max}$ удара по жидкостному волноводу и времени удара t_y от податливости пружины δ_{np} рабочего органа пневмоударник – РП-111, внутренний диаметр фильтра – 0,115 м; масса рабочего органа $m=8$ кг)

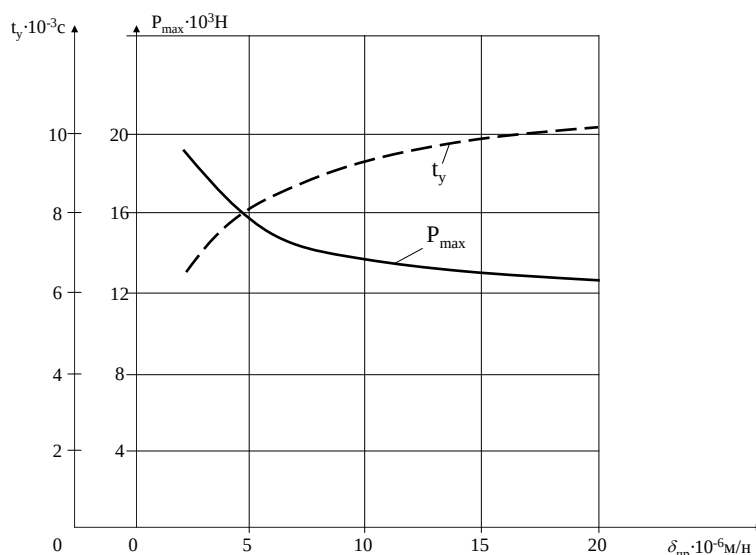


Рисунок 2.9 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от податливости пружины δ_{np} рабочего органа (пневмоударник – П-105, внутренний диаметр фильтра – 0,115 м; масса рабочего органа $m=8$ кг)

На рисунках 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 приведены зависимости максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени t_y ударного импульса от массы m рабочего органа для тех же типов гидро- и пневмоударников при оптимальной величине податливости пружинной подвески рабочего органа, равной $\delta_{np}=2,5 \cdot 10^{-6}$ м/н.

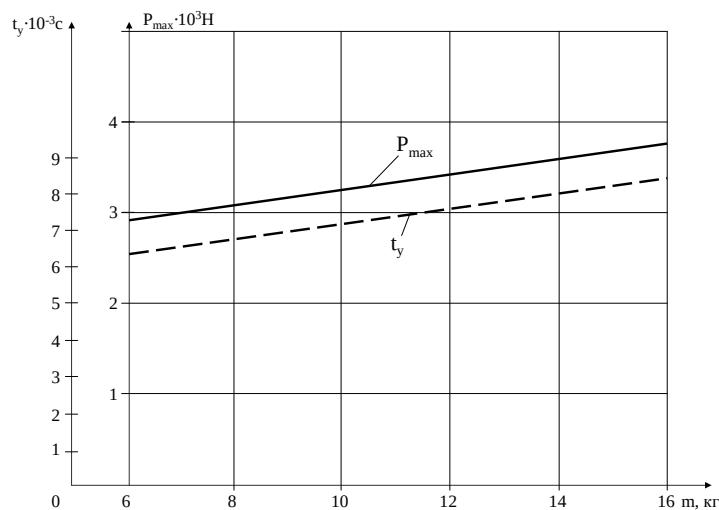


Рисунок 2.10 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от массы рабочего органа (гидроударник Г59В, внутренний диаметр фильтра – 0,074 м; податливость пружинной подвески рабочего органа $\delta_{np}=2,5 \cdot 10^{-6}$ м/н)

Из графиков следует, что величины $P_{\max}$ и t_y при увеличении массы рабочего органа линейно возрастают, причем этот рост достаточно слабый.

Так, при увеличении массы рабочего органа в 2 раза (с 8 кг до 16 кг) величины $P_{\max}$ и t_y возрастут в среднем на 14-15%.

Из анализа влияния податливости δ_{np} пружинной подвески рабочего органа и массы m последнего на величины $P_{\max}$ и t_y следуют следующие выводы:

1. При конструировании экспериментального образца рабочего органа следует уменьшать его массу, так как ее увеличение приводит к незначительному увеличению максимальной силы удара. В то же время масса рабочего органа должна быть достаточной, исходя из условий его прочности и надежности в работе. В каждом конкретном случае при расчете указанной массы следует также учитывать внутренний диаметр фильтровой колонны, который должен обеспечить прохождение внутрь выбранного генератора ударных импульсов.

2. Податливость пружинной подвески рабочего органа должна быть в пределах $\delta_{np}=(2,5\div 5)\cdot 10^{-6}$ м/н.

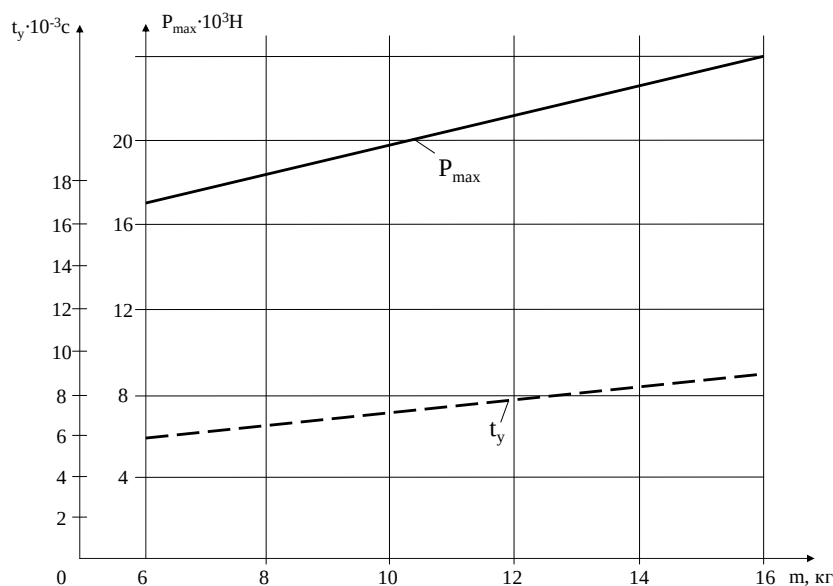


Рисунок 2.11 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от массы рабочего органа (пневмоударник П-105, внутренний диаметр фильтра – 0,115 м; податливость пружинной подвески рабочего органа $\delta_{np}=2,5\cdot 10^{-6}$ м/н)

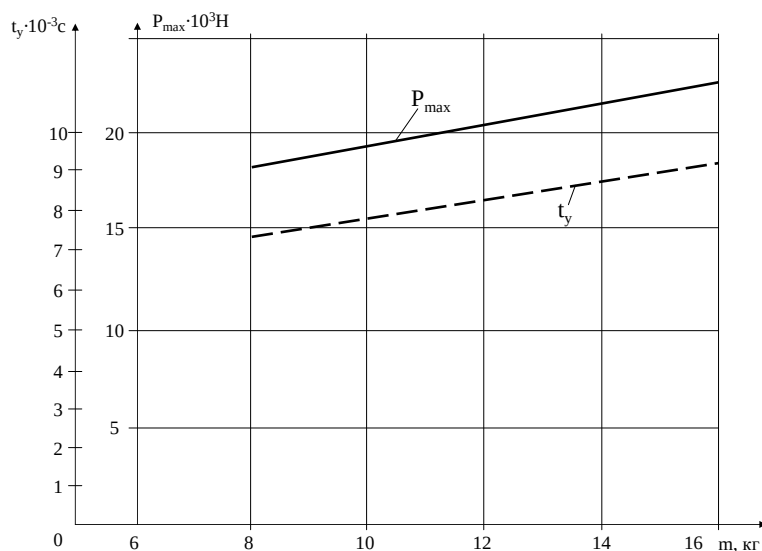


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от массы рабочего органа (пневмоударник РП-111, внутренний диаметр фильтра – 0,115 м; податливость пружинной подвески пружины рабочего органа $\delta_{np}=2,5 \cdot 10^{-6}$ м/н)

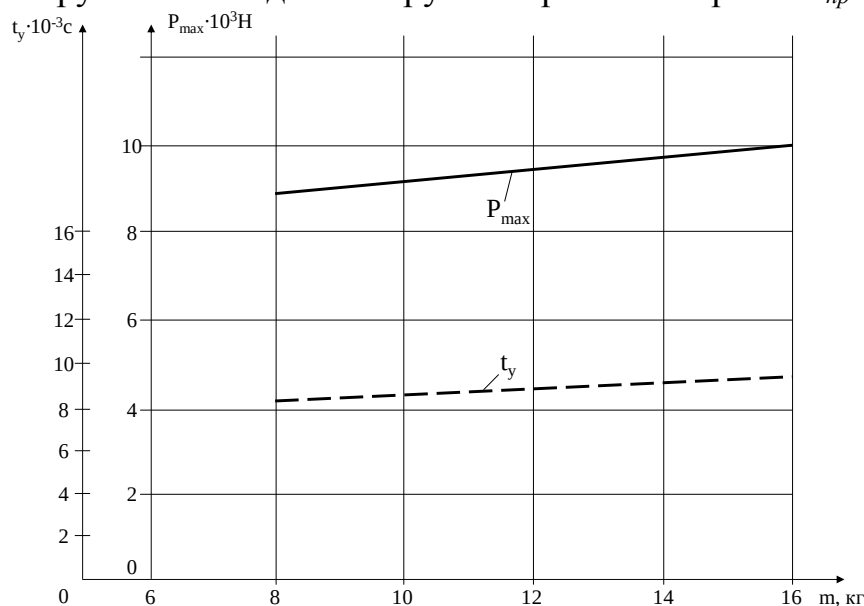


Рисунок 2.13 – Зависимость максимальной силы удара $P_{\max}$ по жидкостному волноводу и времени удара t_y от массы рабочего органа (гидроударник Г-7, внутренний диаметр фильтра – 0,098 м; податливость пружинной подвески пружины рабочего органа $\delta_{np}=2,5 \cdot 10^{-6}$ м/н)

Основным параметром, влияющим на эффективность декольматации фильтра и водоносного пласта, является максимальное давление $P_{g\max}$, в импульсе. Последнее, как показано в 2.2, зависит от внутреннего диаметра фильтровой колонны и определяется формулой (2.28). Из указанной формулы можно определить максимальный диаметр фильтровой колонны $D_{\phi\max}$, при которой про-

изойдет разглинизация фильтра и водоносного пласта. При этом принимается из опыта вибрационной разглинизации, что максимальный перепад давления в импульсе должен быть не менее $P_{g\max}=0,4$ МПа. Тогда из (2.28) следует, что максимальный диаметр фильтра, при котором произойдет его декольматация, будет:

$$D_{\phi\max} = \sqrt{\frac{4P_{H1\max}}{\pi P_{g\max}}}. \quad (2.29)$$

Волна сжатия, перемещаясь по столбу жидкости, оказывает на закольматированные отверстия фильтра давление, изменяющееся в соответствии с зависимостью (2.28).

2.4 Условия разрушения кольматанта фильтров и закольматированной зоны водоносных пластов

Для определения условия разрушения кольматанта, покрывающего фильтр, примем, что закольматированные отверстия в фильтре круглые. В этом случае задача сводится к определению напряжений в круглой мембране, защемленной по контуру. Максимальные напряжения $\sigma_{\max}$ в кольматанте определяются по формуле [41]:

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{4} p_{g\max} \left(\frac{r}{h} \right)^2, \text{ Па}, \quad (2.30)$$

где r – радиус отверстий в фильтре, мм;

h – толщина кольматанта в отверстиях фильтра, мм.

Условие разрушения отложений на фильтре выразится:

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{4} p_0 \left(\frac{r}{h} \right)^2 > \sigma_0, \text{ Па}, \quad (2.31)$$

где σ_0 – остаточная прочность закольматированных отложений; обычно, $\sigma_0 < 0,5$ МПа [23].

Таким образом, если $r > h$, то это, как правило, ведет к разрушению кольматанта, закрывающего отверстия фильтра.

Под действием ударной волны нарушается сплошность прилегающих к фильтру отложений, в них образуются трещины, а обломки образующегося шлама удаляются эрлифтной откачкой.

Необходимо отметить, что для эффективного воздействия на закольматированный фильтр забойная машина с наковальней и диском должна перемещаться в направлении забоя скважины.

После очистки фильтра начинается процесс декольматации водоносного пласта. На закольматированную зону последнего будут действовать следующие нагрузки (рисунок 2.15):

- пластовое давление $P_{пл}$;
- гидростатическое давление столба жидкости, заполняющей скважину;
- циклически изменяющееся знакопеременное давление $P_0(t)$, обусловленное гидравлическими ударами диска наковальни по торцу жидкостного волновода и отражением ударных волн от заглушки отстойника фильтра, это давление передается жидкости, заполняющей зафильтровое пространство через очищенные отверстия фильтра.

Наибольшее знакопеременное давление P_{gmax} определится по формуле (2.26), а с учетом (2.27) примет вид:

$$P_{0max} = \frac{4V_0}{n\delta_g \pi D_g^2} \exp \left[-\frac{m}{n} \arctg \left(\frac{n}{m} \right) \right] \sin \left[\arctg \left(\frac{n}{m} \right) \right]. \quad (2.32)$$

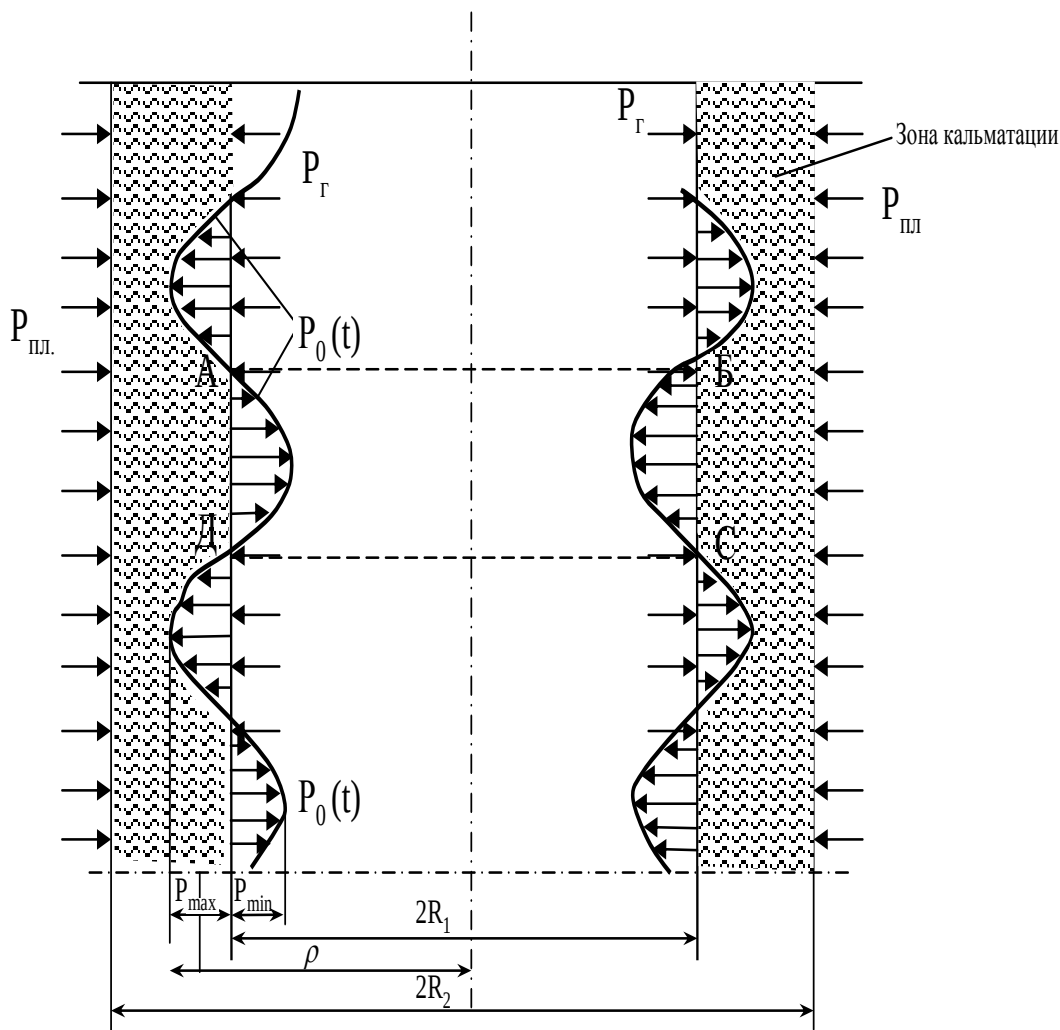


Рисунок 2.15 – Нагрузки, действующие на закольматированную зону водоносного пласта

Минимальное циклическое давление приближенно будет иметь такую же величину, но с обратным знаком (при условии, что от заглушки отстойника будет отражено 100% энергии).

Таким образом, в данном случае имеет место положительный асимметричный цикл напряжения на стенке закольматированного пласта. Это объясняется тем, что при вибрационной разглинизации пласта наибольшее напряжение (давление) цикла составляет $P_{0\max} = 0,4-0,5$ МПа, а гидростатическое давление P_z в скважине глубиной более 50 м, заполненной жидкостью, уже превышает величину $P_{0\max}$.

Для асимметричного цикла

$$P_{\max} = P_r + P_{q\max} > 0; P_{\min} = P_r - P_{q\min} > 0.$$

Анализ напряженного состояния закольматированной зоны пласта показывает, что наиболее благоприятные условия для разрушения создаются для тех кольцевых элементов закольматированного водоносного пласта (например, АВСД на рисунке 2.15), на которые действует минимальное напряжение цикла (зона пониженного давления).

Для приближенной оценки напряженного состояния воспользуемся решением для цилиндрической трубы, нагруженной наружным давлением P_{nl} и внутренним давлением $P_{\min}$ [42, 43]. В зависимости от соотношений P_{nl} , $P_{\min}$ и радиусов R_2/R_1 условия разрушения закольматированного пласта будут различными.

1. При $P_{\min} > \frac{P_{nl}}{2} \left(\frac{R_2^2}{R_1^2} + 1 \right)$ наибольшие и наименьшие значения радиальных σ_r и тангенциальных σ_t напряжений будут [42, 44]:

$$\left. \begin{aligned} \max \sigma_r &= \sigma_{r \rho=R_2} = -P_{nl}; \\ \min \sigma_r &= \sigma_{r \rho=R_1} = -P_{\min}; \\ \max \sigma_t &= \sigma_{t \rho=R_1} = \frac{P_{\min}(R_1^2 + R_2^2) - 2P_{nl}R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}; \\ \min \sigma_t &= \sigma_{t \rho=R_2} = \frac{2P_{\min}P_1^2 - P_{nl}(R_2^2 + R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

В благоприятных для разрушения точках внутреннего диаметра закольматированной зоны пласта расчетное уравнение по гипотезе О. Мора имеет вид (для кольматанта, одинаково сопротивляющегося сжатию и растяжению):

$$\max \sigma_t - \min \sigma_R = \frac{2P \min R_2^2 - 2P_{nl} R^2}{R_2^2 - R_1^2} > \sigma_{-1p}, \quad (2.34)$$

где σ_{-1p} – предел выносливости кольтананта водоносного пласта при растяжении-сжатии.

2 При $P_{\min} < \frac{2P_{nl}}{(1 + R_1^2/R_2^2)}$ наибольшие и наименьшие значения радиальных σ_R и тангенциальных σ_t напряжений будут:

$$\left. \begin{aligned} \max \sigma_R &= \sigma_{R \rho=R_1} = -p_{\min}; \\ \min \sigma_R &= \sigma_{R \rho=R_2} = -p_{nl}; \\ \max \sigma_t &= \sigma_{t \rho=R_2} = \frac{2p_{\min} R_1^2 - p_{nl} (R_2^2 + R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}; \\ \min \sigma_t &= \sigma_{t \rho=R_1} = p_2 = \frac{p_{\min} (R_1^2 + R_2^2) - 2p_{nl} R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

В благоприятных для разрушения точках внутреннего диаметра закольматированной зоны пласта расчетное уравнение по гипотезе О. Мора имеет вид:

$$\min \sigma_t = \sigma_{t \rho=R_1} = -\frac{p_{\min} (R_1^2 + R_2^2) - 2p_{nl} R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} > \sigma_{-1p}. \quad (2.36)$$

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА И РАЗРАБОТКА РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ГИДРОВИБРАЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

Нами установлена, что основным параметром, влияющим на эффективность декольматации фильтров и водоносных пластов, является максимальное давление в ударном импульсе, распространяющемся в жидкости, находящейся внутри фильтра. Как было указано выше, эта величина должна быть не менее 0,4 МПа.

Целью исследований раздела 3 является экспериментальная проверка ранее полученных теоретических зависимостей, их уточнение и разработка на основе полученных результатов испытание рабочего органа для гидровибрационной декольматации фильтров и водоносных пластов. При обосновании методики экспериментальных исследований, их проведении и анализе результатов использованы методические рекомендации, изученные в работах [45, 46, 48].

3.1 Методика экспериментальных исследований

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

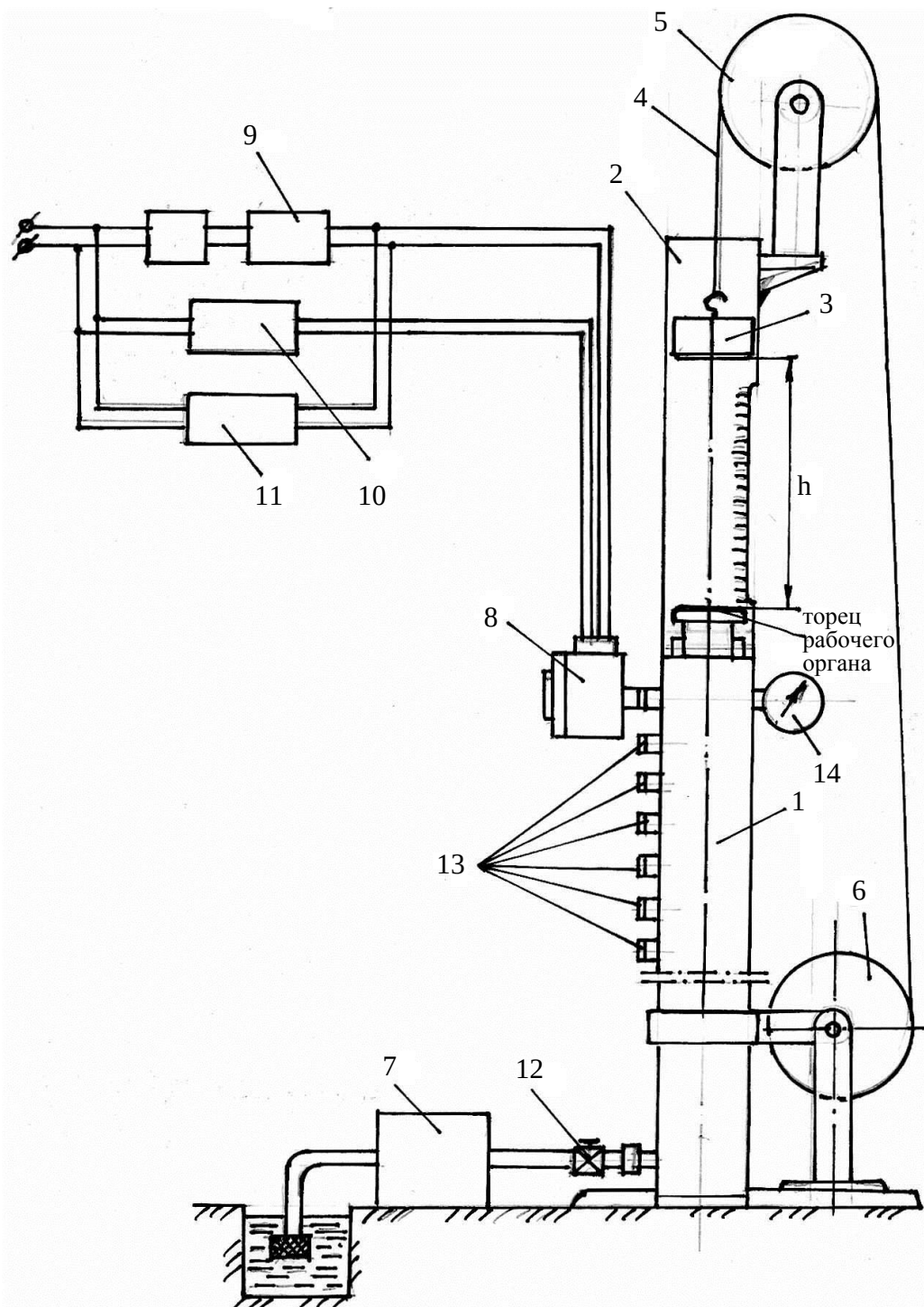
- разработка устройства для измерения давления, возникающего в импульсе при единичном ударном воздействии подпружиненного диска по жидкостному волноводу (жидкости, заполняющей фильтр);
- установление зависимости изменения давления в импульсе вдоль перфорированного фильтра при единичном ударном воздействии подпружиненного диска;
- экспериментальная проверка возможности гидровибрационной очистки закольматированных фильтров.

Для решения указанных задач разработан стенд, с помощью которого можно измерить максимальное давление в ударном импульсе, движущемуся по жидкостному волноводу (рисунок 3.1).

Стенд включает имитатор фильтровой части скважины 1, верхний торец которого соединен с направляющей трубой 2, в которой перемещается груз 3. Шнур 4 с грузом перекинут через блок 5 и противоположным концом закреплен на барабане 6. В направляющей трубе выполнен продольный вырез, по краю которого нанесена линейка, позволяющая замерять высоту сбрасывания груза 3.

Насос 7 предназначен для закачки воды в имитатор 1 и поддержания в последнем заданного давления, после чего кран 8 закрывается.

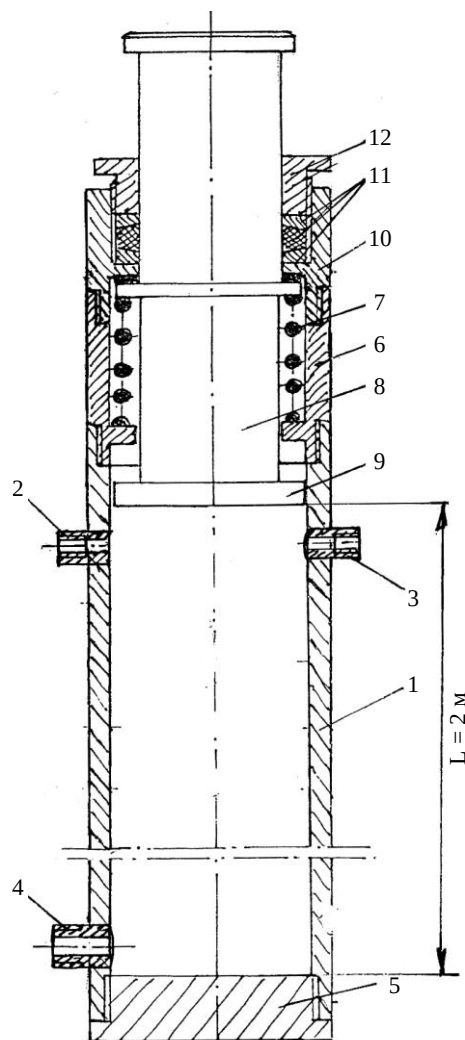
Для проведения экспериментальных работ имитатор фильтровой части скважины выполнен в двух вариантах.



- 1 – имитатор фильтровой части скважины; 2 – направляющая труба; 3 – груз;
 4 – шнур; 5 – блок; 6 – барабан; 7 – насос; 8 – магнитоупругий преобразователь;
 9 – быстропишущий самописец; 10 – источник постоянного тока; 11 – осциллограф;
 12 – кран; 13 – штуцеры; 14 – образцовый манометр

Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментального стенда

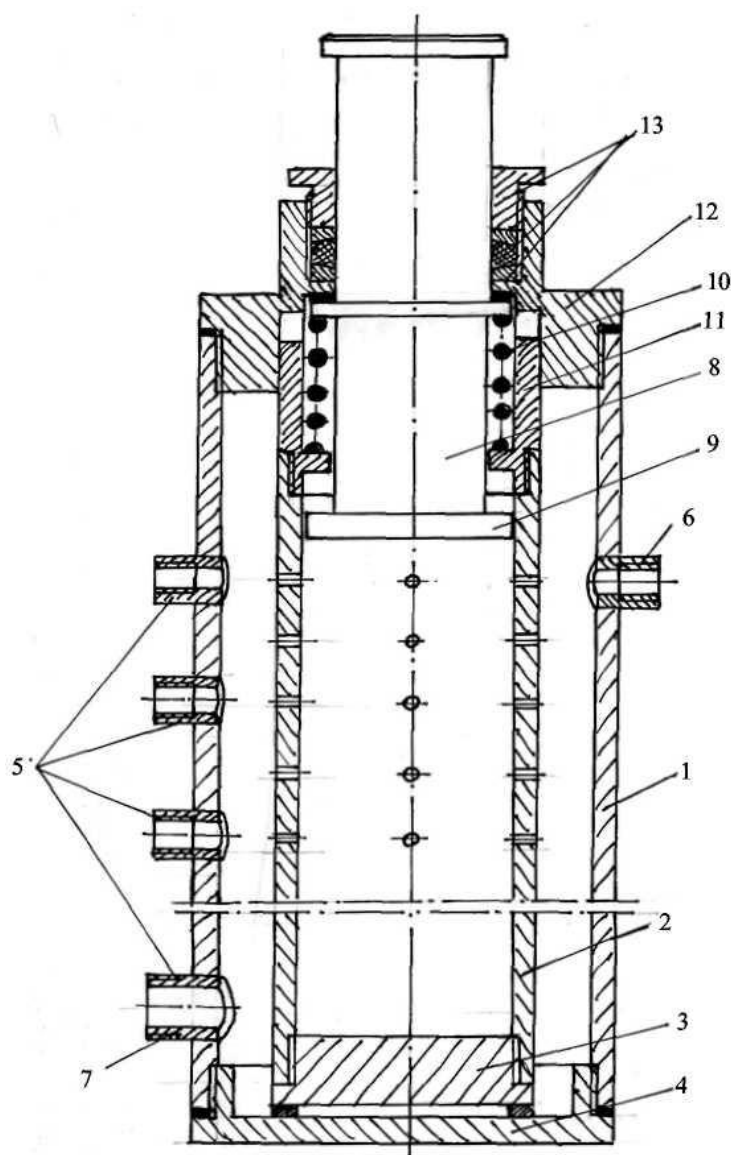
Конструкция первого варианта, имитирующая только фильтр скважины, представлена на рисунке 3.2. В трубе 1, имитирующий фильтр, по боковой поверхности выполнены каналы, в которые вмонтированы штуцеры 2 для монтажа магнитоупорного преобразователя. Кроме того, на трубе имеются штуцер 3 для монтажа образцового манометра и штуцер 4 для подсоединения нагнетательного шланга насоса. Снизу труба 1 закрыта заглушкой 5. На верхнюю часть трубы 1 навинчена упорная втулка 6, на внутреннем буртике которой размещена пружина 7. Последняя взаимодействует с ударником 8, представляющим цилиндр, оканчивающийся диском 9. Втулка 6 сопрягается с переходником 10, в котором размещено сальниковое уплотнение 11, поджимаемое гайкой 12 и предназначенное для предотвращения утечек жидкости из внутреннего пространства трубы при передаче ударных импульсов рабочему органу 8.



1 – труба; 2, 3, 4 – штуцеры для монтажа соответственно магнитоупорного преобразователя манометра и шланга насоса; 5 – заглушка; 6 – упорная втулка; 7 – пружина; 8 – ударник; 9 – диск; 10 – переходник; 11 – сальниковое уплотнение; 12 – поджимная гайка.

Рисунок 3.2 – Имитатор фильтровой части скважины (1-ый вариант)

Второй вариант конструкции (рисунок 3.3) имитирует не только фильтр, но и стенки скважины. Конструкция представляет собой наружную 1 и внутреннюю 2 концентрически расположенные трубы, причем внутренняя труба имеет просверленные вдоль отверстия и имитирует фильтр, а наружная труба – скважину. Внешние диаметры труб 1,2 равны соответственно 118 и 81 мм. В трубе по боковой поверхности с шагом 20 мм выполнены штуцеры 5 для последовательного присоединения к ним магнитоупругого преобразователя давления, а также штуцеры 7,8 для соединения соответственно с напорным шлангом насоса и монтажа марки образцового манометра.



1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – заглушка; 4 – крышка нижняя;
5 – штуцеры для монтажа преобразователя; 6 – штуцер для манометра; 7 – штуцер для
соединения со шлангом насоса; 8 – рабочий орган; 9 – диск; 10 – пружина; 11 – втулка;
12 – крышка верхняя; 13 – сальниковое устройство

Рисунок 3.3 – Имитатор фильтровой части скважины (2-ой вариант)

Во внутренней трубе 2 в ее верхнем конце размещен рабочий орган 8, с помощью которого по жидкости осуществляется непосредственная передача ударных импульсов. Рабочий орган 8, представляющий стержень с диском 9 на нижнем торце, взаимодействует с возвратной пружиной 10. В соответствии с рекомендациями раздела 2 масса рабочего органа принята 10 кг, а жесткость возвратной пружины $2,5 \cdot 10^{-6}$ м/н. Герметизация внутреннего пространства внутренней трубы 2 и кольцевого пространства между трубами 1,2 осуществляется крышками 4 и 12 и сальниковым устройством 13.

Для преобразования динамических нагрузок, возникающих в жидкости при ударе грузом 3 по торцу рабочего органа (рисунки 3.1, 3.2) в электрический сигнал, пропорциональный величине ударного импульса, разработан магнитоупругий преобразователь 8. Сигнал от последнего поступает на быстропишущий самописец НЗЗ8-1, который позволяет фиксировать величину давления в ударном импульсе, движущемся по жидкостному волноводу. Запись осуществляется на диаграммную ленту. Возбуждение первичной обмотки магнитоупругого преобразователя осуществляется от источника постоянного тока 10, а визуальное наблюдение за характеристикой импульса осуществляется с помощью осциллографа 11 марки Н117/1.

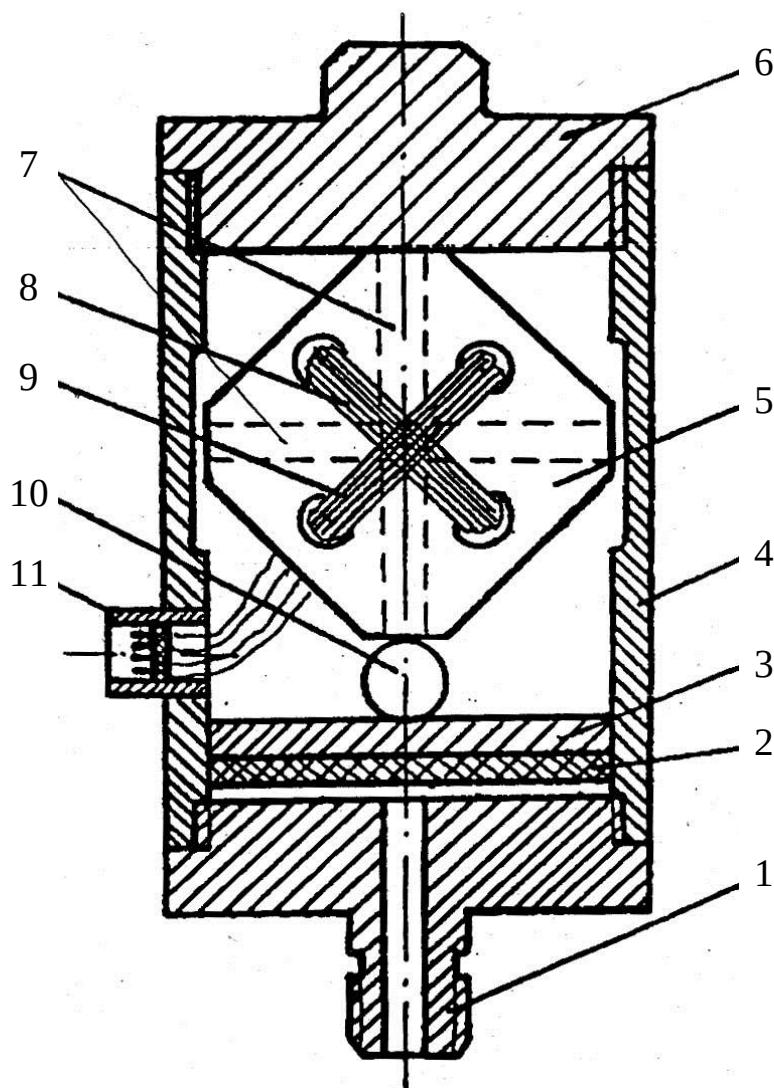
Магнитоупругий преобразователь (рисунок 3.4) состоит из соединительного штуцера 1, мембраны 2, подвижного упорного диска 3, корпуса 4, магнитоупругого элемента 5. Последний выполняется из электротехнической стали в форме квадрата с обмоткой возбуждения 8 и измерительной обмоткой 9. Указанные обмотки расположены относительно друг друга взаимоперпендикулярно. Магнитоупругий элемент 5 расположен в корпусе 4 таким образом, что одна из его диагоналей совпадает с осью корпуса, при этом одна вершина элемента упирается в крышку 6 корпуса, а другая – через стальной шар 10 в подвижный упорный диск 3. Подача напряжения на обмотку возбуждения и снятие сигнала с измерительной обмотки осуществляется при помощи штепсельного разъема.

При помощи штуцера 1 преобразователь давления устанавливается в одно из гнезд, расположенных на боковой поверхности имитатора фильтровой части скважины. Возникающее при ударе рабочего органа давление в ударном импульсе, распространяющемся в жидкости, заполняющей имитатор, воспринимает мембрана 2, которая одновременно препятствует проникновению жидкости во внутреннюю полость преобразователя.

Принцип действия преобразователя заключается в следующем. Ток, протекающий по обмотке возбуждения 8, создает переменный магнитный поток, однако в связи с перпендикулярностью обмоток магнитный поток проходит вдоль витков измерительной обмотки 9, не возбуждая в послед-

ней ЭДС.

При ударе груза 7 по хвостовику рабочего органа имитатора 1 (рисунок 3.1.) жидкости передается ударный импульс с образованием локальной зоны сжатой жидкости, движущейся вниз со скоростью звука. Эта зона сжатой жидкости, достигая при своем движении штуцера и преобразователя оказывает давление на мембрану 2 (рисунок 3.3.). Далее усилие через неподвижный упорный диск 3 стальной шар 10 передается магнитоупругий элемент 5. В результате происходит упругая деформация последнего. Поэтому магнитная проницаемость в направлении действия силы возрастает, что приводит к отклонению суммарного вектора магнитного потока.



1 – штуцер; 2 – мембрана; 3 – подвижный упорный диск; 4 – корпус;
5 – магнитоупругий элемент; 6 – крышка; 7 – каналы; 8 – обмотка возбуждения;
9 – измерительная обмотка; 10 – стальной шар; 11 – штепсельный разъем

Рисунок 3.4 – Магнитоупругий преобразователь давления
в электрический сигнал

В этом случае витки измерительной обмотки будут пересекаться магнитным потоком, и в ней возникает ЭДС, пропорциональная давлению жидкости на мембрану 2.

Каналы 7, высверленные по диагоналям магнитоупругого элемента 5, и передача давления на последний посредством шара 10 повышают чувствительность преобразователя за счет ослабления сечения и концентрации усилия, что приводит к большей величине упругой деформации, а, следовательно, к возникновению большей ЭДС.

Разработанный при участии автора преобразователь защищен предварительным патентом Республики Казахстан на изобретение [45].

Полученный в преобразователе электрический сигнал поступает на быстродействующий самопишущий прибор НЗ38-1, который осуществляет запись на диаграммную ленту.

Тарировка магнитоупругого преобразователя для измерения давления в ударном импульсе, перемещающемся в жидкости, осуществлялась следующим образом.

В имитатор фильтровой части скважины (рисунок 3.1) с помощью насоса 7 нагнеталась вода, и замерялось давление на образцовом манометре и соответствующая амплитуда давления (высота записи) на диаграммной ленте самописца. Для каждой величины показания давления на образцовом манометре при проведении тарировки опыт повторялся 5 раз, и окончательно тарировка осуществлялась по среднему значению.

Данные тарировки приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты тарировки магнитоупругого преобразователя

Давление Р на образцовом манометре, МПа	0,10	0,2	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,10	1,20	1,3	1,4
Средняя высота записи на самописце, мм	4,8	7,2	8,4	9,5	11,1	12,0	13,0	13,9	14,8	15,8	16,6	17,7	18,8	17,9

Графически высота записи на диаграммной ленте $h = f(P)$ представлена на рисунке 3.5, из которого следует, что указанная зависимость мало отличается от прямолинейной.

После тарировки магнитоупругого преобразователя образцовый манометр демонтировался, а соответствующий штуцер закрывался пробкой.

Целью первого этапа исследований являлось установление зависимо-

сти давления максимального $P_{\max}$ в ударном импульсе от энергии единичного удара груза по торцу рабочего органа и проверка теоретически установленных зависимостей, полученных в разделе 1.

Методика эксперимента заключалась в следующем. На стенде (рисунок 3.1) закреплялся имитатор фильтра по первому варианту (рисунок 3.3). Внутри имитатора с помощью насоса закачивалась вода. Избыточное давление последней в имитаторе поддерживалось постоянным и равным 0,1 МПа (1 атм.). Затем груз 3 поднимался над торцом рабочего органа на заданную высоту, которая фиксировалась с помощью линейки, нанесенной на направляющей трубе 2.

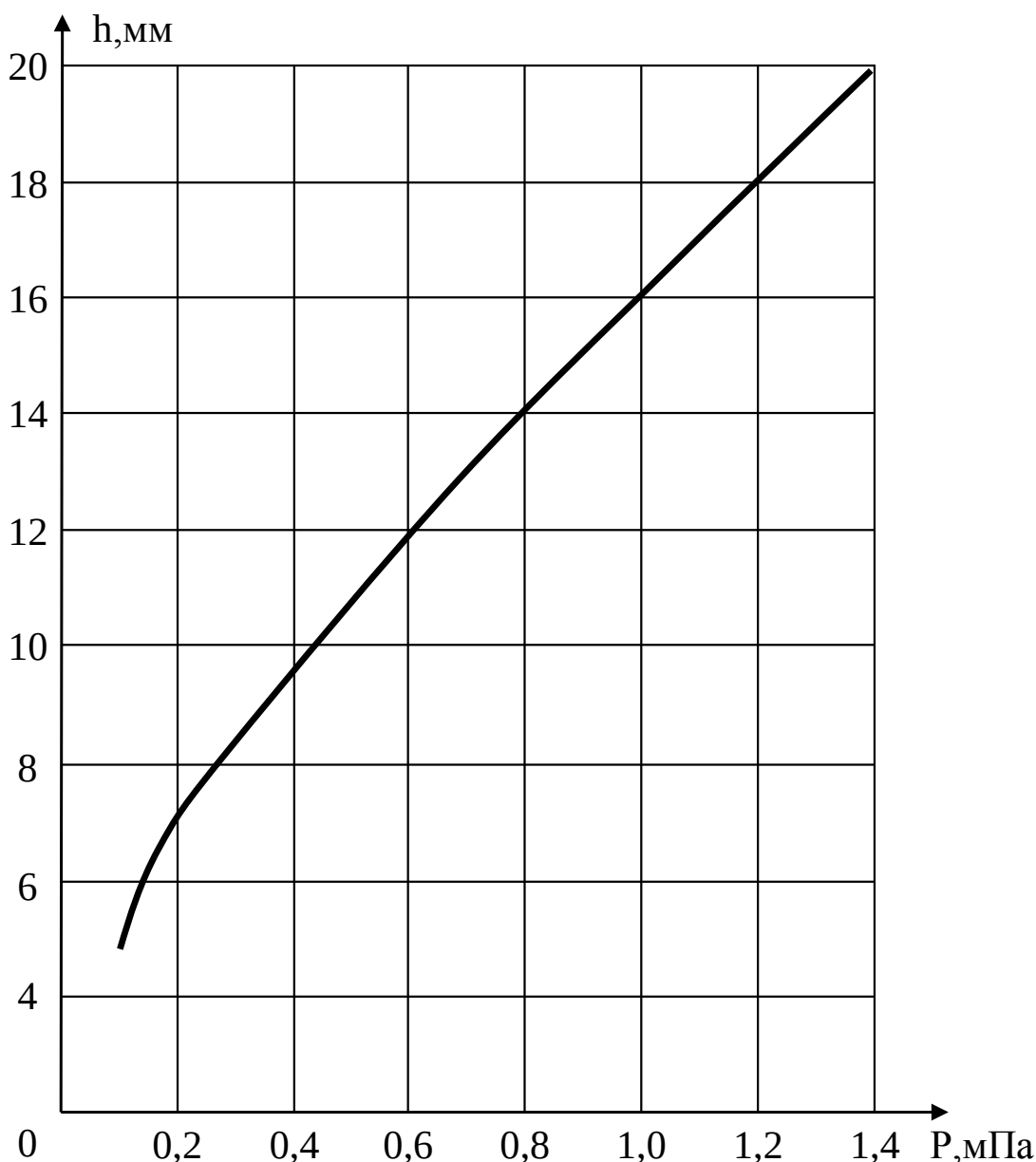


Рисунок 3.5 – Результаты тарировки магнитоупорного преобразователя

Потенциальная энергия подвешенного груза (бойка 3) определялась по известной зависимости:

$$A_6 = m_2gh, \quad (3.1)$$

где m_2 – масса груза (в эксперименте $m_2 = 10$ кг);

g – ускорение свободного падения; $g = 9,8$ м/с²;

h – высота подъема груза над торцом рабочего органа, м.

В соответствии с формулой (2.12) подсчитывалась энергия A_n , переданная рабочему органу. При этом коэффициент передачи энергии рабочему органу принят 0,8, т.е. $A_n = 0,8 m_2gh$.

При освобождении тормоза барабана 6 (рисунок 3.1) груз наносит удар по торцу рабочего органа. Последний, получая энергию A_n , передает в свою очередь ударный импульс жидкости, находящейся в имитаторе фильтра. Изменение давления в ударном импульсе во времени через магнитоупругий преобразователь трансформировалось в ЭДС и записывалось на диаграммную ленту. Затем по максимальной амплитуде давления $P_{\max}$ ударного импульса и соответствующей ему энергии удара A_n рабочего органа строилась зависимость $P_{\max} = f(A_n)$.

На втором этапе исследований установление зависимости $P_{\max} = f(A_n)$ проводилось на имитаторе второго варианта (рисунок 3.3).

Целью второго исследования являлось также установление зависимости максимального давления $P_{\max}$ в ударном импульсе, распространяющемся в жидкости, с учетом того, что импульс перемещается в перфорированной трубе. Последняя имела в каждом ярусе 12 перфорированных отверстий. Их диаметры составляли 1 мм. Затем при проведении следующей серии экспериментов, отверстия рассверливались большим диаметром, равным 1,5 мм, затем 2 мм и т.д. до 4 мм, т.е. их диаметр, увеличивался с шагом 0,5 мм. Расстояние между ярусами отверстий по длине трубы составляло 0,1 м. Для того, чтобы получить информацию о темпе падения давления в ударном импульсе при его прохождении от торца диска 9 рабочего органа по перфорированной трубе 2 к заглушке (рисунок 3.3) магнитоупорный преобразователь перед каждым сбрасыванием груза 3 последовательно монтировался в штуцеры 13 в направлении к нижнему торцу имитатора (рисунок 3.1). Остальные штуцеры закрывались пробками.

На третьем этапе экспериментальных исследований проверялась возможность очистки закольматированных фильтров под действием ударных импульсов, распространяющихся в жидкости.

В этой цели на боковой поверхности перфорированной трубы 2 закреплялась латунная сетка, которая затем покрывалась гелецементным

растворов. После его высыхания в течение суток на стенде проводилось разрушение образовавшейся на латунной сетке глинистой корки с фиксацией энергии и частоты сбрасывания груза 3 (рисунок 3.1).

После каждого этапа экспериментальных исследований проводился анализ их результатов с соответствующими выводами.

3.2 Результаты экспериментальных работ

На первом этапе экспериментальных работ получены диаграммы изменения давления в ударном импульсе во времени при различных величинах A_n энергии, передаваемых жидкости. На рисунках 3.6, 3.7 в качестве примера приведены некоторые диаграммы.

На полученных графических зависимостях $P = f(t)$ следует, что максимальное давление в ударном импульсе наблюдается на первом этапе удара. Затухающие нити давления свидетельствуют о многократном возвратно-поступательном движении ударного импульса, который успевает в период удара несколько раз преодолеть расстояние L от торца диска рабочего органа до заглушки 5 фильтра (рисунок 3.2) и обратно. Это связано с трудностями изготовления фильтра реальной длиной (более 10 м), при которой удар заканчивается на первом этапе, как это рассмотрено в теоретическом разделе 2 работы. Из диаграмм также следует, что при отражении ударного импульса от заглушки возникает зона пониженного давления. Пик указанного давления в отраженном импульсе в 5-6 раз меньше максимального давления сжатия в прямом импульсе. Объясняется это интерференцией волн сжатия и растяжения и поглощением части энергии заглушкой фильтра.

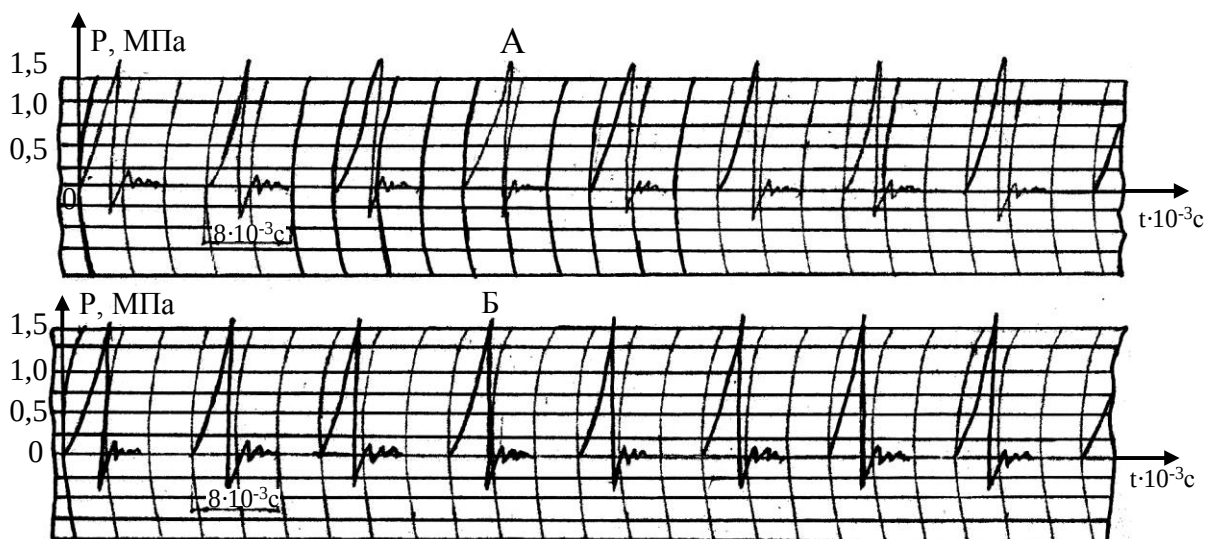


Рисунок 3.6 – Диаграммы зависимостей давления в ударном импульсе от времени t при различной энергии удара; А – $A_n = 50$ Дж; Б – $A_n = 70$ Дж

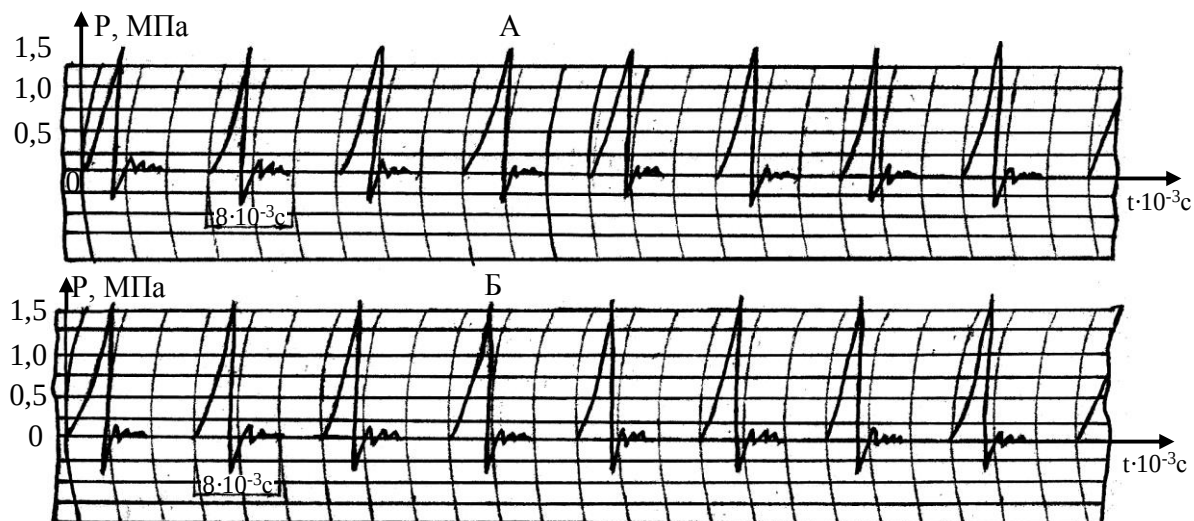


Рисунок 3.7 – Диаграммы зависимостей давления в ударном импульсе от времени t при различной энергии удара; А – $A_n = 50$ Дж; Б – $A_n = 70$ Дж

Полученные диаграммы позволили установить зависимость максимального давления $P_{\max}$ ударного импульса от энергии удара (рисунки 3.8, 3.9). Анализ зависимости $P_{\max} = f(A_n)$ показывает, что она может быть выражена параболой вида:

$$P_{\max} = 0,0025 (A_n)^2 - 0,0005 A_n, \quad (3.2)$$

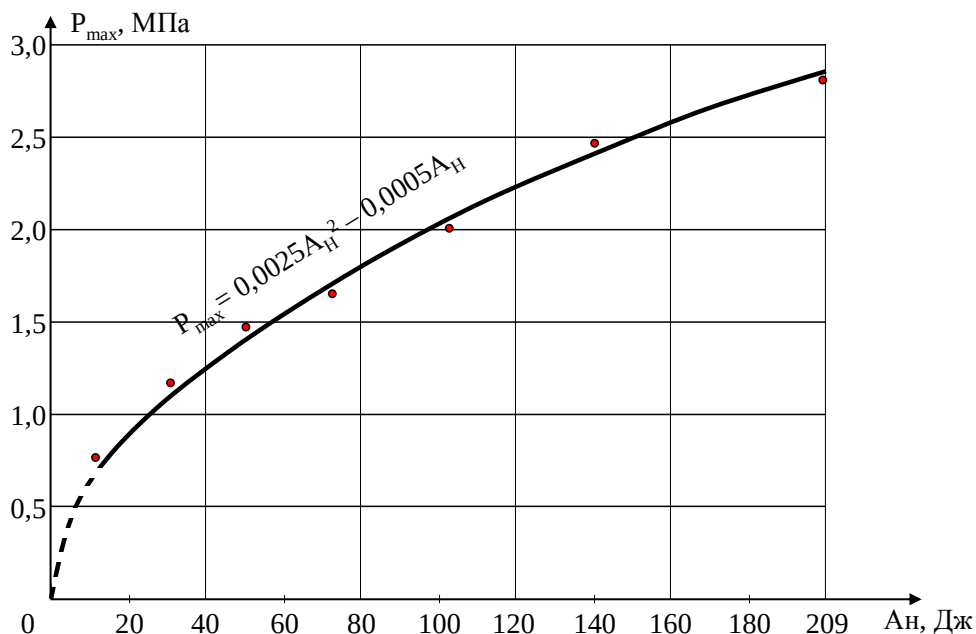


Рисунок 3.8 – Зависимость максимального давления $P_{g\max}$ ударного импульса от энергии удара

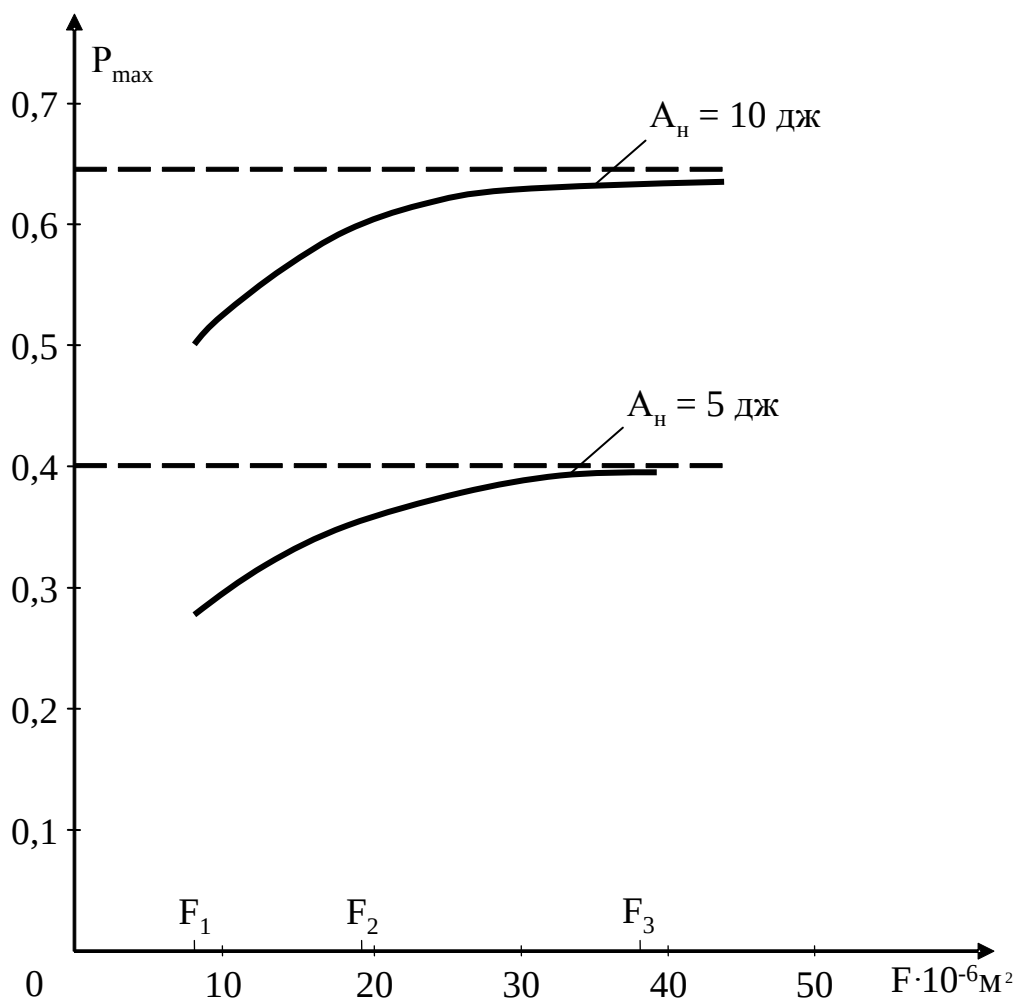


Рисунок 3.9 – Зависимость максимального давления

$P_{g \max}$ ударного импульса от суммарной площади отверстий в фильтре

Следует также отметить хорошее совпадение максимального давления $P_{\max}$, полученного экспериментальным путем и теоретическим методом, изложенным в разделе 2 работы. Разница между указанными величинами не превышает 5%.

На втором этапе экспериментальных исследований получены диаграммы изменения давления в ударном импульсе, движущемся в перфорированном фильтре.

Диаграммы аналогичны приведенным на рисунках 3.6, 3.7, за исключением того, что максимальное давление в ударном импульсе при прохождении вдоль яруса отверстий снижается. Величина такого снижения зависит от числа и диаметра отверстий в фильтре. На рисунке 3.9 показано изменение максимального давления при прохождении ударного импульса вдоль перфорированных отверстий фильтра. По оси абсцисс отложены суммарная площадь отверстий фильтра F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 соответственно диаметрам 1 мм, 1,5 мм, 2 мм, 2,5 мм и 3 мм.

Из приведенных зависимостей следует, что наибольшие потери удар-

ного импульса наблюдаются при его прохождении вдоль яруса отверстий, имеющих минимальный диаметр (1 мм). Это следовало ожидать, т.к. при течении жидкости через малые отверстия имеет место наибольшая потеря давления.

На третьем этапе экспериментов проводились работы по декольматации сетчатого фильтра, покрытого засохшим гелцементным раствором, имеющим по данным измерений прочность на сжатие 6,3 МПа. Даже при малой величине энергии ударных импульсов ($A_n = 6 \text{ Дж.}$), передаваемых жидкости сбрасываемым грузом 3 (рисунок 3.1.), фильтр освобождался от отложений при 10-ти, 15-тикратном сбрасывании груза на торец рабочего органа. Это свидетельствует об эффективности декольматации фильтров путем возбуждения в жидкости гидравлических ударов.

3.3 Разработка экспериментального устройства для гидровибрационной разглинизации водоносных пластов

Проведение теоретического и экспериментального исследований показали, что эффективная декольматация фильтров происходит при давлении в жидкости, заполняющей фильтры, не превышающие 0,2-0,3 МПа.

При этом энергия ударов, передаваемых рабочему органу падающим грузом, не превышает 5 Дж. Жесткость пружинной подвески рабочего органа должна находиться в пределах $0,25-0,5 \cdot 10^{-6} \text{ н/м}$. Сам рабочий орган должен иметь по длине 5-6 дисков. Расстояние между смежными дисками должно составлять 200-250 мм. При таком расстоянии наблюдаются наименьшие потери давления при проходе ударного импульса, который вызывает выдавливание части жидкости через перфорацию фильтров.

Кроме того, при разработке устройства следует иметь в виду условия его применения на объектах будущих промышленных испытаний. Последние планировалось провести на объектах АО «Волковгеология». Эта организация занимается сооружением геотехнологических скважин для подземного выщелачивания руд. Отличительной чертой фильтровой части таких скважин является малый диаметр применяемых фильтров, наличие их гравийной обсыпки и достаточно большая длина фильтровой части скважины. Фильтры выполняются из пластмассовых труб, их внутренний диаметр составляет 74 мм (наружный – 90 мм). Толщина гравийной обсыпки – 30-40 мм на сторону, длина фильтров – 10-15 м, длина отстойника – до 10 м.

Учитывая вышесказанные соображения, сконструировано и изготовлено устройство для гидровибрационной разглинизации водоносных пластов с учетом его дальнейших испытаний АО «Волковгеология». При конструировании использованы справочные материалы и рекомендации, изложенные в работах [49, 50, 51].

Устройство (рисунок 3.10) состоит из гидроударника Г59В (или Г-59У) и соединенного с ним гидровибрационного рабочего органа. Последний представляет трубу 11, на которую с зазором одеты втулки 9, разделенные дисками 8. В трубе и втулках выполнены радиальные отверстия для выброса отработавшей в гидроударнике воды.

Для исключения неконтролируемых утечек жидкости между дисками и втулками установлены прокладки, а на нижний конец трубы 11 навинчена зажимная гайка 12.

Верхний конец трубы пропущен сквозь фланец и сопрягается на резьбе с упорной гайкой 2, которая в свою очередь соединена с наковальней посредством шлицов с переходником 1. Между торцом упорной гайки 2 и фланцем 14 размещена пружина 4.

Подвеска рабочего органа на гидроударнике осуществляется посредством четырех шпилек 3, верхние концы которых пропущены сквозь отверстия фланца 14, закреплены гайками 6 и зафиксированы от ослабления крепления контргайками 13. С помощью гаек 6 и шпилек 3 возможна также регулировка предварительного натяжения пружины 4.

Работа устройства осуществляется следующим образом. При подаче рабочей жидкости (воды) по бурильным трубам поршень гидроударника начинает наносить удары по наковальне. Последняя при каждом ударе поршня благодаря шлицевому соединению с переходником 1 движется вниз, сжимая через упорную втулку 2 пружину 4 и перемещает в том же направлении трубу 11 с дисками. Последние, в свою очередь, передают ударный импульс окружающей жидкости. Ударные импульсы, возникающие между смежными дисками, многократно отражаясь от последних, оказывают силовое воздействие на закольматированный фильтр, а при его очистке – на закольматированные стенки скважины. Силовой импульс, возникающий при ударе по жидкости зажимной гайкой 12, движется к заглушке отстойника фильтра. Отражаясь в виде волны растяжения, импульс возвращается к гайке 12. Возникающие при этом кавитационные явления также способствуют очистке фильтра и декольметации стенок скважин.

При ходе поршня-бойка гидроударника под действием возвратной пружины вверх отработанная вода по центральному каналу наковальни и упорной гайки попадает в трубу 11 и через радиальные отверстия в ней и во втулках 9, выбрасывается наружу, оказывая дополнительно очищающее действие на фильтр.

Указанное устройство защищено предпатентом РК [52] (приложение Б).

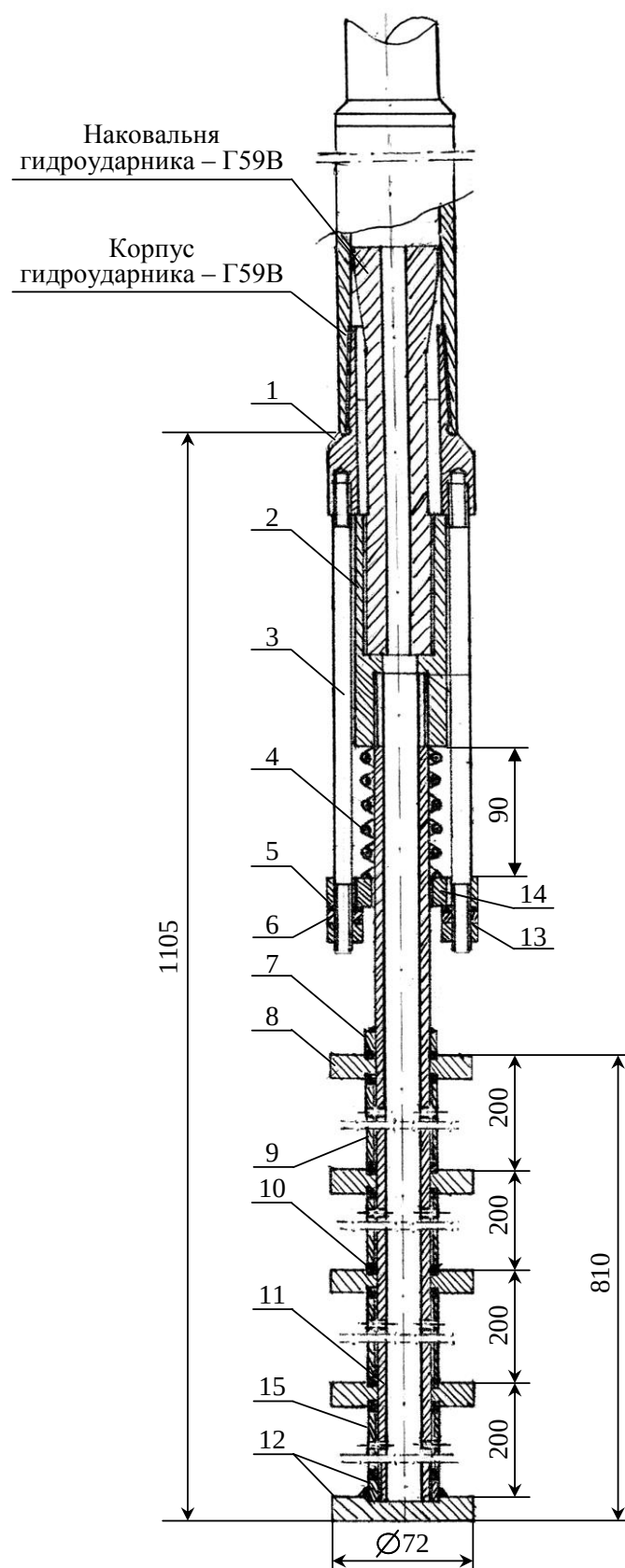


Рисунок 3.10 – Устройство для гидровибрационной разглинизации водоносных пластов

4 ОПЫТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ГИДРОВИБРАЦИОННОЙ РАЗГЛИНИЗАЦИИ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

В этом разделе обоснован выбор объекта испытаний, приведены условия и результаты экспериментальных работ, рассчитан ожидаемый экономический эффект при внедрении разработанных технических средств и обоснованы перспективы их развития и совершенствования.

4.1 Выбор и обоснование объекта испытания

Ранее отмечалось, что разработанный рабочий орган, включающий подпружиненную трубу с дисками, которая взаимодействует с наковальной гидроударника Г59В, создан в соответствии с поперечными размерами фильтровых колонн геотехнологических скважин, сооружаемых АО «Волковгеология». Такое конструктивное оформление рабочего органа связано с весьма большими объемами буровых работ и острой необходимостью высокоэффективной декольматации продуктивных водоносных пластов и при их эксплуатации.

АО «Волковгеология» в настоящее время проводит работы на объектах НАК «Казатомпром», расположенных в Южно-Казахстанской и Кызылординской областях.

Участки работ сложены рыхлыми отложениями верхнего мела, палеогена, неогена и антропогена.

Палеозойский фундамент, залегающий на глубинах 400-700м, погружается с севера на юг и представлен красноцветными песчаниками и алевролитами перми.

Отложения верхнего мела представлены разномеристыми песками с гравием и галькой, переходящими к верху в красноцветные карбонатные глины с прослоями известковитых песчаников и алевролитов. Мощность отложений мела до 80м.

Палеогеновые отложения состоят из пяти горизонтов и одной свиты, из которых три являются рудовмещающим (канжуганский, уюкский, инканский горизонты).

Снизу вверх разрез начинается отложениями «пестрого» горизонта, сложенного преимущественно пестроцветными известковыми глинами, алевролитами с прослоями и линзами мелко и тонкозернистых песков, занимающих до 25-30% от общей мощности горизонта. Общая мощность от 20 до 50м.

Канжуганский горизонт представлен прибрежно – подводнодельтовыми фациями. Песчаные отложения среди глин и алевролитов имеют изменчивую мощность, превращаясь местами в русла и струи, и в целом представляют собой продуктивный горизонт. Пески средне- и мелкозернистые, рыхлые с глинистым цементом, не превышающим 10-15%. Мощность горизонта от 30 до 60м.

Кызылчинский горизонт делится на две пачки: нижнюю – существенно песчаную (продуктивная часть) и верхнюю – глинисто-алевролитовую (верхний водоупор). Глубина залегания кровли песков 395-524м. пески средне- и мелко-

зернистые, преимущественно кварцевые. Мощность горизонта 20-30м, песков – 10-20м.

Инкайский горизонт на участке выклинивается в северном направлении, сокращаясь в мощности от 15-20 до 0 м, представлен разнотернистыми песками с углистым детритом.

Позднеэоценовые отложения представлены морскими монтмориллонитовыми глинами зеленого цвета мощностью 40-60м.

Неогеновые отложения представлены толщей красноцветных известковистых глин мощностью 30-100м.

Четвертичные отложения сложены из аллювиально-эоловых песков, мощностью 30-100м.

Все песчаные горизонты являются водоносными с напорами до самоизлива. Воды пресные.

При разработке месторождений полезных ископаемых способом подземного выщелачивания (ПВ) буровые скважины выполняют основную роль в техническом оснащении процесса.[66,67]

В качестве объекта испытаний была выбрана откачная скважина N92116, сооруженная на месторождении Северный Карамурун. Буровые работы на указанном месторождении проводит геологоразведочная экспедиция №23 АО «Волковгеология». Выбор скважин для проведения экспериментальных работ обосновывался следующими соображениями:

- глубокое залегание продуктивного водоносного пласта, расположенного в интервале 460-472м от поверхности; при таком глубоком залегании вибрационная декольматация пласта с помощью вибратора, расположенного на поверхности, исключается, так как в откачной скважине вокруг фильтра размещена гравийная обсыпка, интересно было получить информацию об эффективности гидровибрационной декольматации фильтровой части скважины в этих осложненных условиях;

- срок эксплуатации откачной скважины составил 1 месяц, а дебит, первоначально равный 25м³/час, начал постепенно снижаться.

4.2 Условия проведения испытаний и результаты экспериментальных работ

Технический разрез скважины №92116 представлен на рисунке 4.1. Как следует из рисунка 4.1 вмещающие породы представлены мягкими и частично средней буримости породами (песок, глины, глинистые песчаники, алевролиты, мергели, ангидриты, гипсы), а продуктивный пласт – разнотернистыми песками с линзами песчаников и алевролитов. Конструкция скважины (рисунок 4.1) следующая: диаметры бурения – 240мм (интервал бурения 0-110м), 190мм (интервал бурения 110-490м), 320мм (расширение скважины в интервале 460-472м), эксплуатационная колонна длиной 110 м, состоящая из полиэтиленовых труб ПВХ-140/10 наружным 140мм, через переходник сопрягается с фильтровой колонной длиной 376м, состоящей из полиэтиленовых труб ПВХ-90/8 наружным диаметром 90мм (внутренний диаметр – 74мм).

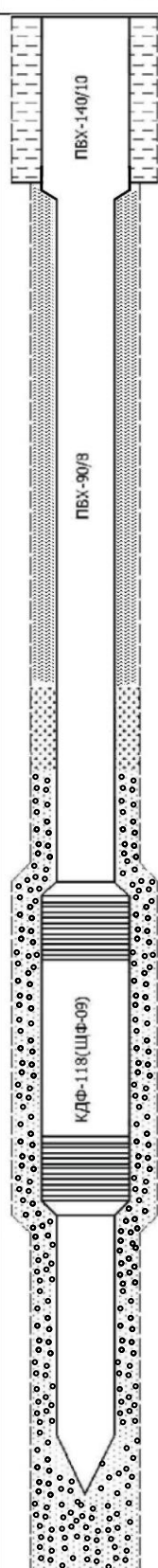
Геологическая часть				Техническая часть				
Глубина, м	Краткая характеристика пород	Мощность слоя, м	Категория по буримости	Проектное положение фильтра		Конструкция скважины, откачная		
				от	до			
20	Супеси, пески т/м зернистые	35	III					
40								
60								
80								
100	Глинистые песчаники, алевролиты плотные с гравием	105	IV-V					
120								
140								
160								
180	Глины, алевролиты, алевролиты плотные	120	IV					
200								
220								
240								
260								
280								
300								
310	Мергель	35	V					
320								
330								
340	Глины плотные	35	IV					
350								
360								
370								
380	Известняки, ангидриты, гипсы	15	VI					
390								
400	Глины плотные с гравием	25	IV					
410								
420	Песчаники, алевролиты	20	V-VI					
430								
440	Пески разнозернистые с линзами алевролитов, песчаников, карбонатных песчаников	12	III-IV				460	472
450								
460								
461								
462								
463								
464								
465								
466								
467								
468								
469								
470								
471								
472								
474	Алевролиты, песчаники		IV-V					
476								
478								
480								
482								
484								
486								
488								
490								

Рисунок 4.1 – Технический разрез скважины № 92116

Вскрытие продуктивного пласта осуществлялось с промывкой ма-логлинистым раствором, имеющим следующие параметры: плотность – $1,12 \text{ г/см}^3$, вязкость – 22сек., водоотдача – $10\text{-}12 \text{ см}^3/30\text{мин.}$ В интервале 460-472м на фильтровую колонну (с перфорацией последней в этом интервале) надеты полиэтиленовые кольца. В результате образуется дисковой щелевой фильтр КДФ 118. Гравийная обсыпка вокруг фильтра, образуется доставкой гравия в зону расширения скважины в интервале 460-472м, с поверхности в кольцевой зазор между стенками скважины и обсадными трубами. Расчетный объем гравия должен заполнить интервал от забоя скважины (486м) до отметки 445м, то есть верхний торец обсыпки располагается выше фильтра на 15м. В интервале 425-445мм формируется цементное кольцо путем закачки соответствующего объема цементного раствора. Остальной кольцевой зазор между обсадными трубами и стенками скважины заполняется гельцементным раствором.[64,65,68]

Применяемая ранее технология освоение скважины заключалась в проведении следующих технологических операций:

- промывка отстойника и фильтра чистой водой в течение 12-16 часов;
- прокачка эрлифтом в течение 12-16 часов до получения максимального дебита (не менее $25\text{м}^3/\text{час}$);
- прокачка при максимальном дебите в течение 8 часов.

К моменту проведения испытаний устройства для гидровибрационной разглинизации необходимо было восстановить первоначальный дебит скважины ($25\text{м}^3/\text{час}$), который начал постепенно снижаться в результате частичной закупорки фильтрационных каналов в гравийной обсыпке и фильтре мелкой фракцией, выносимой из продуктивного песчаного пласта. Методика проведения восстановления производительности скважины заключалась в гидровибрационной обработке фильтра в сочетании с одновременной откачкой эрлифтом.

Для проведения гидровибрационной обработки фильтровой части скважины над ее устьем была смонтирована передвижная буровая установка ПБУ-ЗИФ1200МР (рисунок 4.2), в состав последней входил буровой станок ЗИФ-1200МР и буровой насос НБ-32, буровая мачта высотой 18м, буровое здание и транспортная база. Установка была необходима для спуска в скважину экспериментального устройства с гидроударником и привода его в действие.

Для эрлифтной откачки использовался компрессор марки ХRVS-346.

Испытания проводились в следующей последовательности. На поверхности гидровибрационный рабочий орган с дисками соединялся с гидроударником Г-59В (рисунок 4.3), который в свою очередь соединялся с

напорным шлангом бурового насоса НБ-32. При запуске насоса осуществлялась проверка рабочего органа на холостом ходу; в частности, отмечалось наличие колебаний дисков рабочего органа и выхода отработанной жидкости через отверстия в трубе рабочего органа.



Рисунок 4.2 – Буровая установка ПБУ-ЗИФ1200МЗ
(на переднем плане устья экспериментальной скважины)



Рисунок 4.3 – Сборка гидровибрационного рабочего органа
и его соединение с гидроударником Г59В

Затем насос отключался, его напорный шланг соединялся с корпусом сальника ведущей бурильной трубы; гидроударник с рабочим органом опускался в скважину и подвешивался на ее устье. После соединения с ведущей бурильной трубой осуществлялся подъем гидроударника с рабочим органом над устьем скважины и их повторное испытание (рисунок 4.4). Отмечалось наличие колебаний дисков рабочего органа с амплитудой 5-8мм и выход под значительным напором отработанной технической воды.



Рисунок 4.4 – Испытания гидровибрационного рабочего органа перед спуском в скважину

Гидроударник с рабочим органом опускался в скважину на бурильных трубах диаметром 50мм и останавливался в фильтровой колонне с таким расчетом, чтобы рабочий орган полностью вошел в верхнюю часть фильтра. Затем в эксплуатационную колонну, длина которой составляла 110мм, спускался воздухопроводный шланг с перфорированным смесителем на конце. Глубина спуска смесителя – 100м.

Включался буровой насос НБ-32, который приводил в действие гидроударник и соединенный с его наковальней подпружиненный рабочий орган. Последний с дисками приходил в продольное колебательное перемещение. Одновременно включался компрессор XRVS-346 для подачи воздуха по воздухопроводному шлангу к смесителю.

Затем осуществлялась подача всей бурильной колонны с гидроударником и рабочим фильтром вниз в направлении отстойника фильтра. Скорость подачи составляла 20-30 см/мин. Указанное перемещение прекращалось, когда нижний торец рабочего органа достигал конца фильтра. Затем движение рабочего органа осуществлялось в противоположном направлении (вверх) и прекращалось, когда нижний диск рабочего органа достигал верхнего торца фильтра. Затем указанное возвратно-поступательное перемещение многократно повторялось.

В результате перепадов давления в жидкости, возникающих при колебании дисков рабочего органа с частотой 1200-1400 колебаний в минуту и действия струй отработанных струй воды через щелевой фильтр на прифилтровую зону осуществлялся вынос глинистых частиц и мелкой фракции из гравийной обсыпи и стенок скважины внутрь фильтра.

В дальнейшем кольматант удалялся из скважины эрлифтной откачкой, что было зафиксировано по мутной жидкости, выходящей из скважины.

Восстановление производительности скважины осуществлялось в течение 5 часов (до откачки из скважины чистой, без мути, воды).

Замер дебита после освоения скважины, проведенный объемным методом, показал, что последний увеличился до 27 м³/час против 25 м³/час в начале работ.

Акт проведения производительных испытаний для гидровибрационной разглинизации продуктивных пластов геотехнологических скважин приведен в приложении Д.

4.3 Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения устройства для гидровибрационной разглинизации продуктивных пластов геотехнологических скважин

В основу расчетов взяты полученные результаты производственных испытаний разработанного устройства при восстановлении производительности скважины №92116 на месторождении «Северный Карамурын», также данные плано-финансового отдела АО «Волковгеология».

Расчет ожидаемой эффективности при внедрении устройства проводился только для откачных скважин, пробуренных и действующих на объектах экспедиции № 23 АО «Волковгеология».

За базу сравнения приняты два метода восстановления производительности откачных скважин:

- 1) применяемый метод, заключающийся в восстановлении производительности с помощью прокачки скважины эрлифтом;
- 2) внедряемый метод, заключающийся в гидровибрационном воздействии через фильтр на продуктивный пласт с помощью рабочего органа (трубы с дисками), взаимодействующего через пружинную подвеску с

гидроударником, в сочетании с эрлифтной откачкой.

Исходные данные для расчета. Первый метод:

- 1) время эрлифтной прокачки при восстановлении производительности скважин $T_1 = 24$ часа;
- 2) дебит скважины после эрлифтной прокачки $Q_1 = 25 \text{ м}^3/\text{час}$;
- 3) среднее количество обработок на одну скважину в год $n_1 = 3,4$;
- 4) коэффициент, учитывающий работу скважины в течение года $K = 0,8$.

Второй метод:

- 1) время гидровибрационного воздействия на продуктивный пласт скважины в сочетании с эрлифтной откачкой $T_2 = 6$ часов; (по данным испытаний);
- 2) дебит скважины после проведения восстановления ее производительности $Q_2 = 27 \text{ м}^3/\text{час}$; (по данным испытаний);
- 3) среднее количество обработок скважины в год $n_2 = 3,4$;
- 4) дополнительные расходы, связанные с годовыми амортизационными отчислениями на гидроударник и рабочий орган:

$$C_{\Gamma} = C_0 N_a \text{ тенге/год,}$$

где C_0 – стоимость гидроударника и рабочего органа ориентировочно, $C_0 \approx 70000$ тенге.

N_a = ресурс работы гидроударника и рабочего органа, $N_a = 400$ часов.

5) Стоимость 1ч машинного времени работы насоса НБ-32 для привода гидроударника и рабочего органа $C_m = 191,73$ тенге/час. Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Определяется время работы $T_{1\epsilon}$ одной откачной скважины в год:

$$T_{1\epsilon} = 24 \text{ ч} \cdot 365 \text{ дней} \cdot 0,8 = 7008 \text{ ч.}$$

2. Определяется время работы $T_{2\epsilon}$ одной откачной скважины в год предлагаемым методом. Это время увеличится за счет сокращения времени обработки ($T_2 = 6$ часов вместо $T_1 = 24$ часа). Тогда годовой фонд времени работы одной скважины будет:

$$T_{2\epsilon} = T_{1\epsilon} + (T_1 - T_2) \cdot n_2 = 7008 + (24 - 6) \cdot 3,4 = 7069,2 \text{ ч.}$$

3. Определяется дополнительное количество продуктивного раствора ΔQ , добываемого в год при внедрении гидровибрационной обработки скважин.

$$\Delta Q = (Q_2 - Q_1) T_{2\epsilon} = (27 - 25) \cdot 7069,2 = 14138,4 \text{ м}^3.$$

При стоимости 1 м^3 продуктивного раствора $C_{np} = 52$ тенге/ м^3 дополнительный эффект при эксплуатации одной скважины:

$$\mathcal{E}_{скв} = C_{np} \cdot \Delta Q = 52 \cdot 14138,4 = 735196,8 \text{ тенге}.$$

Величина $\mathcal{E}_{скв}$ несколько понизится за счет работы насоса НБ-32 и гидроударника Г59В при предлагаемом гидровибрационном методе разглизации. Тогда дополнительной эффект $\mathcal{E}_{скв}^*$ на одну скважину в год с учетом работы указанного оборудования составит:

$$\mathcal{E}_{скв}^* = \mathcal{E}_{скв} - C_d / N_a \cdot T_2 \cdot n_2 - C_m \cdot T_2 \cdot n_2 = 735196,8 - 70000 / 400 \cdot 6 \cdot 3,4 - 191,73 \cdot 6 \cdot 3,4 \approx 727711 \text{ тенге}.$$

Так как на объектах экспедиции № 23 АО «Волковгеология» действуют в год 290 откачных скважин, то суммарной ожидаемой годовой экономический эффект $\mathcal{E}_{сум.г}$ составит:

$$\mathcal{E}_{сум.г} = \mathcal{E}_{скв}^* \cdot 290 = 727711 \cdot 290 = 211036190 \text{ тенге/год}.$$

Указанный эффект достигнут в основном за счет повышения производительности откачных скважин при их гидровибрационной обработке (приложение Е).

4.4 Перспективы применения разработанных технико-технологических средств вибрационного освоения водоносных пластов

Необходимо отметить, что испытания устройства гидровибрационного освоения скважин проводились в достаточно сложных условиях. Последние заключались в большой глубине продуктивного пласта (479 м – глубина залегания подошвы) и малым диаметром фильтровой колонны (внутренний диаметр – 74 мм), характерным для конструкции геотехнологических скважин. Это не позволяло разместить в такое пространство забойную ударную машину большей мощности.

Тем не менее, даже в таких сложных условиях сооружения геотехнологических скважин, имеются варианты технических решений, которые позволяют значительно расширить область применения и эффективность вибрационного способа освоения продуктивных пластов.

Первый вариант рекомендуется применить при глубоком (свыше 400 м) залегании водоносного пласта. Компонировка оборудования, опускаемого в скважину для вибрационной декольматации фильтра и пласта приведена на рисунке 4.4. В соответствии с этой схемой гидроударник большой мощности

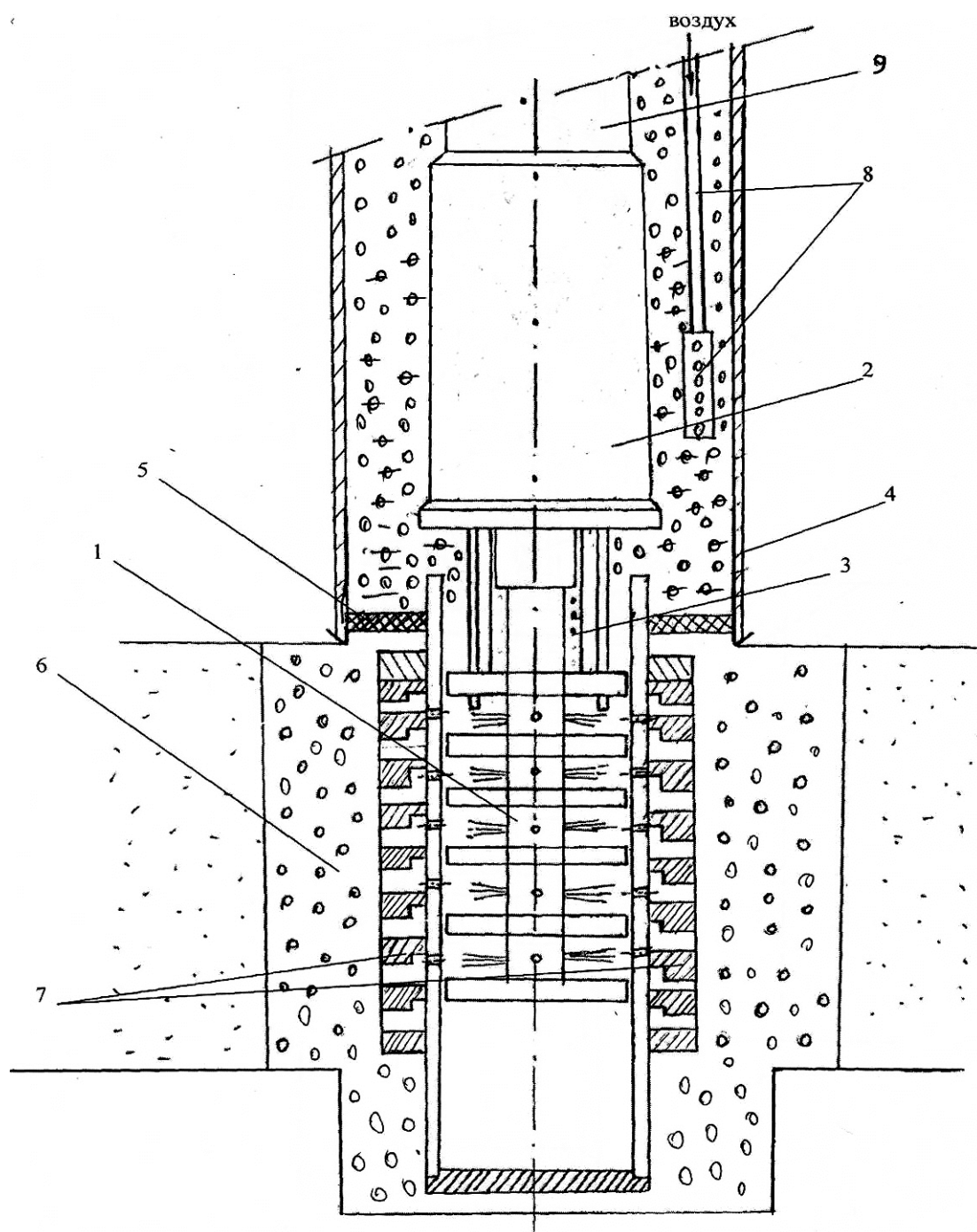
устанавливается в эксплуатационной колонне, диаметр которой значительно превышает диаметр фильтра. Непосредственно внутрь фильтра опускается лишь рабочий орган, подвешенный на пружинной подвеске к гидроударнику. Длина рабочего органа 1 (рисунок 4.5) приравнена к длине фильтра. Возможность создания в вибрационных импульсах достаточно для разглинизации давления, равного 0,5МПа, гарантируется большой энергией единичного удара гидроударника. Например, гидроударник Г-7 (таблица 2.2) имеет энергию единичного удара 60-70Дж, что в 10 раз превышает энергию единичного удара гидроударника Г59В, который использовался при испытаниях в качестве генератора ударных импульсов.

Для доказательства эффективности такой схемы разглинизации по разработанной программе для ЭВМ в системе Delphi7 (см. раздел 2) проведены расчеты основных параметров процесса при следующих исходных данных:

- энергия единичного удара гидроударника Г-7 – 70Дж;
- масса поршня-бойка гидроударника – 11кг;
- масса рабочего органа (при его длине 10м) – 70кг;
- внутренний диаметр фильтра – 0,074м;
- податливость пружинной подвески рабочего органа – $2,5 \cdot 10^{-6}$ м/Н.

В результате получены следующие данные:

- максимальное усилие в ударном импульсе – 5266Н;
- максимальное давление в жидкостном волноводе – 1,22МПа;
- время удара – 0,014 сек;
- частота ударов – 25,05 Гц.



1 – рабочий орган; 2 – гидроударник большой мощности; 3 – пружинная подвеска рабочего органа; 4 – эксплуатационная колонна; 5 – сальник; 6 – гравийная обсыпка; 7 – дисковый щелевой фильтр; 8 – воздухопроводная труба эрлифта; 9 – буровая труба

Рисунок 4.5 – Схема гидровибрационного освоения геотехнологической скважины при глубоком залегании продуктивного пласта

Приведенные расчеты показывают, что основные показатели процесса передачи ударных импульсов значительно улучшились. При этом значительное пиковое давление в ударном импульсе (1,22МПа) позволяет более эффективно проводить декольматацию фильтра и зоны продуктивного пласта. Естественно, полученные показатели необходимо согласовать с

прочностными показателями фильтра.

Современные отечественные буровые насосы способны развивать давление до 5МПа. Это позволяет использовать их для привода гидроударников до глубины 700-800м (с учетом потерь давления в гидроударной машине и в циркуляционной системе буровой установки). С появлением более мощных насосов предельная глубина залегания водоносных пластов, эффективно осваиваемых гидровибрационным методом, будет возрастать.

Второй вариант освоения скважин рекомендуется применять при относительно неглубоком залегании водоносных пластов (до 400-500м, в зависимости от положения динамического уровня воды в скважине при откачке). Компоновка оборудования, опускаемого в скважину для гидровибрационной декольматации фильтра и пласта, приведена на рисунке 4.6. Принципиально схема такая же, как и по первому варианту (рисунок 4.5), то есть внутри фильтровой колонны опущен только рабочий орган, длина которого равна длине фильтра, а забойная ударная машина расположена в эксплуатационной колонне.

Основное отличие второго варианта от первого заключается в том, что в качестве генератора ударных импульсов используется пневмоударник, а в эксплуатационной колонне отсутствует воздухопроводная труба, так как эрлифтная откачка осуществляется отработанным воздухом, выходящим через отверстие в трубе рабочего органа.

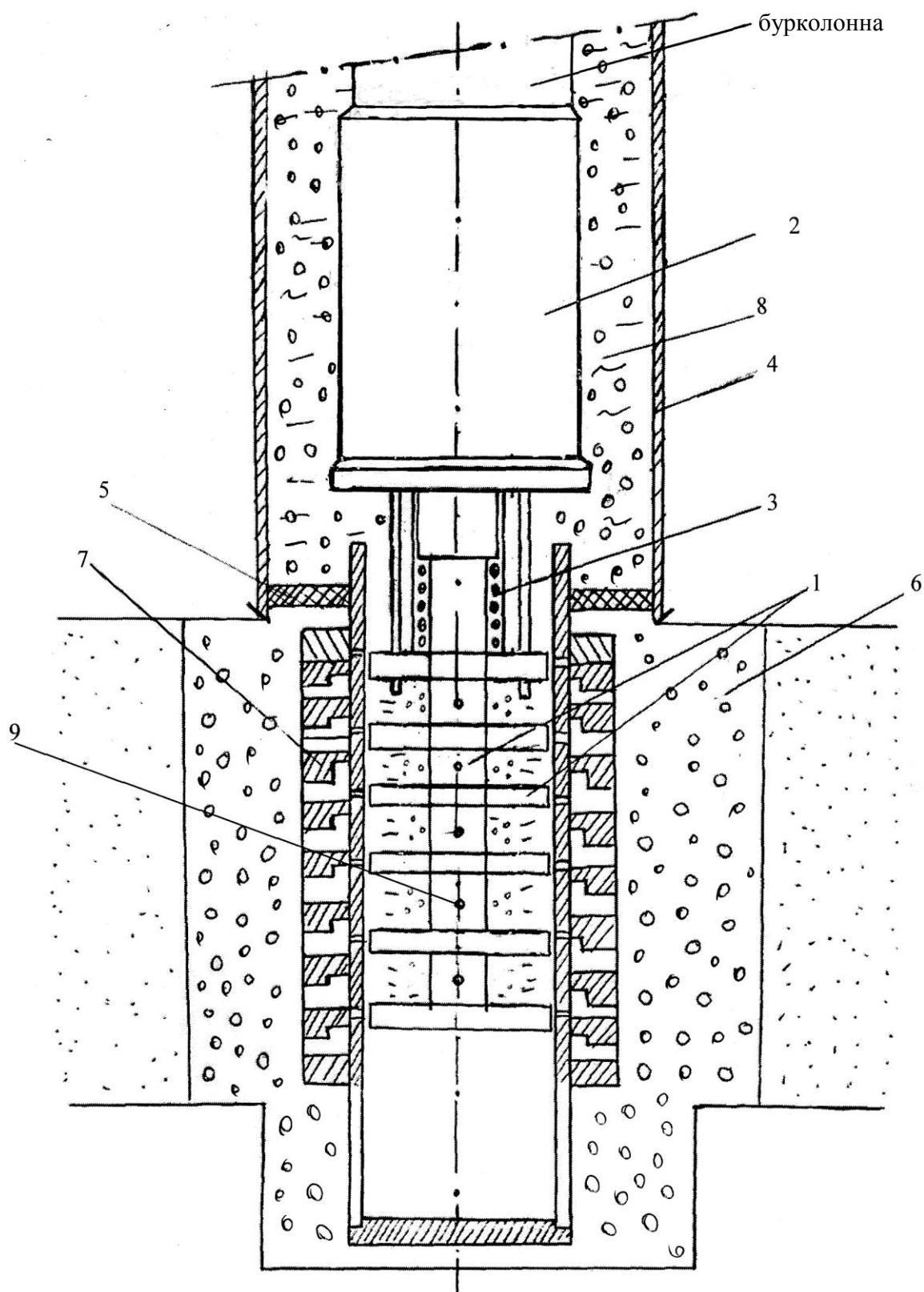
В этой связи использование пневмоударника в качестве привода рабочего органа является предпочтительнее. Кроме того, известно (таблица 2.2), что пневмоударники обладают большей энергией удара, чем гидроударники[54]. Следовательно, их использование повышает параметры гидравлических импульсов, генерируемых рабочим органом.

Ниже приводится расчет основных параметров процесса вибрационного воздействия рабочего органа на жидкость, когда в качестве привода используется пневмоударник РП-111 при следующих исходных данных:

- энергия единичного удара пневмоударника – 150Дж;
- масса поршня-бойка – 4,4кг;
- масса рабочего органа (при его длине 10м) – 70кг;
- внутренний диаметр фильтра – 0,074м;
- податливость пружинной подвески – $2,5 \cdot 10^{-6}$ м/Н.

В результате расчета на ЭВМ получены следующие параметры гидравлических импульсов, генерируемых в жидкостном волноводе:

- максимальное давление в импульсе – 1,75 МПа;
- время удара – 0,014 сек;
- частота ударов – 26,35 Гц.



- 1 – рабочий орган; 2 – пневмоударник; 3 – пружинная подвеска рабочего органа;
 4 – эксплуатационная колонна; 5 – сальник; 6 – гравийная обсыпка;
 7 – дисковый щелевой фильтр; 8 – жидкость, насыщенная отработанным воздухом;
 9 – отверстия для выпуска отработанного воздуха.

Рисунок 4.6 – Схема гидровибрационного освоения геотехнологических скважин при неглубоком залегании продуктивного пласта

Результаты расчетов свидетельствуют, что по общим схемам частота ударов и их время действия одинаковы. Существенное различие сказалось в давлении, которое при использовании пневмоударника возросло на 43%.

Из сравнения двух типов привода рабочего органа (гидроударник или пневмоударник) следует, что с учетом современного состояния насосной и компрессорной техники гидроударник в качестве генератора вибрационного рабочего органа нужно применять только при глубоком залегании водоносных пластов.

Пневмоударник в качестве генератора ударных импульсов желательно применять во всех случаях, когда давление отработанного воздуха превышает гидростатическое давление столба жидкости, заполняющей скважину. Основное преимущество пневмоударника – возможность проведения эрлифтной откачки отработанным воздухом и большая энергия ударов, что позволяет формировать высокое давление в гидроимпульсах, перемещающихся в жидкостном волоновом.

До недавнего времени в промышленности применялись устаревшие двухступенчатые компрессоры, имеющие производительность – 5-10 м³/мин при давлении сжатого воздуха 0,7-0,8 МПа.

Применение таких компрессоров в качестве привода пневмоударником обеспечивало работу последних в лучшем случае до глубины 100-150 м (при низком положении динамического уровня воды в скважине). В настоящее время организации покупают современную компрессорную технику с высокими техническими характеристиками. Например, компрессор XVRS бельгийского производства имеет следующие параметры:

- производительность – 20 м³/мин;
- давление сжатого воздуха – 2,5 МПа (25 атм.).

Именно применение таких компрессоров в качестве привода пневмоударников обеспечит вибрационную декольматацию разработанным рабочим органом до глубины 400 м (в зависимости от положения динамического уровня воды в скважине).

Что касается освоения гидрогеологических (водозаборных) скважин, то их конструкция, как правило, предусматривает установку фильтра диаметром не менее 100 мм [53]. Поэтому проблема вписываемости по габаритам забойной ударной машины в фильтровую колонну отсутствует. В этих условиях предпочтительнее использовать вариант спуска всего комплекса (генератор ударных импульсов и рабочий орган) в фильтр. При этом рабочий орган следует выполнить меньшей длины (порядка 1-1,5 м), и декольматацию водоносного пласта осуществлять возвратно-поступательным перемещением рабочего органа в интервале установки фильтра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе проведенных теоретических исследований получены новые научно обоснованные результаты, позволяющие решить важную задачу – разработку технико-технологических средств гидровибрационного освоения продуктивных пластов, использование которых позволяет повысить эффективность освоения скважин, при строительстве скважин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гаврилко В.М., Алексеев В.С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1976. – 343 с.
- 2 Квашнин Г.П. Деревянных А.И. Водозаборные скважины с гравийными фильтрами. – М.: Недра, 1981. – 15 с.
- 3 Оноприенко М.Г. Бурение и оборудование гидрогеологических скважин. – М.: Недра, 1978. – 165 с.
- 4 Амиян В.А., Уголев В.С. Физико-химические методы повышения производительности скважин. – М.: Недра, 1970. – 275 с.
- 5 Амиян Б.А., Васильева Н.П. Вскрытие и освоение нефтегазовых пластов. – М.: Недра, 1972 – 336 с.
- 6 Башкатов Д.Н. Олоновский Ю.А. Дрягалин Е.Н. Разглинизация буровых скважин на воду. – М.: Колос, 1969. – 111 с.
- 7 Малоян А.В, Малоян Э.А. Практические расчеты по бурению скважин на воду. – М.: Недра, 1968. – 200 с.
- 8 Мирзаджанзаде А.Х., Крылов В.И., Аветисов В.И. Теоретические вопросы провод скважин в поглощающих пластах. – М.: Изд. ВНИИОЭНГ, 1973. – 66 с.
- 9 Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1966. – 388 с.
- 10 Романенко В.А., Вольницкая Э.М. Восстановление производительности водозаборных скважин. – Л.: Недра, 1986. – 111 с.
- 11 Абрамов С.К., Алексеев В.С. Забор воды из подземного источника. – М.: Колос, 1980. – 239 с.
- 12 Башкатов Д.Н. Вскрытие и освоение водоносных пластов при бурении гидрогеологических и водозаборных скважин. – М.: ВИЭМС, 1976. – 68 с.
- 13 Башкатов Д.Н., Панков А.В. Коломиец А.М. Прогрессивная технология бурения гидрогеологических скважин. – М.: Недра, 1998. – 210 с.
- 14 Справочник по бурению скважин на воду / Под ред. Д.Н. Башкатова. – М.: Недра, 1979. – 560 с.
- 15 Квашнин Г.П. Технология вскрытия и освоения водоносных пластов. – М.: Недра, 1987. – 276 с.
- 16 Сердюк Н.И. Кавитационные способы декольматации области буровых скважин. – М.: ОАО ВНИИОЭНТ, 2004. – 175 с.
- 17 Campbell M.D., Zehr J.A. Water well technology. Mo LRAW-hill hook compani. – New-York, 1973. – 263 p.
- 18 Федоров Б.В. Бурение скважин. – Алматы: Изд. центр КазНТУ, 2002. – 284 с.
- 19 А.с. СССР. Вихревой скважинный аппарат. – № 947312.

- 20 А.с. СССР. Гидравлический вибратор для обработки фильтров. – № 966174.
- 21 Рекомендации по виброреагентному восстановлению производительности скважин // ВНИИВОДГЕО. – М., 1980. – 114 с.
- 22 Романенко В.А., Соловьева Н.С. Исследования гидроакустического способа разглинизации фильтров водозаборных скважин. Исследования в области водоснабжения // Межвузовский темат. сб. трудов. – Л., 1982. – С. 76-81.
- 23 Сердюк Н.И. Сравнительная оценка технико-экономической эффективности технологий восстановления производительности буровых скважин. – М.: МГГРУ, 2005. – 37 с.
- 24 Анатолевский П.А., Малоян А.В., Шнееров С.М. Эксплуатация и ремонт водяных скважин. – М.: Недра, 1964. – 195 с.
- 25 Корнилов Н.И., Травкин В.С., Берестень Л.К. и др. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1979. – 359 с.
- 26 Лобанов Д.П., Горовиц В.Б. и др. Машины ударного действия для разрушения горных пород. – М.: Недра, 1983. – 152 с.
- 27 Куликов И.В. и др. Пневмоударное бурение разведочных скважин. – М.: Недра, 1982. – 196 с.
- 28 Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения. – М.: Машиностроение, 1982. – 202 с.
- 29 Маковей Н. Гидравлика бурения. – М.: Недра, 1988. – 536 с.
- 30 Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. – М.: Энергия, 1976. – 318 с.
- 31 Александров Е.А., Соколинский В.Б. Прикладная теория удара и расчета ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 252 с.
- 32 Соколинский В.Б. Методы аналитического расчета параметров неупругого удара в волновых системах. – М.: Изд. ИГД им. Скочинского, 1970. – 216 с.
- 33 Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1996. – 95 с.
- 34 Бидерман В.Л., Малюкова Р.П. Усилия и деформации при продольном ударе. – Сб. Расчеты на прочность в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1962. – вып. 10. – С. 97.
- 35 Ратов Б.Т., Федоров Б.В., Касенов А.К. Параметры гидравлического удара при гидровибрационном освоении водоносных пластов // Вестник КазНТУ. – 2004. – № 2 (40). – С. 38-41.
- 36 Кудряшов Б.Б. Кирсанов А.И. Бурение разведочных скважин с применением воздуха. – М.: Недра, 1990. – 262 с.
- 37 Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин /

Под ред. Е.А. Козловского. – М.: Недра, 1984. – Т. 1, 2.

38 Справочник по бурению геологоразведочных скважин. – СПб.: Недра, 2000. – С. 216.

39 Шамшев Ф.А., Тараканов С.Н., Кудряшов Б.Б. и др. Технология и техника разведочного бурения. – М.: Недра, 1983. – 680 с.

40 Бейсебаев А.М., Туякбаев Н.Т., Федоров Б.В. Бурение скважин и горноразведочные работы. – М.: Недра, 1990. – 302 с.

41 Ратов Б.Г., Федоров Б.В., Сейдахмет А.Ж. Гидровибрационное освоение водоносных пластов с применением забойных ударных машин // Сборник докладов Международной конференции «Инженерное образование и наука в XXI веке». – Алматы: Изд. КазНТУ, 2004. – С. 244-252.

42 Миролюбов И.Н. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов. – М.: Высшая школа, 1985. – 320 с.

43 Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 606 с.

44 Ратов Б.Т., Федоров Б.В. К механизму вибрационной декольматации водоносных пластов // Сборник докладов Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов «Проблемы геологии и освоения недр». – Алматы: Эверо, 2005. – С. 66-72.

45 Пред. патент № 37758. Республика Казахстан. Преобразователь механического давления в электрический сигнал / Касенов А.К., Федоров Б.В., Ратов Б.Т.

46 Башкатов Д.Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. – М.: Недра, 1985. – 18 с.

47 Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле. – М.: Недра, 1973. – 265 с.

48 Танатаров Т.Т., Билецкий М.Т. Основы научных исследований оптимизации в бурении. – Алматы: РИК, 1998. – 223 с.

49 Анурьев В.И. Справочник инженера-конструктора. – М.: Машгиз, 1979. – Т.1. – 727 с.

50 Анурьев В.И. Справочник инженера-конструктора. – М.: Машгиз, 1980. – Т.2. – 529 с.

51 Анурьев В.И. Справочник инженера-конструктора. – М.: Машгиз, 1982. – Т.3. – 575 с.

52 Пред. патент №14693. Республика Казахстан. Устройство для вибрационной разглинизации водоносных пластов / Кудайкулов С.К., Касенов А.К., Ратов Б.Т., Федоров Б.В.

53 Дубровский В.В. и др. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду. – М.: Недра, 1972. – 290 с.

54 Горно-геологический справочник по разработке рудных месторождений. / Под ред. А.М. Бейсебаева, М.Ж. Битембаева, С.Ж. Даукеева. – Алматы: Информационно-презентационный центр МСК РК, 1997. – в 2-х

томах.

55 Ракишев Б.Р. Теоретическая механика в горнотехнических задачах. – Алматы: Изд. Рауан, 1994. – С. 115.

56 Башкатов А.Д. Прогрессивные технологии сооружения скважин. – М.: Недра, 2003. – С. 320.

57 Мусабаев М.О., Исмаилов А.А., Ратов Б.Т. Перспективы развития гидроударного бурения // Труды Международной конференции «Молодые ученые 10-летию независимости Казахстана». – Алматы: Эверо, 2001. – С. 571-574.

58 Ракишев Б.Р. и др. Теория удара: Методические указания по решению задач. – Алма-Ата, 1986. – С. 4-10.

59 Александров Е.В., Соколинский В.Б. Исследование процесса ударного взаимодействия горной породы и инструмента. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1965. – 45 с.

60 Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 195 с.

61 Бидерман В.Д. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.

62 Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М.: ГИЗТТЛ, 1961. – 104 с.

63 Федоров Ю.С., Петров А.А. Предупреждение кольматации фильтров гидрогеологических скважин // Разведка и охрана недр. – 1974. – № 7. – С. 56-58.

64 Фоменко В.И. Расчет дебита скважины с гравийной обсыпкой при изменении уровня по линейному закону. – Белгород: Изд-во ВИОГЕМ, 1970. –

С. 33-38. (Труды ВИОГЕМ, вып. XI).

65 Фоменко В.И. Оценка фильтрационной устойчивости рыхлых водоносных пород в прифильтровой зоне скважин с гравийной обсыпкой – В кн.: Совершенствование технологии сооружения скважин на воду. – Новосибирск: Изд-во ЦНТИ, 1972. – С. 143-151.

66 Сергиенко И.А., Волынец В.П. Обоснование конструкции буровых скважин при подземном выщелачивании полезных ископаемых // Изв. вузов Сер. Геология и разведка. – 1979. – № 4. – С. 132-137.

67 Сутягин В.В., Антипов В.И., Никитенко Н.М. О сцеплении полиэтиленовых труб с цементным камнем // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. – 1977. – № 12. – С. 176-177.

68 Сергиенко И.А., Мосеев А. Ф., Бочко Э. А., Пименов М.К. Бурение и оборудование геотехнологических скважин. – М.: Недра, 1984. – 224 с.

69 Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2001. – С. 175.

70 Башкатов А.Д., Фазлулин М.И., Дрягалин Е.Н. Сооружение гравийных фильтров за рубежом. – М.: ВИЭМС, 1985. – С. 207.

71 Башкатов А.Д. Сооружение высокодебитных скважин. – М.: Недра, 1992. – С. 109.

72 Allen J.H. methods for determining the parameters that affect the rate of penetration.-3 Adriatic symposium on oil well drilling. – Porec. Yugoslavia, 1977. – P. 63.

73 Chillingarian G.V., Vorabutr P. Drilling and drilling fluids. – Elsevier scientific publishing company. – Amsterdam-Oxford-New-York, 1981. – P. 95.

74 Millhone R.S. Completion fluids for minimizing productivity damage // Journal of Petroleum Technology. – 1983. – Vol. 35, N 1. – P. 39.

75 А.с. СССР. № 386140. 1971.

76 А.с. СССР. Гидровзрывное устройство / М.Т. Аубакиров, Ю.Н. Бабин, Д.К. Калиев, С.М. Сейтбаталов, В.В. Поветкин, Б.В. Федоров. – № 585790; опубл. 07.10.75. – 4 с.: ил.

77 А.с. СССР. Устройство для разрушения горных пород / К.Н. Копылец, Н.П. Маслова, В.В. Поветкин. – № 798297; заявл. 19.07.76; опубл. 23.01.81, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.

78 А.с. СССР. Устройство для разрушения горных пород / М.Т. Аубакиров, Н.П. Маслова, В.В. Поветкин, С.М. Сейтбаталов. – № 749133; опубл. 05.12.78. – 6 с.: ил.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	Ошибка! Закладка не определена.
1	СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ.....6
1.1	Современные воззрения на механизм кольматации фильтров и водоносных пластов при их вскрытии вращательным бурением 7
1.1.1	Механизм кольматации продуктивных пластов.....7
1.1.2	Кольматация фильтров 11
1.2	Анализ способов и технических средств, применяемых при освоении гидрогеологических и геотехнологических скважин.....14
1.2.1	Систематизации способов разглинизации освоения водоносных пластов.....15
1.2.2	Физические методы восстановления водоотдачи.....17
1.2.3	Химические методы восстановления водоотдачи 22
1.2.4	Физико-химические методы восстановления водоотдачи 22
1.3	Методы и средства, основанные на передаче гидромеханических колебаний заглинизированному пласту 23
1.3.1	Гидровибрационный метод.....24
1.3.2	Существующие погружные рабочие органы для гидровибрационной разглинизации пластов 29
1.3.3	Разработка погружных технических средств, основанных на акустическом методе разглинизации пластов.....33
2	ПАРАМЕТРЫ ГИДРОВИБРАЦИОННОЙ ДЕКОЛЬМАТАЦИИ ФИЛЬТРОВ И ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ 36
2.1	Основные закономерности распространения упругих колебаний в жидкости 36
2.2	Параметры гидравлических ударов при гидровибрационном освоении геотехнологических водозаборных скважин 40
2.3	Оптимизация параметров экспериментального рабочего органа для гидровибрационного освоения водоносных пластов 53
2.4	Условия разрушения кольматанта фильтров и закольматированной зоны водоносных пластов.....60
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА И РАЗРАБОТКА РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ГИДРОВИБРАЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ.....64
3.1	Методика экспериментальных исследований.....64
3.2	Результаты экспериментальных работ.....73

3.3	Разработка экспериментального устройства для гидровибрационной разглинизации водоносных пластов	76
4	ОПЫТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ГИДРОВИБРАЦИОННОЙ РАЗГЛИНИЗАЦИИ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ.....	79
4.1	Выбор и обоснование объекта испытания.....	79
4.2	Условия проведения испытаний и результаты экспериментальных работ	80
4.3	Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения устройства для гидровибрационной разглинизации продуктивных пластов геотехнологических скважин	85
4.4	Перспективы применения разработанных технико-технологических средств вибрационного освоения водоносных пластов.....	87
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	94

Научное издание

Ратов Боранбай Товбасарович

**ГИДРОВИБРАЦИОННОЕ ОСВОЕНИЕ ФЛЮИДОСОДЕРЖАЩИХ
ПЛАСТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СКВАЖИН**

*Рекомендовано к печати Ученым Советом Казахского национального
технического университета им. К.И.Сатпаева*

Авторская редакция

Компьютерная верстка Г.К. Елибаева

Подписано в печать 12. 01. 2015 г.

Тираж 500 экз. Формат 60х84/16.

Бумага офсетная, Усл. печ. л. 7,75. Заказ № 4.

Цена договорная.

ISBN 978-601-7529-21-5



9 786017529215