

На правах рукописи

ШНАЙДЕР Александр Владимирович

**Течения двухфазных смесей в пористой
среде при волновом воздействии**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень 2006

Работа выполнена в Тюменском филиале Института теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской Академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Губайдуллин Амир Анварович

Научный консультант кандидат физико-математических наук Ахметов Альфир Тимирзянович

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук, профессор Федоров Константин Михайлович

доктор химических наук
Нестеров Анатолий Николаевич

Ведущая организация Башкирский Государственный Университет

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета

Автореферат разослан 25 ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



А. В. Татосов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования течений жидкостей с пузырьками газа в пористой среде при волновом воздействии представляют значительный научный интерес. Поведение таких систем изучено недостаточно полно. Изучение эффектов, возникающих при прохождении волн давления по пористой среде, насыщенную фильтрующимся флюидом, является важной экспериментальной задачей.

С другой стороны, такие исследования актуальны для разведки и добычи нефти и газа. Искусственно возбуждаемые сейсмические волны несут информацию о строении нефтесодержащих пластов. Знание особенностей взаимодействия волны давления с флюидом, насыщающим пласт, необходимо при анализе данных сейсморазведки, что определяет актуальность экспериментального исследования указанного процесса. Важно представлять физическую картину процессов, происходящих в поровом пространстве пласта при волновом воздействии и знать его результат.

Особое внимание в течение последних десятилетий уделяется пенам в пористой среде. В фундаментальном плане пена в пористой среде представляет собой чрезвычайно интересный и сложный для изучения физико-химический объект. В настоящее время отсутствует единая точка зрения на механизм движения газа в пористой среде в присутствии пены. Имеющиеся математические модели течения пены не учитывают многих ее свойств, таких, как способность к самогенерации и т.д. В таких условиях детальное экспериментальное исследование пены в пористой среде является единственным и наиболее эффективным методом, способным ответить на многие из существующих вопросов в этой области.

Технологические приложения пен в пористой среде достаточно разнообразны и связаны, в основном, с известным эффектом блокирования газовых путей в порах пеной. Этот эффект широко используется в технологиях добычи нефти и газа, очистки пористых сред от загрязнений и т.д. Не менее часто приходится также и бороться с пеной, например, в медицине при самопроизвольном пенообразовании в легких у больных легочными заболеваниями. Для таких приложений необходимо знать особенности образования и условия разрушения пены в пористой среде.

Целью работы является экспериментальное исследование волнового воздействия на течение жидкости с пузырьками газа в пористой среде. Изучение образования, течения и разрушения газожидкостной пены в пористой среде в масштабе пор и масштабе пористого образца.

Научная новизна. Предложен комплексный экспериментальный подход для одновременного изучения фильтрационных течений в масштабе пор и масштабе пористого образца. Экспериментально исследована фильтрация воды, содержащей растворенный газ и пузырьки газа, в двумерной и трехмерной пористой среде. Изучена динамика воздействия волны давления на пористый образец, насыщенный газированной

жидкостью. Установлено, что воздействие волн давления может приводить как к увеличению, так и к уменьшению расхода флюида в зависимости от интенсивности падающей волны, проницаемости пористого образца и момента времени волнового воздействия.

Экспериментально исследованы процессы образования, течения и разрушения пены в двумерной пористой среде с гидрофильной и гидрофобной поверхностью пор. Исследование проводилось одновременно в двух пространственных масштабах: в масштабе пор и масштабе пористого образца. Обнаружено свойство реопексии пены в пористой среде. Установлена зависимость плотности образующейся пены от приложенного градиента давления. Наблюдались два режима нестационарного течения пен: режим с блокированием фильтрации и пульсационный режим. Обнаружено, что геометрическая размерность фрактальных структур, образующихся при вытеснении газом жидкости в двумерной пористой среде, выше для пенообразующего раствора, чем для воды. Исследован в масштабе пор процесс разрушения пены в пористой среде при вытеснении ее жидкостью. Установлена зависимость скорости фронта разрушения пены от приложенного градиента давления.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается строгим соблюдением принципов механики сплошной среды и условий применимости ее законов при проведении экспериментов. Все полученные результаты объяснены с позиций механики сплошной среды и механики многофазных сред и согласуются с данными экспериментов других авторов, близких по содержанию к данной работе.

Практическая ценность диссертации состоит в получении новых данных о фильтрации газированных жидкостей и влиянии волн давления на фильтрацию газожидкостных сред, в детальном изучении вопросов образования, течения и разрушения пен в пористой среде. В работе выделены основные параметры, определяющие поведение пенной системы. На основе полученных в работе данных разработана и запатентована новая технология повышения нефтеотдачи с помощью пены в пористой среде [8]. Результаты работы могут быть применены при создании технологий в ряде отраслей промышленности, таких, как химическая, газонефтедобывающая и др.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики СО РАН, на II и III Всероссийских конференциях молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», на международной конференции «Методы аэрофизических исследований ICMAR'2002», на международной конференции по пенам и эмульсиям «EuroFoam'2002».

Публикации. Полученные результаты опубликованы в 10 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 110

страниц, включая 36 рисунков и список литературы, состоящий из 92 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 представлен обзор экспериментальных и теоретических работ по рассматриваемым вопросам. В свете поставленных задач выполнен анализ имеющейся литературы.

В главе 2 даны постановки экспериментов, описаны использованные фильтрационные установки, предложены и обоснованы экспериментальные методики измерения давления и расхода флюидов, а также методика видеорегистрации течений в порах.

Глава 3 посвящена фильтрации жидкости с газом при градиентах давления порядка $0,1 \text{ МПа/м}$ на временах порядка суток. В этой главе также исследуется влияние воздействия волн давления на пористый образец с движущейся в нем пузырьковой жидкостью. В п. 3.1 рассмотрено явление «фильтрационного запираания» - эффект блокирования фильтрации воды в пористом образце, насыщенном остаточной (жидкой или газообразной) фазой (рис. 1.а).

Результаты воздействия волн давления на фильтрацию в указанной выше системе на разных временных масштабах описаны в п. 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3. Установлено, что изменение расхода флюида после ударно-волнового нагружения существенно зависит от исходной проницаемости керна. Для кернов низкой проницаемости (менее 10 мД) наблюдалось кратковременное (несколько секунд) незначительное повышение расхода воды, слабо зависящее от амплитуды волны сжатия. Практически сразу после нагружения устанавливалось исходное значение расхода воды через керн.

Влияние волн давления на течение газожидкостной смеси в кернах с относительно высокой проницаемостью ($50 - 100 \text{ мД}$) неоднозначно и может приводить к разным результатам в зависимости от момента времени волнового воздействия на фильтрацию. При наложении ударно-волнового нагружения на фильтрацию жидкости с газом на начальном этапе происходит пиковое увеличение проницаемости керна в 2 - 3 раза. Затем проницаемость монотонно снижается до нуля в течение 20 - 30 мин. Такая картина повторяется при последующих нагружениях керна в запертом состоянии (рис. 1.б). При отсутствии дальнейших ударов керн остается абсолютно запертым в течение нескольких часов.

Воздействие волн давления на «средней» стадии фильтрации (в диапазоне времени 2 - 4 ч с начала фильтрационного процесса) приводит к резкому уменьшению расхода фильтрующейся воды с остаточным газом. Как видно из рис. 1.в, ударно-волновые нагружения фильтрующейся воды в керне с остаточным газом приводят к уменьшению проницаемости с 45 до $20 - 25 \text{ мД}$, т.е. происходит частичное блокирование фильтрации в керне в

результате ударно-волнового воздействия. Дальнейшие нагружения керна к изменению проницаемости жидкости не приводят. В случае течения воды в кернах с остаточной жидкой фазой (бензин) после волнового нагружения на начальной и средней стадиях процесса фильтрации проницаемость не изменяется.

При воздействии волнами давления на керна, находящийся в состоянии «фильтрационного запираения» (на временах порядка суток и более после начала эксперимента) после каждого удара происходит пиковое увеличение проницаемости, сопровождающееся увеличением среднего на интервале времени между ударами значения проницаемости (рис. 1.г).

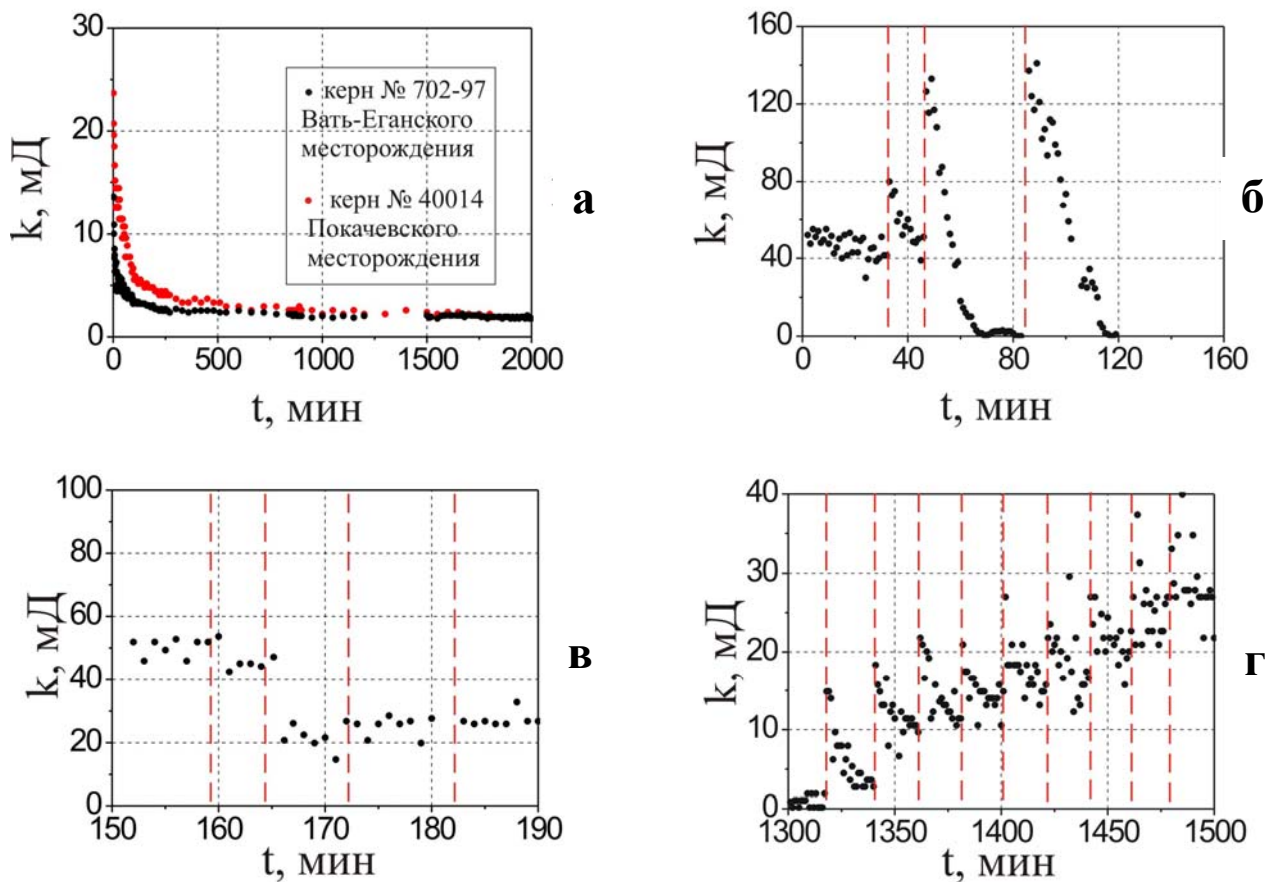


Рис. 1. Изменение проницаемости во времени при наложении волн давления на фильтрацию воды с остаточной фазой. *а* – эффект «фильтрационного запираения» (вода с воздухом), *б* – пиковое повышение проницаемости при волновом воздействии в начальной стадии фильтрации (вода с воздухом), *в* – «ударное блокирование» фильтрации на средней стадии (вода с воздухом), *г* – пиковое повышение проницаемости при волновом воздействии на поздней стадии фильтрации (вода с воздухом). Вертикальные штриховые линии соответствуют моментам волнового воздействия.

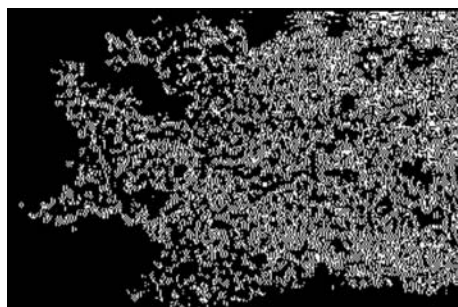
После серии волновых нагрузжений достигается максимальное для данного зерна значение проницаемости, равное начальному значению. Такой характер процесса наблюдается как для воды с газом, так и для воды с бензином; качественные отличия отсутствуют.

В главе 4 представлены результаты исследований в масштабе пор и масштабе пористой среды образования и течения пены в пористой среде, получаемой вытеснением газом пенообразующего раствора. Показана взаимосвязь между процессами, происходящими на разных масштабах.

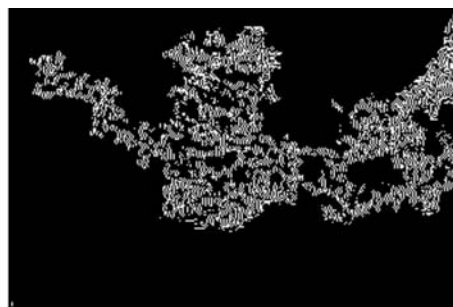
В п. 4.1 описано формирование в прозрачной модели пористой среды «языков» - древовидных структур, образуемых газовой фазой при вытеснении газом жидкости. «Язык» в модели формирует «вязкие пальцы» - длинные газовые «отростки», возникающие за счет неустойчивости фронта вытеснения. Установлено, что для воды и воздуха увеличение давления нагнетаемого газа приводит к уменьшению коэффициента вытеснения жидкости газом (отношения площади пор, занятых газом, к полной площади порового слоя) и образованию менее плотного и более узкого «языка» Методом клеточного подсчета геометрической размерности D наблюдаемых в модели пористой среды «языков» показано, что эти структуры являются фрактальными. Для «языков», образуемых газом в воде, размерность получаемых структур находится в диапазоне $D \in [1.46, 1.56]$, для «языков» в растворе ПАВ $D \in [1.6, 1.83]$. Таким образом, образование пены при развитии «вязких пальцев» в растворе ПАВ приводит к формированию фрактальной структуры с большей, чем в случае с водой, размерностью.

В п. 4.2 описывается формирование и движение пены в масштабе пор. Вытеснение раствора ПАВ газом в порах с образованием пены начинается при превышении критического перепада давления $\Delta P_{cr} = 0.01 \text{ МПа}$. Установлено, что динамика образования и течения пены в пористой среде зависит от свойств пенообразующего раствора, характеристик пористого образца и внешнего градиента давления. Обнаружено, что в плоской модели пористой среды пленки пены формируются первоначально в результате соприкосновения «вязких пальцев» газа: за продвигающимися менисками газа образуются стабильные линзы раствора ПАВ, ориентированные в основном параллельно «пальцам», которые затем трансформируются в пленки пены (рис. 2, а). Эти ориентированные преимущественно по потоку пленки пены не могут блокировать течение газа, так что проницаемость газа в пористой среде уменьшается незначительно – по нашим данным, в несколько раз.

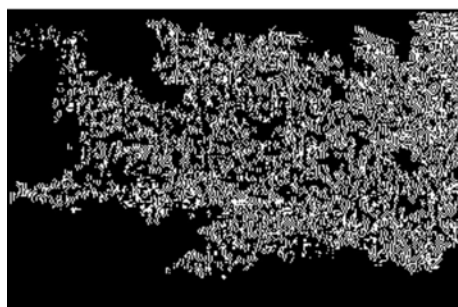
С увеличением градиента давления в среде при снижении проницаемости газа (вследствие образования пены) и с развитием нестационарности течения в области, занятой пеной, наблюдаются два других механизма генерации пленок пены – капиллярно-гидродинамическая неустойчивость и размножение пленок пены на разветвлениях транспортных каналов, которые начинают вносить основной вклад в формирование пены.



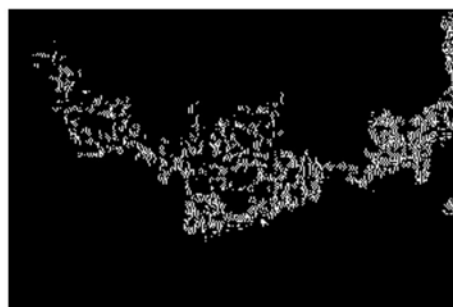
а, $D=1,83$



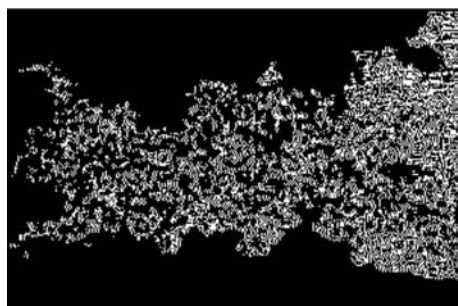
б, $D=1,56$



в, $D=1,76$



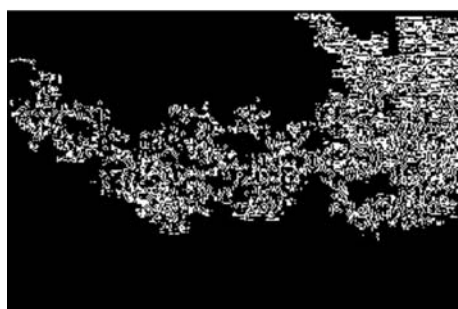
г, $D=1,47$



д, $D=1,70$



е, $D=1,52$



ж, $D=1,62$



з, $D=1,50$

Рис. 2. Формирование «вязких пальцев» в прозрачной плоской модели пористой среды при вытеснении жидкости газом. *а, в, д, ж* - вытеснение газом 0.5% раствора сульфанола; *б, г, е, з* - вытеснение газом воды при градиенте давления 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 МПа/м соответственно. Под рисунками указано время t распространения соответствующего «пальца» от входа до выхода модели и фрактальная размерность D .

Экспериментально их действие часто наблюдалось в виде волны вторичного образования пены, бегущей от входа модели после образования первичной структуры пены «вязкими пальцами». Пленки пены, формирующиеся за счет капиллярно-гидродинамической неустойчивости, ориентированы, как правило, поперек потока, и именно они отвечают за блокирование течения газа в насыщенной пеной пористой среде (рис. 3, б). Установлено, что после прохождения вторичной волны образования пены проницаемость газа в модели пористой среды снижается на два-три порядка.

Установлено, что с уменьшением насыщенности пористой среды раствором ПАВ размножение пленок пены на разветвлениях транспортных каналов становится основным механизмом генерации пленок пены, определяющим особенности ее течения. При дальнейшем снижении насыщенности пористой среды раствором ПАВ (включая раствор ПАВ в пленках пены), когда она становится ниже определенного критического значения, генерация новых пленок пены практически прекращается. Течение такой «сухой» пены в пористой среде принципиально отличается от течения пены в пористой среде, насыщенной раствором ПАВ выше критического уровня. «Сухая» пена демонстрирует стационарное течение во всем исследуемом диапазоне перепадов давления. Скорость течения «сухой» пены нелинейно зависит от приложенного перепада давления.

Необходимо подчеркнуть, что вклад различных механизмов генерации пленок пены зависит от градиента давления в пористой среде и может изменяться в процессе формирования пены. В общем случае, на первой стадии процесса реализуется механизм соприкосновения «вязких пальцев» («leave-behind») с подключением на последующих стадиях других механизмов с активностью, зависящей от перепада давления.

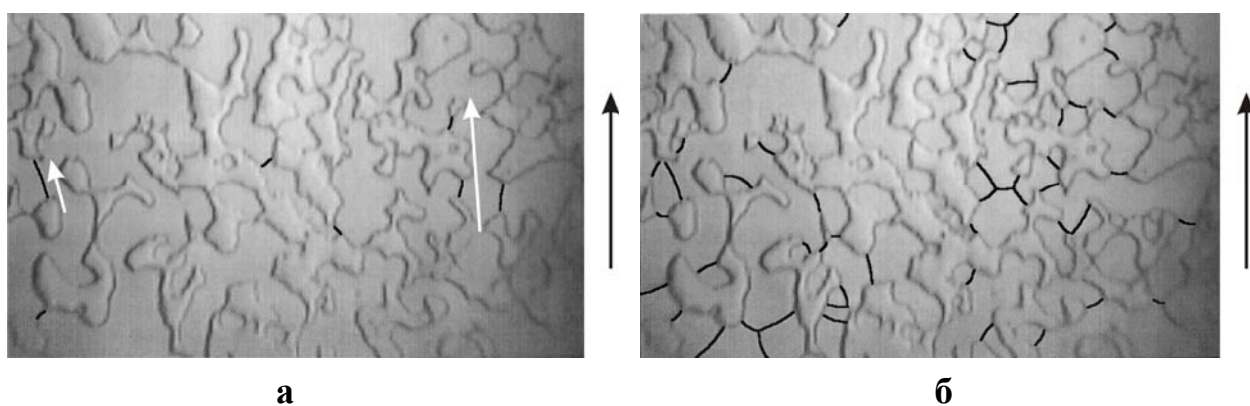


Рис. 3. Генерация пены в плоской модели пористой среды по механизму «leave-behind» (а) и по механизму «snap-off» (б) при перепаде давления 0.04 МПа в 0.5% водном растворе додецилсульфата натрия. Белыми стрелками показано направление движения отдельных «вязких пальцев». Черной стрелкой показано направление градиента давления.

Продвижение фронта вытеснения раствора ПАВ газом сопровождается формированием пены в «вязких пальцах». Пленки пены тормозят течение газа и увеличивают кажущуюся вязкость фазы, формируемой захваченным газом, пленками пены и смачивающей пленкой жидкости. В результате уменьшается относительная разность кажущихся вязкостей вытесняемой и вытесняющей фаз, так что снижается скорость движения фронта вытеснения по сравнению с чистой водой, уменьшается характерный масштаб неустойчивости фронта вытеснения и возрастает площадь охвата пористой среды «вязкими пальцами».

После достижения «вязкими пальцами» газа выхода модели и формирования пены в пористой среде, изучались свойства пены, скорость фильтрации и режимы течения. При визуальных исследованиях пены в двумерной модели пористой среды в качестве параметра, характеризующего свойства пены, была принята плотность пены – количество пленок (ламеллей) ρ на единицу площади модели пористой среды. Дополнительным параметром, важным для характеристики пены в пористой среде, является доля пленок α , образующих связанные полиэдрические структуры. При значении $\alpha > 0.5$ пена в пористой среде приближается по своим свойствам к объемной пене.

Установлено, что величина ρ существенно зависит от перепада давления, при котором образуется пена. С увеличением перепада давления величина ρ нелинейно возрастает (рис. 4). Пена, полученная при значениях $\Delta P > 5\Delta P_{cr}$, имеет полиэдрическую структуру в порах, размеры ячеек пены становятся меньше размера пор ($\alpha > 0.5$). В процессе пенообразования гидродинамическое сопротивление движению газа резко возрастало, что приводило к прекращению фильтрации флюидов. Такое поведение пены наблюдалось при перепадах давления ΔP , лежащих в диапазоне от ΔP_{cr} до $\Delta P = 0.05 \text{ МПа}$. При дальнейшем увеличении давления (от $\Delta P = 0.05 \text{ МПа}$ до 0.1 МПа) наблюдался периодический прорыв газа через пену. При перепаде давления $\Delta P > 0.1 \text{ МПа}$ наблюдается непрерывное течение газа через пену в пористой среде.

Исследование гидродинамического сопротивления пен для различных значений параметра ρ проводилось следующим образом. После завершения процесса образования и прекращения течения полученной пены (кривая А, рис. 5) давление газа на входе модели последовательно увеличивалось в целое число раз. При каждом новом перепаде давления проводилось измерение расхода флюида в течение 5–15 мин. На рис. 5 представлена зависимость расхода от времени для пены с плотностью $\rho = 1 - 2 \text{ мм}^{-2}$. Кривая А соответствует расходу флюидов в процессе образования пены. Кривая В соответствует устойчивому поведению пены, при котором увеличение перепада давления вызывает замедляющееся течение пены (релаксационное блокирование фильтрации).

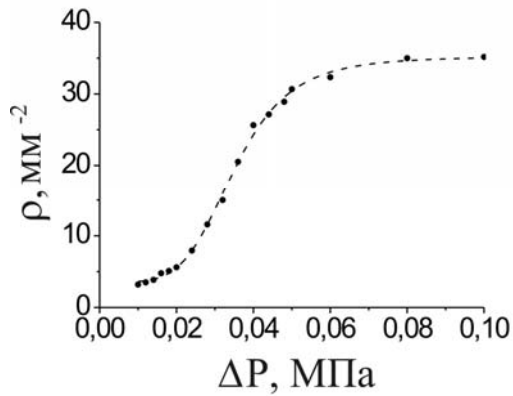


Рис. 4. Зависимость плотности пены в пористой среде от приложенного перепада давления.

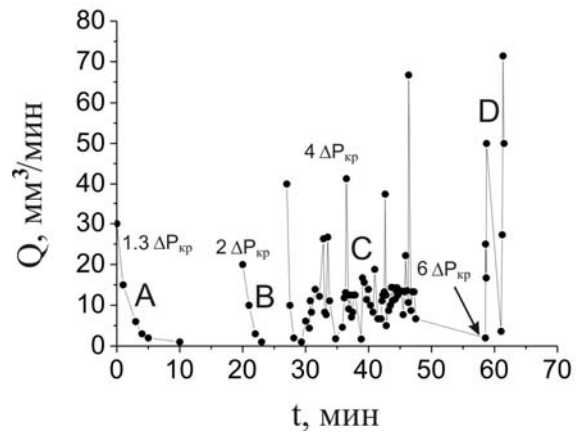


Рис 5. Зависимость расхода пены, полученной при перепаде давления $\Delta P = 0.0135 \text{ МПа}$ от времени при различных значениях действующего перепада давления.

Дальнейшее увеличение ΔP приводит к возникновению пульсирующего характера фильтрации флюидов (кривая С). Наконец, при перепаде давления $\Delta P > 0.05 \text{ МПа}$ наблюдается периодический прорыв газа через пену в пористой структуре (кривая D). Пена, полученная при таком перепаде давления, прорывается газом сразу после формирования.

Установлено, что наблюдаемое поведение пены обусловлено свойством реопексии (реопексия – увеличение вязкости с течением времени при постоянной или увеличивающейся скорости сдвига). При повышении перепада давления пена приходит в движение. За счет генерации новых пленок и вспенивания в порах остаточного пенообразующего раствора (ПР) возрастает гидродинамическое сопротивление и пена вновь блокирует поток флюидов (кривая В). С увеличением перепада давления существование конкурентного процесса разрушения пены приводит к пульсирующему характеру движения флюидов. Прорыв газа через пену при перепадах давления $\Delta P > 5\Delta P_{cr}$ связан с тем, что дальнейшее увеличение перепада давления не приводит к росту величины ρ , но, с другой стороны, вызывает разрыв пленок пены.

Таким образом, основные результаты экспериментального изучения режимов течения пены состоят в следующем. Установлено, что в области значений перепада давления до $\Delta P < 0.05 \text{ МПа}$ имеет место блокирование течения образовавшейся пеной, которое проявляется как постепенное падение скорости фильтрации пены вплоть до полной остановки фильтрационного процесса. При этом формируется пена с такой плотностью пленок и их распределением в поровом пространстве, что напряжение ее начального сдвига в точности соответствует приложенному перепаду

давления. Если давление на входе модели возрастало, пена приходила в замедляющееся движение до установления нового значения давления сопротивления начальному сдвигу. Данный «блокирующий» режим течения пены наблюдался до значений $\Delta P = 0.05 \text{ МПа}$.

При дальнейшем увеличении давления на входе модели наблюдался периодический, а затем и непрерывный прорыв газа через пену в пористой среде. При значениях перепада давления $\Delta P > 0.1 \text{ МПа}$ за счет выноса с потоком газа значительного количества жидкой фазы в модели пористой среды формируется «сухая» пена. При указанных перепадах давления в процессе пенообразования происходит вытеснение всего ПР, кроме того, который сосредоточен в пленках пены и пленках, смачивающих стенки пор. Поэтому не происходит формирования более плотной пены, способной блокировать течение газа при таком перепаде давления, и образуется «сухая» пена, которая сразу прорывается газом. Обнаружено, что течение «сухой» пены существенно отличается от течения пены в пористой среде, насыщенной раствором ПАВ ниже критического уровня («влажной» пены). При понижении перепада давления «сухая» пена течет при данном перепаде давления с постоянной скоростью, при этом ее плотность и структура в процессе движения не изменяются. Это свойство «сухой» пены было использовано для исследования подвижности пены в пористой среде (п. 4.3) т.е. зависимости скорости движения от приложенного перепада давления. Скорость течения пены измерялась при ступенчатом понижении перепада давления (рис. 7). Установлено, что скорость течения «сухой» пены нелинейно зависит от приложенного перепада давления (рис. 8).

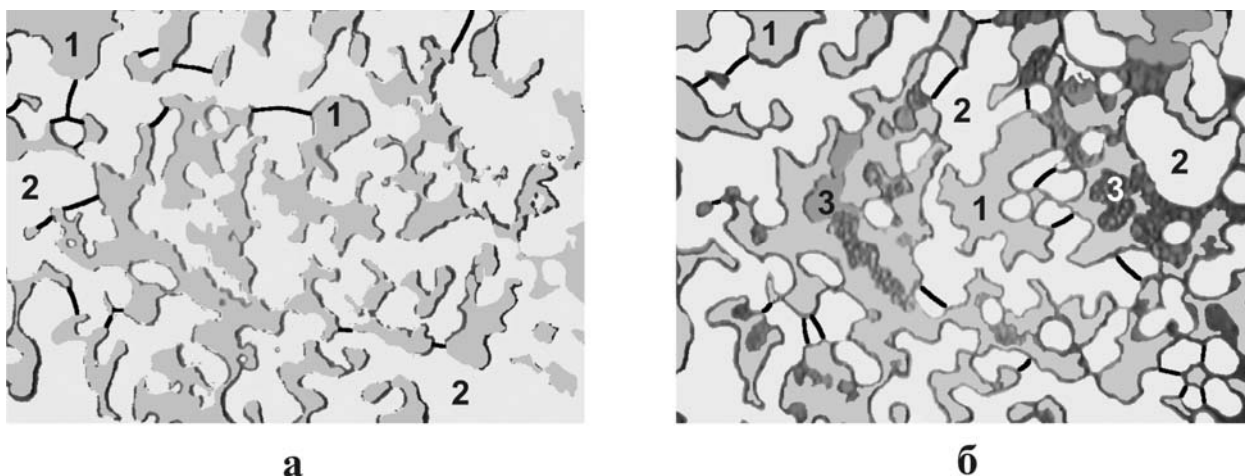


Рис. 6. Образование пены в 0.5% растворе неолола: **а** - при $\Delta P = 0.05 \text{ МПа}$ в чистом ПР, **б** - $\Delta P = 0.05 \text{ МПа}$ в ПР с остаточными углеводородами после пятикратной закачки ПР и газа (1 – скелет, 2 – поры с воздухом, 3 – поры с водой и нефтью, — - пленки пены).

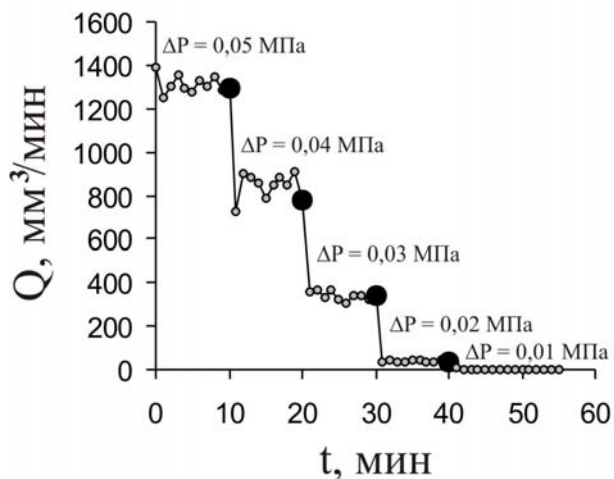


Рис. 7. Зависимость расхода пены в плоской модели пористой среды от градиента давления. Черные кружки показывают моменты понижения давления.

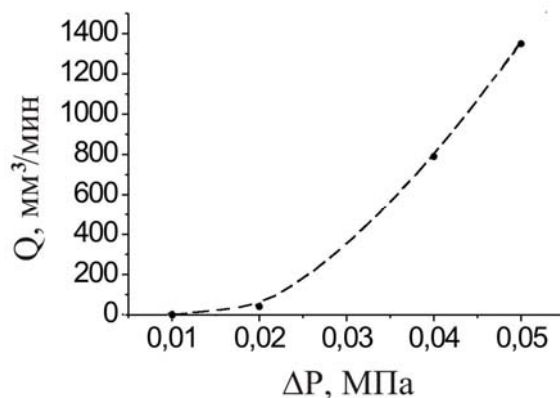


Рис 8. Зависимость расхода «сухой» пены в плоской модели пористой среды от градиента давления. Штриховой линией показан результат расчетов по скейлинговой модели де Жена - Розена.

Изучалось влияние остаточных углеводородов на процесс образования пены. Для этого производилась предварительная прокачка водой насыщенной нефтью пористой среды. Далее осуществлялась последовательная закачка в модель ПР и газа. При вытеснении остаточной нефти ПР в силу низкого поверхностного натяжения на границе «нефть - ПР» происходило дробление нефти на мелкие капли, размер которых на порядок меньше размеров пор. Следующий за ПР газ вытеснял образовавшуюся эмульсию из порового пространства. Вследствие гидрофобности скелета, смоченного нефтью, образования пленок пены не происходило. При последовательной закачке ПР и газа с увеличением числа циклов росло количество пор, в которых происходило образование эмульсии и ее вытеснение газом.

При использовании в качестве ПР 0.5% раствора неонла (неиногенный ПАВ – ПАВ, не образующий в растворе ионов) через 5–10 циклов закачки ПР и газа насыщенность пористой структуры углеводородами значительно снижалась, в результате появлялась возможность образования пленок пены, перегораживающих каналы. Вязкость чистого ПР ниже, чем вязкость образующейся эмульсии, поэтому средняя скорость движения фронта вытеснения воздухом ПР при наличии углеводородов ниже, чем для чистого ПР (рис. 6). При использовании 0.5% раствора сульфонола (ионогенный ПАВ) многократная циклическая закачка (более 20 циклов) в пористую структуру ПР и газа приводит к незначительному образованию пленок пены,

которые мгновенно разрушаются. Эксперимент проводился в течение времени, не превышающего временной масштаб релаксационного блокирования пеной порового пространства.

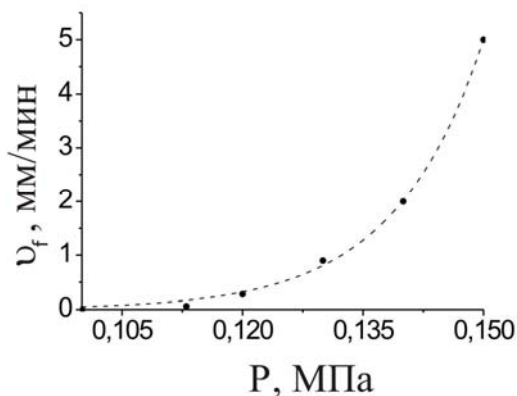


Рис. 9. Зависимость скорости фронта просачивания жидкости в пленки пены от давления на входе модели пористой среды.

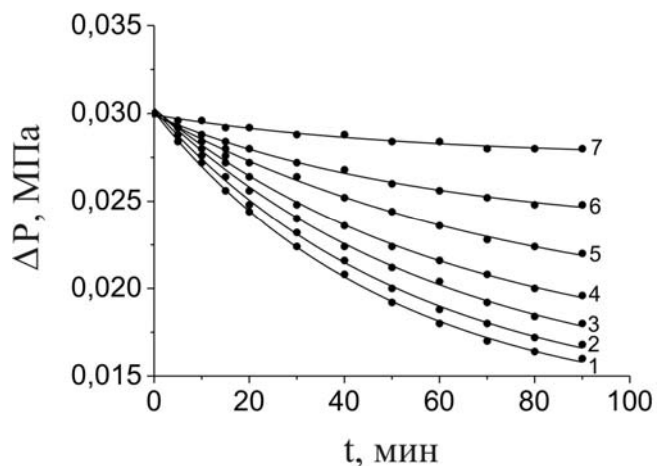


Рис 10. Зависимость перепада давления в керне с пеной от времени при высыхании пены. Числа напротив кривых указывают последовательность их измерения.

Глава 5 охватывает вопросы динамической и физико-химической устойчивости пен в пористой среде при вытеснении пены газом или жидкостью.

Полученная в «блокирующем» режиме течения пена обладает высокой устойчивостью и сохраняет свои свойства в течение длительного времени. Для определения устойчивости пены при закачке жидкости на вход модели пористой среды подавали жидкость (воду или раствор ПАВ) при перепаде давления $\Delta P = 0.01 \text{ МПа}$. Затем перепад давления плавно повышался. Исследования показали, что до определенного значения давления на входе модели $P_{cr}^{(w)}$ пена остается неподвижной. При этом наблюдается медленная фильтрация жидкости со скоростью, равной скорости двухфазной фильтрации при данной малой насыщенности пористой среды жидкостью.

С ростом давления на входе модели до критического давления $P_{cr}^{(w)}$ жидкость просачивается в пленки и пена постепенно разрушается с образованием газожидкостной (пузырьковой) смеси. На основании данных микросъемки и измерения расхода установлено, что для пены, полученной в «блокирующем режиме течения», критическое давление просачивания $P_{cr}^{(w)}$ совпадает с давлением P_r сопротивления начальному сдвигу пленок пены, которое соответствует перепаду давления ΔP создания пены ($\Delta P = P_r - P_{\text{атм}}$). Поэтому при достижении давления P_r происходит сдвиг пены одновременно с ее разрушением.

Рассмотрим качественно процессы, приводящие к просачиванию жидкости в пену при движении пленок пены. При закачке жидкости в пористую среду, насыщенную пеной, формируется граница между жидкостью и пеной, состоящая из газовых пузырьков особого вида (обозначим их буквой S). Со стороны жидкости эти пузырьки ограничены менисками жидкости в поровых каналах, со стороны скелета - смачивающей поры пленкой жидкости, а со стороны пены - ее пленками. Равновесие между мениском жидкости, смачивающей пленкой и пленкой пены определяется равенством давлений в фазах с учетом расклинивающего давления в пленках. Если толщина смачивающей пленки превысит критическое значение, жидкость просачивается в пленки и формируется обычный газовый пузырек. Последовательное просачивание жидкости в пленки приводит к продвижению фронта деструкции пены.

Скорость движения фронта просачивания жидкости нелинейно возрастает с увеличением приложенного перепада давления $v_f \sim (P - P_{cr}^{(w)})^3$ (рис. 9). После достижения фронтом просачивания выхода модели наблюдалась двухфазная фильтрация образовавшейся газожидкостной смеси.

Для технологических приложений большое значение имеют вопросы устойчивости и деградации пены в пористой среде при массопереносе газовых смесей. Механическая устойчивость пены, как показали проведенные эксперименты, достаточно высока: пена сохраняет устойчивость в течение нескольких месяцев. Как показали эксперименты, принципиальной оказывается высокая скорость деградации пены при фильтрации газовых смесей через пленки пены, связанная с уносом паров воды фильтрующимися газами и высыханием пены. Обнаружено, что концентрирование поверхностно-активного вещества в пленках пены вплоть до образования твердых структур, содержащих только связанную воду, приводит к уменьшению газовой проницаемости и далее к прекращению фильтрации газа через образец. Высыхание пены в пористой среде визуально наблюдалось в плоской модели пористой среды. Характерное время высыхания пены и прекращения фильтрации составляло порядка суток.

Для оценки скорости деградации пены в керне были проведены специальные эксперименты. В керне создавалась пена при перепаде давления $\Delta P = 0.05 \text{ МПа}$. Затем на вход насыщенного пеной керна из замкнутого объема, наполненного воздухом при давлении выше атмосферного, подавался воздух. Выход керна оставался при атмосферном давлении, так что в керне создавался перепад давления $\Delta P = 0.03 \text{ МПа}$ и газ начинал протекать через керн с пеной. При этом в течение 90 мин фиксировалась кривая падения давления воздушной смеси в замкнутом объеме. Затем давление воздушной смеси в замкнутом объеме поднималось до начального значения и эксперимент в данной последовательности многократно повторялся. Экспериментальные результаты представлены на (рис. 10). Как видно из рисунка, проницаемость для газа пенных пленок насыщенной пеной

пористой среды при течении воздушной смеси постепенно снижается, причем в течение 7–10 часов достаточно медленно, а затем с возрастающей скоростью. Время полного высыхания пены составляет 1.5–2 суток.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При фильтрации двухфазного флюида в высокопроницаемом пористом образце в течение 10-15 ч нескольких суток происходит монотонное уменьшение проницаемости по жидкости до достижения минимального значения, то есть наблюдается «фильтрационное закиривание». Конечная проницаемость становится меньше начальной в случае воды с остаточным газом в 5 - 10 раз, для воды с остаточным бензином – в 3 - 6 раз.
2. Результат ударно-волнового воздействия на фильтрационный процесс зависит от момента времени его наложения. На ранней стадии течения воды с остаточным воздухом (десятки минут) волновое нагружение приводит к пиковому возрастанию проницаемости в 2 – 3 раза, после чего происходит постепенное блокирование фильтрации. Если в течение длительного времени после нагружения керн не подвергается волновой нагрузке, то его начальная проницаемость восстанавливается. В результате волнового воздействия на «средней» стадии фильтрации (несколько часов) проницаемость керна после каждого нагружения ступенчато уменьшается. После достижения некоторого минимального значения влияние воздействия волн на течение флюида прекращается. Воздействие волн давления на «поздней» стадии фильтрации, после достижения «фильтрационного закиривания», приводит к пиковому возрастанию проницаемости. При многократном воздействии проницаемость растет от удара к удару и может достигнуть своего начального значения.
3. Воздействие волн давления на фильтрацию в керне воды с остаточным бензином проявляется лишь на «поздней» стадии фильтрации. При этом также наблюдается пиковое возрастание проницаемости. От удара к удару среднее значение проницаемости растет, однако достижения начального уровня не наблюдалось.
4. В результате исследования образования и течения пены в пористой среде вытеснением газом пенообразующего раствора установлены связи между структурой пены, ее реологическими и гидродинамическими свойствами. Обнаружено что плотности пен, полученных при различных градиентах давления, отличаются, при этом большему градиенту давления соответствует более высокая плотность пены. С увеличением градиента давления плотность растет монотонно и нелинейно, выходя на предельное значение. Наблюдались два режима нестационарного

течения пен: режим с блокированием фильтрации и пульсационный режим. В режиме блокирования фильтрации происходит генерация новых пленок пены из остаточного пенообразующего раствора, что приводит к торможению пены и блокированию фильтрации. В пульсационном режиме наряду с генерацией новых пленок одновременно происходит разрыв части существующих пленок, что вызывает пульсацию расхода газа.

5. Присутствие в пористой среде остаточной несмачивающей жидкости (нефти) существенно меняет картину пенообразования и движения пены. Поверхность пор становится гидрофобной, что значительно уменьшает способность пенообразующего раствора вспениваться. Для пенообразующего раствора на основе неионогенных ПАВ пена, созданная в присутствии нефти, получается в несколько раз менее плотной. Увеличение насыщенности остаточной нефти приводит к тому, что вспенивание прекращается. В экспериментах с использованием пенообразующего раствора на основе ионогенных ПАВ при наличии остаточной нефти пенообразование не наблюдалось.
6. При вытеснении жидкостью пена остается неподвижной до некоторого критического значения давления P_c на входе модели пористой среды, а давление на выходе модели фиксировано и равно атмосферному. При этом наблюдается медленная фильтрация жидкости со скоростью, равной скорости двухфазной фильтрации при данной малой насыщенности пористой среды жидкостью. При достижении давлением на входе модели значения P_c жидкость начинает проникать в пленки пены и она разрушается, превращаясь в пузырьковую жидкость. Скорость фронта разрушения пены нелинейно (кубически) зависит от давления на входе модели. После достижения фронтом разрушения выхода модели наблюдается двухфазная фильтрация образовавшейся пузырьковой жидкости.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Шнайдер А.В. Влияние волн нагружения на поток жидкости в пористой среде // Вестник ТюмГУ. – 2000. – № 3. – с. 18 – 19.
2. Шнайдер А.В. Эффекты, возникающие при наложении волн давления на фильтрационный процесс / Ахметов А.Т., Губайдуллин А.А., Шнайдер А.В. // Итоги исследований ТФ ИТПМ СО РАН. Под ред. акад. Р.И. Нигматулина и проф. А.А. Губайдуллина. – 2001. – Вып. 8. – с. 6 – 15.
3. Шнайдер А.В. Пенообразование и течение пен в пористой структуре с остаточной нефтью / Ахметов А.Т., Амелькин С.В., Шнайдер А.В., Яценко С.А. // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конференции "Проблемы развития топливно-энергетического комплекса Западной Сибири на современном этапе". – Тюмень, 2001. – С. 42 – 43.

4. Шнайдер А.В. Образование и течение пен в пористой структуре, влияние остаточных углеводородов / Ахметов А.Т., Амелькин С.В., Шнайдер А.В. // Сб. тр. I Всероссийской конф. молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и практика». – Новосибирск, 2001. – CD-ROM. – С. 197–206.
5. Шнайдер А.В. Образование и течение пен в пористой структуре, влияние остаточной нефти / Ахметов А.Т., Амелькин С.В., Шнайдер А.В. // Материалы региональной научно-техн. конф. «Природные и техногенные системы в нефтегазовой отрасли». – Тюмень, 2001. – С. 123-132.
6. Shnaider A.V. Formation and flow of foam in porous structure / Akhmetov A.T., Amel'kin S.V., Shnaider A.V. // Proc. of the Int. Conf. "Recent developments in applied mathematics and mechanics: theory, experiment and practice". Devoted to the 80th anniversary of academician N.N.Yanenko. Novosibirsk, 2001. – CD-ROM. – Vol. 6. – Pt. 2.
7. Шнайдер А.В. Выравнивание фронта вытеснения жидкости газом в присутствии ПАВ / Ахметов А.Т., Амелькин С.В., Шнайдер А.В. // Материалы Всероссийской научно-практ. конф. «Разработка, производство и применение химических реагентов для нефтяной и газовой промышленности». – Москва, 2002. – С. 202–205.
8. Патент РФ № 2236569, 7 Е 21 В 43/22 / Бриллиант Л.С., Козлов А.Н., Яценко С.А., Федоров М.В., Ахметов А.Т., Амелькин С.В., Феклистов В.Н., Шнайдер А.В., 2002.
9. Shnaider A.V. Effects of pressure waves applying on filtration / Akhmetov A.T., Gubaidullin A.A., Shnaider A.V. // Proc. of the ICMAR'2002 (Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk, Russia, 1 – 7 July, 2002.). Ed. by A.M. Kharitonov. – Novosibirsk, Publishing House "Nonparel". – Part I. – P. 8 – 11.
10. Шнайдер А.В. Динамика деструкции пены в пористой среде / Амелькин С.В., Ахметов А.Т., Шнайдер А.В., // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. – 2004. – № 1. – С. 19 – 23.

Благодарности.

Автор благодарит своего научного руководителя д.ф.-м.н. Амира Анваровича Губайдуллина и научного консультанта к.ф.-м.н. Альфира Тимирзяновича Ахметова за постановку задачи и помощь в подготовке работы. Особую благодарность автор выражает Сергею Владимировичу Амелькину за многократные обсуждения предварительных результатов работы, а также к.ф.-м.н. Ивану Николаевичу Санникову за обсуждение работы и техническую помощь при подготовке диссертации. Автор благодарит рабочего мастерской ТФ ИТПМ Омельченко Николая Николаевича за помощь в монтаже экспериментальных установок и своевременное и качественное изготовление деталей и узлов к установкам.