

На правах рукописи



ЗАКИРОВ Тимур Рустамович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВОДНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ
С УЧЕТОМ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ КОЛЛЕКТОРА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор
Никифоров Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Конюхов Владимир Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор
Булгакова Гузель Талгатовна

Ведущая организация: **Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти открытого акционерного общества "Татнефть" имени В.Д.Шашина (г. Бугульма)**

Защита состоится 28 ноября 2013 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при Казанском (Приволжском) федеральном университете, расположенном по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан «26» октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.ф.-м.н., доцент



А.А. Саченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в России существует большое количество месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти. Как правило, подобные залежи характеризуются слабыми фильтрационными характеристиками. При обычном заводнении таких пластов интенсивность отбора нефти низка, а длительность разработки месторождения велика. В таких условиях внедрение различных методов, направленных на интенсификацию добычи нефти, одним из которых является кислотное воздействие на нефтяную залежь, является особенно важным.

Однако кислотное воздействие сопровождается ростом микронеоднородности коллектора, что негативно сказывается на охвате пласта заводнением и может приводить к снижению количества отобранной нефти. Поэтому для конкретных геолого-физических условий залегания нефти требуется проработать параметры методики, по которой будет проводиться кислотная обработка, а также составить прогноз результата воздействия, что возможно осуществить только на основе математического моделирования.

Исходя из этого, создание математических моделей, учитывающей процессы, происходящие при кислотной обработке пластов, и исследования, направленные на повышение эффективности заводнения, являются на сегодняшний день востребованными и актуальными.

Цель работы

Целью настоящей работы является построение математической модели двухфазного трехкомпонентного течения (нефть, вода, кислота) в пористой среде; описание изменения фильтрационно-емкостных свойств пористой среды в результате химической реакции кислоты с породой скелета; создание численных алгоритмов и программ, соответствующих математической

модели; оценка влияния свойств пористой среды и параметров применяемой технологии на основные показатели разработки залежей нефти.

Задачи и методы исследования

Основной задачей диссертации является разработка математической модели заводнения нефтяного пласта с учетом взаимодействия кислоты с пористым телом. При этом

- 1) построены замыкающие соотношения для модели двухфазной фильтрации при кислотном воздействии на нефтяной пласт;
- 2) исследовано влияние кислотного воздействия на пористость и проницаемость пласта при различных параметрах процессов вытеснения.

При построении замыкающих соотношений используется теория Смолуховского и идеальная модель пористой среды в виде «пучка» цилиндрических капилляров различного радиуса.

При описании взаимодействия кислоты с пористым телом используются известные законы кинетики химической реакции.

Научная новизна

Построены новые замыкающие соотношения для математической модели двухфазной фильтрации, учитывающей процесс переноса кислотной компоненты водой. При описании фильтрационно-емкостных характеристик пористой среды использовалась функции распределения пор по размерам и идеальная модель пористой среды в виде «пучка» цилиндрических капилляров различного радиуса. Интенсивность слияния поровых каналов из-за растворения стенок пор описывалась при помощи уравнения Смолуховского. Выведена формула скорости увеличения радиуса капилляра в зависимости от скорости фильтрации, коэффициента диффузии, радиуса капилляра.

Рассмотрены численные примеры по заводнению неоднородных нефтяных пластов с применением кислотной обработки. Показана степень

влияния различных параметров проектирования на эффективность кислотного воздействия, таких как концентрация кислоты, длительность закачки, момент начала нагнетания кислоты, градиент давления между скважинами, интенсивность нагнетания раствора кислоты.

Основные положения, выносимые на защиту

Новые замыкающие соотношения в математической модели двухфазной фильтрации для описания изменения фильтрационно-емкостных свойств пористой среды при растворении породы кислотой.

Выявленные эффекты и особенности кислотной обработки нефтяных пластов с неоднородным полем проницаемости.

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается:

- 1) использованием фундаментальных законов механики сплошной среды и известных уравнений теории фильтрации многофазных систем;
- 2) корректной математической формулировкой решаемых задач, не противоречащей общим гидродинамическим и физико-химическим представлениям;
- 3) использованием численных схем, хорошо зарекомендовавших себя при решении аналогичных задач, и удовлетворительным согласованием результатов численных расчетов с аналитическим решением упрощенной задачи и с экспериментальными результатами других авторов.

Практическая ценность

Разработанная математическая модель заводнения нефтяных пластов с применением кислотного воздействия на нефтяные залежи может быть использована в нефтедобывающих организациях при оценке эффективности применения данной технологии в конкретных пластовых условиях.

Апробация работы

Основные результаты данной диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) IV Молодежная научно-практическая конференция «Математическое моделирование и информационные технологии», г.Казань, 18 мая, 2012;

2) X международная Четаевская конференция «Аналитическая механика, устойчивость и управление», г.Казань, 12-16 июня, 2012;

3) XVI международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR), г.Казань, 19-25 августа, 2012;

4) IX Всероссийская конференция «Сеточные методы для краевых задач и приложения», г.Казань, 17-22 сентября, 2012;

5) VI Всероссийская конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и механики, посвященная памяти академика А.Ф. Сидорова», г.Абрау-Дюрсо, Россия, 10-16 сентября, 2012;

6) Итоговые конференции КазНЦ РАН за 2011 и 2012 гг.

По результатам выполненных исследований опубликовано 9 печатных работ, 4 из которых в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы из 93 наименований, содержит 121 страницу машинописного текста и 64 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность и цель диссертационной работы. Изложены защищаемые положения и результаты, их научная новизна и значение, представлены результаты апробации работы, их достоверность и практическая значимость.

Первая глава посвящена литературному обзору материала по теме диссертации. Задачами математического моделирования процессов интенсификации добычи нефти, исследованием вопросов о взаимодействии кислоты с пористой структурой занимались Федоров К.М., Булгакова Г.Т., Вольнов И.А., Каневская Р.Д., Конюхов В.М., Ентов В.М., Зазовский А.Ф., Крейг Ф.Ф., Мищенко И.С., Путилов М.Ф., а также иностранные исследователи Goflier F., Bazin B, Fogler H., Hoefner M., Berki S., Szymczak P., Fredd C., Cohen H., Rege S., Hekim Y., Kang Q., Sheng J. и другие.

Приводится краткое описание экспериментальных работ, в которых исследуются закономерности взаимодействия кислоты с пористой средой и показано, что при прокачке растворов реагентов через карбонатные керны происходит формирование «червоточин» (каналов, радиусом более одного миллиметра), а проницаемость образцов увеличивается на несколько порядков.

В ряде других работ исследуется кинетика взаимодействия активной примеси с пористым телом при одно- и двухфазных течениях; описывается применение простейших кинетических соотношений и формулы Козени-Кармана для вычисления изменения пористости и проницаемости в результате взаимодействия кислоты с пористой средой.

Отмечается, что основными факторами, влияющими на эффективность кислотного воздействия, являются геолого-физические факторы, включающие в себя толщину пласта, его пористость, проницаемость, количество обрабатываемых пропластков; эксплуатационные факторы, такие как дебиты по нефти и жидкости до обработки, обводненность добываемой продукции, массовая концентрация кислоты и другие. Подбор геолого-физических и эксплуатационных параметров играют важную роль для успешности проводимых мероприятий.

Во **второй главе** данной работы описывается математическая модель процессов, происходящих в пористой среде при заводнении нефтяных пластов с применением кислотной обработки.

Рассматривается двухфазная изотермическая фильтрация несжимаемых несмешивающихся жидкостей в неоднородном недеформируемом пористом пласте. Капиллярные и гравитационные силы не учитываются. Моделируется кислотное воздействие на пласт, при этом считается, что концентрация кислоты мала.

Законы сохранения для двухфазной фильтрации без учета капиллярных и гравитационных сил записаны в виде:

уравнений неразрывности для нефти и воды

$$\frac{\partial(HmS_w)}{\partial t} + \operatorname{div} HU_w = Hq_w, \quad \frac{\partial(HmS_o)}{\partial t} + \operatorname{div} HU_o = 0, \quad (1)$$

уравнения неразрывности для кислоты

$$\frac{\partial(HmS_w C)}{\partial t} + \operatorname{div} HU_c = -Hq_c. \quad (2)$$

Уравнения движения для нефти и воды имеют вид:

$$U_\alpha = -K_\alpha \operatorname{grad} P, \quad (\alpha=o, w) \quad (3)$$

уравнение движения для кислоты

$$U_c = CU_w. \quad (4)$$

В последнем уравнении предполагается, что кислота переносится со скоростью несущей ее фазы – воды.

В уравнениях (1) – (4) H – толщина пласта; $H=2\pi r$ – в цилиндрической системе координат; под индексами « o » и « w » подразумевается нефтяная и водная фазы, U_α – скорость фильтрации фазы α , P – давление в фазах, S_α – насыщенность пористого тела фазой α , $S_o + S_w = 1$, C – концентрация кислоты, m – пористость, q_w – источник водной фазы, возникающей в результате реакции соляной кислоты с карбонатом, q_c – источник, характеризующий уменьшение объема кислоты в результате реакции со скелетом породы.

$K_\alpha = kf_\alpha / \mu_\alpha$ – проводимость фазы α , где k – абсолютная проницаемость, μ_α – динамическая вязкость, f_α – функция относительной фазовой проницаемости.

Для описания свойств порового пространства используется модель пористой среды в виде «пучка» цилиндрических капилляров различных радиусов. Реальной пористой среде ставится в соответствие идеальная пористая среда, при этом предполагается, что и реальная, и идеальная пористые среды характеризуются одной и той же функцией распределения пор по размерам, а при одном и том же перепаде давления обеспечивается одинаковый расход жидкости. Изменение функции распределения пор по размерам элемента пористой среды в результате реакции пористого тела с кислотой подчинено следующему уравнению:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(u_r \varphi) + u_\eta = 0. \quad (5)$$

Это так называемое «уравнение сплошности» в пространстве размеров пор r . Индивидуальность процесса определяется коэффициентами u_r и u_η .

Изменение фильтрационно-емкостных характеристик пласта вычисляется на основе смещения функции распределения пор по размерам при помощи следующих выражений:

$$m = m^0 \int_0^\infty r^2 \varphi dr / \int_0^\infty r^2 \varphi^0 dr, \quad (6)$$

$$k = k^0 \int_0^\infty r^4 \varphi dr / \int_0^\infty r^4 \varphi^0 dr, \quad (7)$$

где k^0, m^0 – начальные значения проницаемости и пористости соответственно; φ^0, φ – начальное и текущее значения функции распределения пор по размерам соответственно.

Объединение поровых каналов описывается с помощью уравнения Смолуховского:

$$u_\eta = \frac{1}{2} \int_0^v \theta(v - v_1, v_1) \varphi(v) \varphi(v_1) dv_1 - \int_0^\infty \theta(v, v_1) \varphi(v) \varphi(v_1) dv_1. \quad (8)$$

Неотрицательную функцию θ называют ядром объединения.

Получена формула скорости увеличения радиуса порового канала, в которую входят скорость фильтрации, радиус капилляра, а также коэффициент диффузии.

В качестве численного метода решения данной задачи использовался конечно-элементный метод и метод контрольных объемов.

В третьей главе рассматриваются различные численные примеры, в которых исследуются результаты применения кислотной обработки нефтяных пластов с площадной и послойной неоднородностью.

В **п.3.1** исследуется изменение фильтрационных параметров нефтяного пласта в результате кислотного воздействия на примере одномерной задачи. Представлены графики функций распределений пор по размерам, изменение пористости и проницаемости на различные моменты времени. Анализируется характер и скорость распространения фронта кислотной компоненты.

В **п.3.2** представлена модель, основанная на применении кинетических соотношений для пористости и соотношения Козени-Кармана для проницаемости. На примере, описанном в **п.3.1**, показано, что можно подобрать коэффициенты кинетических соотношений, что результаты решений, полученные в двух разных моделях, будут очень близки.

В **п.3.3** рассматривается задача о влиянии скорости нагнетания кислотной компоненты в водонасыщенный керновый образец на количество поровых объемов закачанного реагента до его прорыва. Под прорывом понимается увеличение проницаемости образца в сто раз. Показано, что существует оптимальный режим закачки, при котором требуемое количество кислоты до прорыва минимально. Приводится сравнение численного решения с экспериментальным результатом (рисунок 1).

В **п.3.4** решается задача о кислотной обработке двухслойного нефтяного пласта. Проницаемость верхнего пропластка 0.25 мкм^2 , а нижнего 0.05 мкм^2 . Активная примесь закачивается только в слабопроницаемую область.

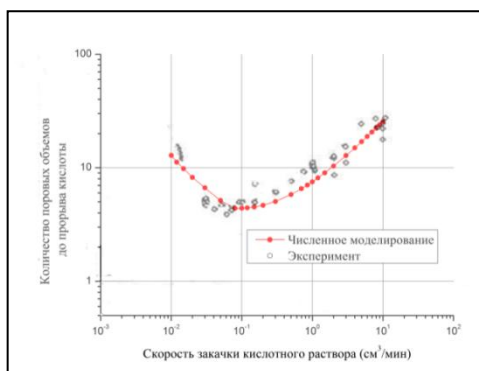


Рисунок 1 – Оптимизация закачки кислотного раствора.

Представлены графики изменения функции распределения пор по размерам (рисунок 2), коэффициента извлечения нефти (КИН), суточной добычи нефти и жидкости, динамики обводнения продукции и полей водонасыщенности, концентрации кислоты, проницаемости и пористости пласта.

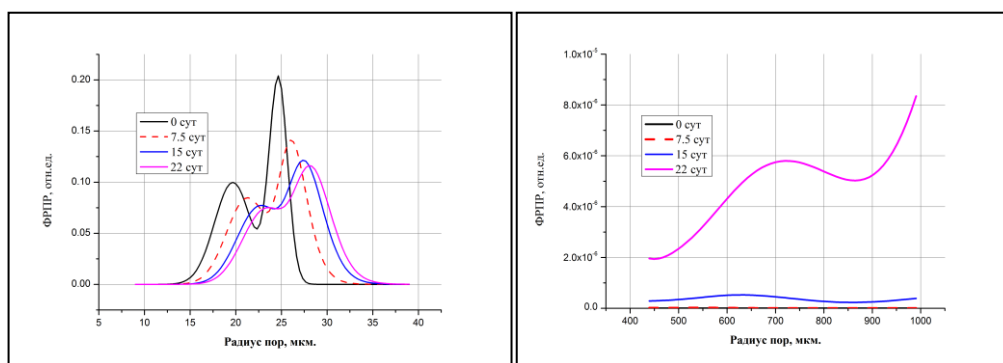


Рисунок 2 – Изменение функция распределения пор по размерам в результате кислотной обработки.

Показано, что в результате проводимых мероприятий, количество отобранной нефти увеличилось на 0.9 %.

В п.3.5 рассматривается влияние различных параметров, таких как длительность закачки, момент начала запуска кислоты, на прирост объема отобранной нефти в результате кислотной обработки для модели пласта, описанного в п.3.4. Показано, что существует оптимальная длительность нагнетания активной примеси, при которой коэффициент извлечения нефти максимален. Также отмечается, что закачка кислоты на поздних стадиях

разработки позволяет увеличить количество отобранной нефти, по сравнению с обработкой пласта на начальном этапе заводнения.

В **п.3.6** исследуется задача о кислотной обработке слоистого нефтяного пласта с одним литологическим окном (отверстием в непроницаемой перемычке), проницаемость которого 400 мкм^2 . Проницаемость верхнего и нижнего пропластков 100 и 400 мкм^2 соответственно. Активная примесь нагнетается только в слабопроницаемую область. Анализируя динамику обводнения продукции, установлено, что продукция обводняется с меньшей скоростью по сравнению с примером, в котором литологическое окно отсутствует (**п.3.4**). Поэтому количество отобранной нефти увеличилось на 1.6% , что на 0.7% больше, чем в **п.3.4**.

Также, в **п.3.6** решается задача о влиянии концентрации реагента в растворе на эффективность обработки. На данном примере показано, что с увеличением концентрации кислоты количество отобранной нефти также возрастает.

В **п.3.7** решается задача о кислотном воздействии на пласт при размещении скважин по девятиточечной схеме. Модель нефтяного пласта имеет площадную неоднородность около скважины, расположенной в правом верхнем углу. Представлены поля распространения насыщенности, концентрации кислоты, а также проницаемости (рисунок 3) и пористости.

Рассматриваются случаи, когда кислотному воздействию подвергаются области вблизи нагнетательной и одной из добывающих скважин как одновременно, так и по отдельности (рисунок 4).

По результатам вычислений сделан вывод, что наиболее эффективным способом является воздействие на зону низкой проводимости около добывающей скважины. Обработка окрестности нагнетательной скважины практически не влияет на конечное количество отобранной нефти. Задача о влиянии градиента давления между добывающей и нагнетательной скважинами на прирост коэффициента извлечения нефти рассматривается в

п.3.8. Область фильтрации представляет собой элемент пятиточечной системы заводнения.

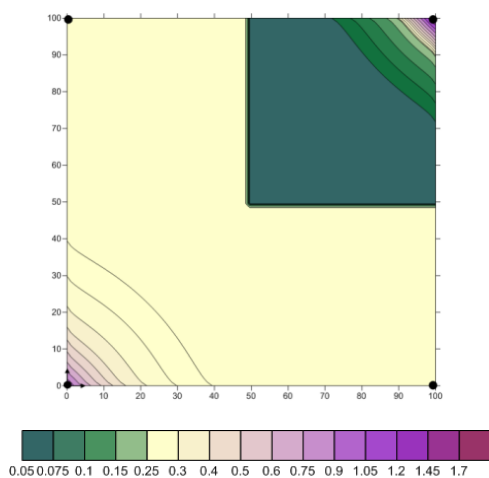


Рисунок 3 – Поле проницаемости после кислотного воздействия.

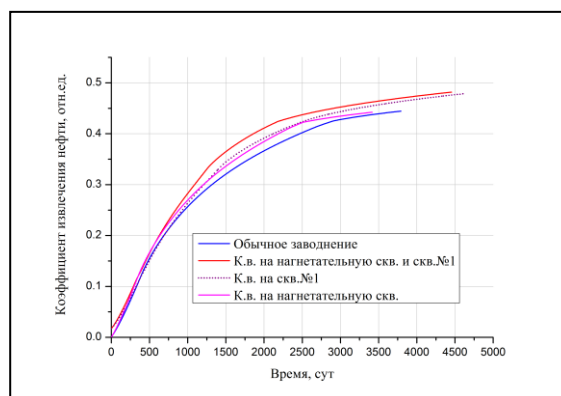


Рисунок 4 – Коэффициент извлечения нефти.

Результаты вычислений показали, что существует оптимальный перепад давления между скважинами, при котором количество отобранной нефти максимально (рисунок 5).

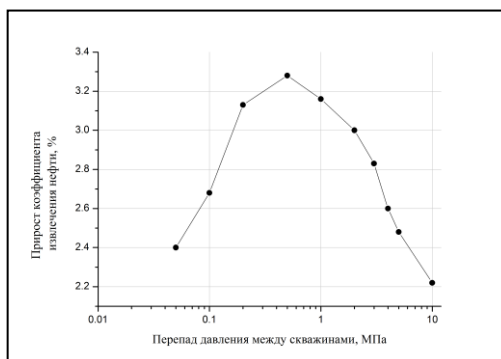


Рисунок 5 – Прирост коэффициента извлечения нефти в зависимости от перепада давления между скважинами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Построены замыкающие соотношения для математической модели двухфазной фильтрации, учитывающей процесс переноса водой кислотной компоненты. При описании свойств пористой среды использовалась модель в виде «пучка» цилиндрических капилляров различного радиуса, а изменение фильтрационных характеристик пористой среды вычислялось на основе

изменения функции распределения пор по размерам. Интенсивность слияния поровых каналов из-за растворения стенок пор описывалась при помощи уравнения Смолуховского. Выведена формула скорости увеличения радиуса капилляра в зависимости от его радиуса, скорости фильтрации, коэффициента диффузии.

Показано, что увеличение коэффициента извлечения нефти от мероприятий достигается за счет интенсификации добычи нефти. Это значит, что положительный эффект от кислотного воздействия проявляется в том случае, когда варианты разработки залежи обычным заводнением и с применением кислоты сравниваются при достижении скважинами одинакового предельного конечного дебита по нефти.

Отмечается, что важную роль при кислотном воздействии на пласт играет подборка режимов фильтрации, таких как перепад давления между добывающими и нагнетательными скважинами (между входной и выходной границей образца), а также время начала и длительность закачки раствора кислоты и ее концентрация в растворе. На численных примерах показано, что за счет подбора концентрации кислоты в растворе возможно увеличить количество отобранной нефти до 6 раз; за счет длительности нагнетания можно получить как увеличение коэффициента извлечения нефти, так и его уменьшение; подбор момента начала запуска кислотной оторочки позволяет увеличить количество отобранной нефти с 0.8 до 3%.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. *Закиров, Т.Р.* Моделирование кислотного воздействия на нефтяные пласты при заводнении / Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров // Нефтяное хозяйство. – 2012. – №6. – С.62-65.
2. *Закиров, Т.Р.* Кислотное воздействие на многослойные нефтяные пласты / Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров // Вычислительные методы и программирование. – 2013. – Том 14. – С. 50-57.

3. *Закиров, Т.Р.* Моделирование кислотного воздействия на прискважинную зону нефтяного пласта при заводнении / Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров // Математическое моделирование. – 2013. – Том 25 – №2 – С.54-63.

4. *Закиров, Т.Р.* Влияние режимов фильтрации на эффективность кислотного воздействия на нефтяные пласты / Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров // Нефтепромышленное дело. – 2013. – №8 – С.21-26.

В прочих изданиях:

5. *Закиров, Т.Р.* Моделирование процессов заводнения нефтяного пласта с применением кислотной обработки / Т.Р.Закиров // «Аналитическая механика, устойчивость и управление». Труды X международной Четаевской конференции, том 1, аналитическая механика, Казань, 12-16 июня. – 2012. – С.183-192.

6. *Закиров, Т.Р.* Решение задачи о кислотной обработке нефтяного пласта с применением метода контрольных объемов / Т.Р.Закиров // IX Всероссийская конференция «Сеточные методы для краевых задач и приложения», Казань, 17-22 сентября. – 2012. – С.152-158.

7. *Закиров, Т.Р.* О моделировании кислотного воздействия на нефтяной пласт при заводнении с учетом объединения поровых каналов / Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров // 4-ая Молодежная научно-практическая конференция "Математическое моделирование и информационные технологии", Казань, 18 мая. – 2012. – С.31-32.

8. *Zakirov, T.R.* Simulation of oil reservoir flooding using acid impact on near-well area / T.R.Zakirov // XVI ICMAR - 16TH International conference on the methods of aerophysical research, Kazan, August 19-25. – 2012. – P.262.

9. *Закиров, Т.Р.* Моделирование течения раствора кислоты через насыщенную пористую среду / Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров // VI Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвященная памяти ак. А.Ф. Сидорова. Абрау-Дюрсо, 10-16 сентября. – 2012. – С.27.