

## РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

© М.Т.Абасов, Г.И.Джалаев, 2008

### ВОПРОСЫ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ

**М.Т.Абасов, Г.И.Джалаев**

*Институт геологии НАН Азербайджана  
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

В статье дан реферативный обзор результатов некоторых научных исследований в области подземной гидрогазодинамики, проводимых известной научной школой в области разработки месторождений нефти и газа – учёными бывшего Института Проблем Глубинных Нефтегазовых Месторождений НАНА, ныне работающими в Институте Геологии.

В 2003 году Институты Геологии и Проблем глубинных нефтегазовых месторождений (ИПГНГМ НАНА) были объединены в Институт Геологии. К этому времени в ИПГНГМ уже существовала признанная в бывшем СССР и мире научная школа в области разработки месторождений нефти и газа, а сам ИПГНГМ был головным Институтом в этой области в системе АН СССР.\*

Научные исследования в области разработки месторождений нефти и газа охватывали следующие направления: нефтепромысловая геология и геофизика; физикохимия и термодинамика пласта; подземная гидрогазодинамика; методы повышения нефтеотдачи пласта; принципы и методы проектирования и совершенствования разработки месторождений нефти и газа; отраслевая экономика и другие связанные с ними проблемы и вопросы. Создателем и руководителем этой школы является академик НАН Азербайджана, член-корреспондент РАН М.Т.Абасов.

В настоящей статье реферативно излагаются некоторые результаты исследований лишь в области подземной нефтегазовой гидрогазодинамики, выполненных учёными этой школы. Они излагаются по направлениям и надо подчеркнуть, что каждое исследование в свое время имело большое значение. Ссылка-

ми указаны авторы публикаций. Активными членами этой школы в рассматриваемой области были Абасов М.Т., Азизов Х.Ф., Азимова С.С., Азимов Э.Х., Алекперов С.И. Бабанлы В.Ю., Гаджиев М.А., Гасанов Ф.Г., Джалаев Г.И., Джалилов К.Н., Джрафаров Н.Д., Ибрагимов А.М., Ибрагимов Т.М., Караева Н.Т., Керимов З.А., Кулиев А.М., Кулиева З.Б., Мамедов О.А., Мамедов А.М., Мамиев В.С., Оруджалиев Ф.Г., Расулов М.А., Рустамов Я.Р., Фейзулаев Х.А., Шихалиев М.И., Эфендиев Р.М., Юнусов Я.Г. и др.

Приведенные ниже результаты получены развитием отдельных исследований выдающихся советских и зарубежных ученых в этой области: Л.С.Лейбензона, М.Маскета, Миллионщика М.Д., Христиановича С.А., И.А.Чарного, В.Н.Щелкачева, Б.Б.Лапука, Е.М.Минского, М.Д.Розенберга и др. Некоторые же из рассмотренных вопросов были впервые сформулированы и решены представителями нашей научной школы.

**I.** Впервые в мире дифференциальные уравнения бинарной модели фильтрации газоконденсатной смеси с полным учетом реальных свойств и взаиморастворимости фаз независимо друг от друга были предложены Абасовым М.Т. с учениками в Баку и Князевым В. и Невиллом С. во Франции [14, 34].

Они позволили создать гидрогазодинамические научные основы разработки газоконденсатных месторождений и предложить комплекс гидрогазодинамических методов оп-

\* Единственный Институт в системе АН Азерб.ССР, который был головным в АН СССР за весь советский период республики

ределения технологических показателей разработки газоконденсатных месторождений [34]. При этом:

- было предложено уравнение притока газоконденсатной смеси к скважине в однородном и неоднородном по коллекторским свойствам пласте, позволяющее прогнозировать изменение дебита газоконденсатных скважин и показателей процесса истощения газоконденсатных залежей во времени;

- было установлено влияние на процесс истощения газоконденсатной залежи наличия и количества связанной воды, состава пластовой углеводородной системы, характера зависимости относительных фазовых проницаемостей от насыщенности, изменения свойств флюидов с падением пластового давления, депрессии на пласт, несоответствия начально-го пластового давления давлению начала конденсации, неравенства средневзвешенных и контурных давлений и насыщенностей, неравномерности размещения скважин и неоднородности пластов по коллекторским свойствам в пластах различных форм;

- были решены задачи и исследован процесс вытеснения газоконденсатной смеси водой при различных проявлениях водонапорного режима; предложена методика определения показателей разработки газоконденсатных залежей на водонапорном режиме, учитывающая фильтрацию газоконденсатной смеси, неполноту вытеснения ее водой, изменение фильтрационных сопротивлений для воды в области внедрения, возможную неравномерность размещения скважин, неоднородность пластов по коллекторским свойствам, форму залежей;

- были сформулированы принципы нового подхода к вопросам схематизации залежей по форме, и даны газогидродинамические методы прогнозирования технологических показателей при различных системах размещения скважин;

- на основе бинарной модели фильтрации газоконденсатной смеси и специальных термодинамических исследований был разработан приближенный подход и алгоритм расчета процесса извлечения конденсата из призабойной зоны скважины путем его испарения закачанным «сухим» углеводородным газом. При этом, естественно, был исследован про-

цесс и установлены закономерности накопления ретроградного конденсата и распределения давления в призабойной зоне скважины. На примере конкретного объекта расчетами была показана высокая технологическая эффективность данного процесса даже на завершающем этапе разработки конкретного газоконденсатного месторождения [3,4];

- с учетом многокомпонентности, фазовых превращений и идентификации относительных фазовых проницаемостей по данным изменений фактических показателей эксплуатации скважин была создана новая методика определения технологических показателей разработки газоконденсатных залежей в естественных режимах при различных методах воздействия на залежь и на призабойную зону скважин [3,19];

- были даны газогидродинамические расчетные формулы проектирования разработки газоконденсатнонефтяных и газонефтяных месторождений при различных методах их эксплуатации при естественных режимах, а также при законтурной закачке воды, барьерном заводнении и обратной закачке «сухого» газа в газоконденсатную область залежи [34];

- были предложены эффективные разностные схемы, в том числе с повышенным порядком точности, для решения газогидродинамических задач разработки газоконденсатных залежей. На их основе были даны оценки приближенным решением;

- были также созданы расчетные методы повышения компонентоотдачи газоконденсатного пласта на базе модели трехфазной фильтрации бинарной углеводородной смеси, основанные на эффекте испарения низкомолекулярных компонентов ретроградного конденсата при вытеснении газоконденсатной смеси водой [19];

- был проведен комплекс исследований по газо- и конденсатоотдаче газоконденсатных залежей, позволивший установить влияние различных природных и технологических факторов на степень извлечения газа и конденсата;

- были выписаны модели течения газоконденсатной смеси в трещиноватых и трещиновато-пористых пластах и исследован широкий круг вопросов в области разработки газоконденсатных залежей в трещиноватых коллекторах [24];

- были проведены исследования в области повышения конденсатоотдачи пластов;
- была создана первая автоматизированная система проектирования разработки газоконденсатных месторождений на газовом режиме;
- был исследован процесс фильтрации летучей нефти и был проведен широкий круг газогидродинамических исследований в области разработки месторождений летучих нефтей;
- был разработан комплекс методов прогнозирования технологических показателей разработки газоконденсатнонефтяных залежей в различных условиях их залегания и эксплуатации;
- были установлены условия особого учета многокомпонентности газоконденсатных систем;
- были проведены работы по построению гидрогазодинамических моделей газоконденсатных залежей и их адаптации к эксплуатационным данным [25].

Основные научные положения данного направления и разработанные расчетные схемы нашли широкое применение в практике проектирования разработки газоконденсатных и газоконденсатнонефтяных месторождений Азербайджана, Туркмении и других стран, а также в решениях различных государственных комиссий и Научного Совета АН СССР.

**II.** Были усовершенствованы гидродинамические расчетные методы разработки нефтяных месторождений при режимах растворенного газа и вытеснения газированной нефти водой при смешанных режимах их разработки с учетом неравенства контурных и средних значений пластовых давлений и насыщенностей. При этом были разработаны методы определения фиктивной вязкости нефти для расчетов вытеснения газированной нефти водой. Были исследованы случаи учета неоднородности пластов по проницаемости, а также их многопластовость [32,33].

Разработанные методы нашли применение при составлении различных документов по разработке таких морских месторождений нефти и газа Азербайджана, как Грязевая Сопка, Южная, Нефтяные камни и др.

**III.** Были созданы новые и эффективные гидродинамические методы изучения фильтрационных процессов в многопластовых месторождениях нефти и газа, залегаю-

щих на больших глубинах, на морских акваториях и других сложных природных условиях (аномально высокие пластовые давления, высокая производительность скважин, высокие устьевые давления и т.д.)

Сформулированы и решены гидрогазодинамические задачи регулирования разработки многопластовых месторождений нефти и газа при различных режимах и методах их эксплуатации. На основе двух моделей многопластового месторождения, предусматривающих изолированность и неизолированность слагающих его пластов, были разработаны методы гидрогазодинамических расчетов по установлению во времени режимов эксплуатации или заводнения, обеспечивающих регулируемое дренажирование отдельных пластов. Полученные решения позволяли реализовать различные принципы регулирования разработки подобных месторождений нефти и газа, способствующие повышению нефтегазоотдачи по отдельным пластам и в целом по месторождению [30]:

- впервые были предложены приближенные методы гидрогазодинамических расчетов по установлению условий регулируемого дренажирования и технологических показателей разработки отдельных взаимосвязанных нефтяных и газовых пластов при различных проявлениях водонапорного режима. При этом, например, было установлено существенное влияние межпластовых перетоков на условия равноскоростной выработки и срок разработки многопластового месторождения. Было показано, что возможности реализации условий равноскоростной выработки взаимосвязанных пластов могут быть ограничены технологическими и природными факторами.

- была разработана методика установления закона распределения заданного отбора нефти и газа между пластами, обеспечивающего необходимый темп выработки отдельных нефтяных и газовых пластов многопластового месторождения с регулируемым обводнением слагающих пластов в условиях вытеснения газированной нефти и газа водой при упруго-водонапорном режиме. Установлена особенность динамики отбора нефти и газа из отдельных пластов при различных фильтрационных и емкостных их параметрах.

- была предложена методика установления режимов нагнетания воды для отдельных

пластов, которые обеспечивают нужную скорость перемещения водонефтяного контакта по разрезу многопластового месторождения, состоящего из изолированных пластов с различными коллекторскими свойствами. С учетом наличия в пластах системы скважин, а также неполноты вытеснения нефти водой были получены расчетные формулы для определения во времени условий регулирования при вытеснении водой несжимаемой и газированной нефти.

- была решена задача о притоке жидкости к скважине в слоисто-неоднородном пласте при условии одновременно-раздельной эксплуатации пластов. По полученным формулам расчетным путем исследовано возможное увеличение дебита нефти слоисто-неоднородных пластов при их одновременно-раздельной эксплуатации.

- были сформулированы и исследованы различные гидродинамические задачи регулирования перемещения контура нефтеносности и обводнения скважин в неоднородных по проницаемости (однопластовых и многопластовых) месторождениях при наличии многорядных батарей скважин в условиях одностороннего и двухстороннего питания. Разработаны расчетные модели по установлению во времени режимов эксплуатации или заводнения, обеспечивающие регулируемое дренирование отдельных пластов. В частности, рассмотрены случаи совместной и одновременно-раздельной эксплуатации пластов скважинами при обеспечивании равноскоростных перемещений водо-нефтяной границы в отдельных пластах либо в условиях соблюдения одновременности прорыва воды к скважинам по всем пластам, либо в условиях одинакового процента обводненности скважин. При исследовании этих вопросов предполагалось, что месторождения состоят из изолированных друг от друга или имеющих связи через гидравлические окна зонально-неоднородных пластов в условиях одностороннего, двухстороннего или площадочного заводнения. Были предложены расчетные формулы распределения давлений и зависимости, обеспечивающие регулируемую разработку многопластового месторождения; были произведены расчеты и установлено влияние основных факторов на изучаемые процессы [13].

В точной наиболее общей постановке и точными методами был решен целый ряд актуальных задач подземной гидродинамики о нестационарной фильтрации флюида к скважине (смоделированной как точечный сток или как скважина конечного радиуса с учетом скин-фактора и без), вскрывшей два или более бесконечных пластов с разными (а в частном случае и равными) начальными пластовыми давлениями. Получены удобные для вычисления расчетные формулы для определения локальных дебитов (доля индивидуальных пластов в общем заданном дебите скважины) и распределения давления пласта, позволившие качественно и количественно исследовать различные аспекты определения параметров многопластовых месторождений [7,10,36].

Были получены точные аналитические решения задач о притоке жидкости к центральной скважине, моделирующейся точечным источником и вскрывшей совместно два изолированных пласта с заданным давлением на контуре или же непроницаемой внешней границей.

На базе полученных решений в широком диапазоне изменения исходных параметров, а именно: отношений гидро- и пьезопроводности пластов и разности начальных пластовых давлений, была проведена серия вычислительных экспериментов для гипотетических залежей, что послужило основой для осуществления эффективного качественного и количественного анализа процесса фильтрации в многопластовых залежах применительно к задачам определения параметров как залежи целом, так и слагающих пластов, а также для оценки точности существующих в литературе приближенных подходов к решению задач фильтрации в различных условиях. Задачи эти были решены при помощи разработанных авторами новых оригинальных приемов.

Был решен ряд прямых задач подземной гидродинамики по определению показателей разработки многопластовых нефтяных месторождений со слабопроницаемой перемычкой, разрабатываемых системой скважин в строгой и приближенной постановке [38].

**IV.** Были развиты теоретические основы и методы интерпретации результатов гидрогазодинамических исследований скважин [8]:

- впервые было установлено и количественно оценено существенное (сопоставимое с

влиянием изменения давления) влияние неизотермичности процесса фильтрации и обусловленного им изменения физических свойств флюида и коллектора на характер стационарного и нестационарного течения к скважине;

- были аналитически обоснованы и практически подтверждены для нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин, вскрывших различные типы залежей, наиболее вероятные формы индикаторных линий, определяющих начальную и текущую продуктивность скважин;

- была создана с учетом всей совокупности влияющих факторов универсальная методика интерпретации результатов гидрогазодинамических исследований скважин при установленныхся режимах, позволяющая обрабатывать, по существу, все встречающиеся на практике виды индикаторных линий с целью определения интегральных характеристик и качества вскрытия пласта;

- было изучено изменение вязкости, объемного коэффициента нефти, проницаемости и работающей мощности пласта от давления и температуры и исследовано их влияние на процесс стационарного притока нефти к скважине при различных законах и условиях фильтрации, а также на форму индикаторных кривых;

- была разработана общая методика обработки данных исследования нефтяных скважин, позволяющая по характеру изменения коэффициента продуктивности скважин от депрессии более надежно и достоверно определять фильтрационные параметры пласта и коэффициенты, характеризующие влияние изменения физических свойств нефти и коллектора от давления и температуры, а также инерционных сил. Независимо от типа коллектора (трещиноватый или пористый) и условий фильтрации (газированная или однофазная нефть) дана общая классификация известных на практике форм индикаторных кривых.

Были разработаны новые способы определения давления насыщения нефти газом. Так, например, один из них, выполненный на уровне изобретения, был основан на данных промысловых исследований скважин.

Была предложена методика совместного использования результатов гидротермодинамических и геофизических исследований скважин. Суть предлагаемой методики заключа-

чалась в определении гидродинамических параметров с учетом изменяющейся в процессе разработки термобарической обстановки в пласте, при этом решались задачи послойного определения фильтрационных и продуктивных характеристик многопластовых залежей нефти; определялись средние значения проницаемости залежи в условиях ограниченного объема проведенных гидродинамических исследований; устанавливались зависимости между обводненностью скважин и средней текущей водонасыщенностью пласта при неравномерном вытеснении нефти водой по разрезу; прогнозировались возможные дебиты скважин, бурящихся для доразработки зон с остаточным нефтенасыщением [5].

Была разработана новая методика интерпретации кривых восстановления давления (КВД) нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин, позволяющая по данным кратковременной их остановки, с учетом и без учета переменного притока к забою скважины определять, по существу, все фильтрационные и геометрические характеристики терригенного пласта, такие как: коэффициент продуктивности скважин, гидропроводность (газопроводность) пласта, комплексные параметры  $\alpha/r_c^2$ ,  $\alpha/r_k^2$ ,  $gk/r_c$  ( $\alpha$ - пьезопроводность пласта;  $r_k$  и  $r_c$  – соответственно приведенный радиус скважины и радиус контура питания), а также значение пластового давления, соответствующего времени полного восстановления. При известных значениях мощности и упругоемкости пласта можно было еще определять пьезопроводность пласта, радиус контура питания и приведенный радиус скважины [8]:

- была разработана методика интерпретации КВД скважин, вскрывших трещиновато-пористые коллекторы нефти и газа, позволяющая впервые определять все фильтрационные параметры - как системы трещин, так и пористых блоков в отдельности, а также оценивать параметр, характеризующий интенсивность перетока нефти и газа между ними. Была исследована теоретическая форма КВД скважин, вскрывших трещиновато-пористые коллекторы, и показано, что они должны иметь три четко выраженных участка: начальный прямолинейный, переходный и конечный прямолинейный, что подтверждается фактическими данными промысловых иссле-

дований. Установлено, что по начальному и конечному прямолинейным участкам фактических КВД скважин легко можно определять гидропроводность и параметр  $\alpha/r_c^2$  соответственно системы трещин и пористых блоков. По переходному участку можно оценивать параметр, характеризующий интенсивность перетока нефти между системой трещин и пористыми блоками.

Как известно, в случае многопластовых месторождений возможность получения надежной и достоверной информации о фильтрационно-емкостных свойствах продуктивных пластов по данным гидродинамических исследований скважин существенно ограничивается. Наряду с технологическими трудностями, вызвано это, в частности, и тем, что вследствие взаимодействия совместно разрабатываемых пластов (не только взаимосвязанных, но и изолированных тоже) сильно осложняется математическое описание процесса фильтрации в этих коллекторах. Происходит это из-за необходимости более полного, комплексного учета всей совокупности природных и технологических факторов (изменение физических свойств флюида и коллектора в зависимости от давления, двухфазность потока, различные виды неоднородности коллектора и др.), присущих указанным месторождениям. Как следствие, значительно затрудняется решение соответствующих обратных задач подземной гидродинамики. Использование при их решении системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных наталкивается на такие труднопреодолимые препятствия как некорректность постановки задач в классическом смысле, неустойчивость получаемых решений, нелинейность-отсутствие принципа суперпозиции и др.

В связи с изложенным, постановка проблемы совершенствования теоретических основ нестационарной фильтрации флюида в многослойных пластах с целью создания новых математических моделей, более адекватно описывающих реальные процессы притока пластовых флюидов к скважинам, и разработка единой методологической основы были весьма актуальны.

В рамках решения этой проблемы:

- был выполнен комплекс исследований процесса фильтрации в многопластовых за-

лежах, включающий получение класса точных аналитических и эффективных полуаналитических решений соответствующих гидродинамических задач, позволяющих моделировать указанный процесс, определять средние параметры системы в целом и находить индивидуальные параметры пластов [36];

- на основе вариационного подхода к решению соответствующей обратной задачи была разработана методика дифференцированного и достаточно точного определения фильтрационно-емкостных параметров изолированных пластов N-пластовой системы. При этом дифференцированную идентификацию параметров удалось произвести без использования данных о локальных дебитах, как это делается во многих случаях, а лишь на основе данных о суммарном дебите.

На основе вышеизложенного был создан программный пакет **MEAPLAST** (совместно с компанией ЮНОКАЛ). Пакет программ **MEAPLAST** позволяет:

- моделировать фильтрационные процессы в многопластовых системах, состоящих из N изолированных пластов с получением динамики забойного давления, изменения дебитов из каждого пласта во времени, распределения давления в каждом пласте;
- определять средние параметры системы (гидропроводность, скин-фактор) с использованием известных для однопластовых систем методик;
- определять индивидуальные параметры для каждого пласта системы на основе разработанной вариационной методики.

Необходимость повышения качества и достоверности гидродинамических расчетов по проектированию, анализу и регулированию разработки месторождений нефти и газа требует использования гидродинамической информации, накопленной в ходе нормальной эксплуатации месторождений нефти и газа.

Это стимулирует поиск нетрадиционных подходов к рассматриваемому вопросу, одним из которых является использование вариационного метода решения обратных задач. Суть его заключается в сведении задачи идентификации к минимизации некоторого функционала, являющегося критерием качества и выражющего квадратичное отклонение фактических данных от расчетных.

На основе полного учета изменения всего комплекса физических свойств флюидов и коллектора в зависимости от снижения давления и сопутствующих ему процессов, а также учета неоднородности по проницаемости пластов была разработана общая методика идентификации математических моделей гранулярных, трещиноватых и трещиновато-пористых пластов при двумерной фильтрации однофазных и многофазных флюидов путем сведения их к одной из трех предложенных в работе вариационных постановок. Исследованы вопросы наилучшего выбора вида вариационной постановки в зависимости от исходных данных и конкретных условий задач. Используя для решения краевых задач в отдельных постановках аналитические, приближенно-аналитические методы и в общем случае метод конечных разностей, разработаны расчетные схемы и комплекс программ, позволяющие автоматизировать процесс идентификации параметров математических моделей и решать широкий класс прямых и обратных задач для системы нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа, описывающих фильтрационные процессы в гранулярных, трещиноватых и трещиновато-пористых пластах, выполнять исследования по адаптации гидродинамических моделей залежей по информации об их истории.

Разработанный подход позволяет также автоматизировать процесс адаптации либо выполнять его интерактивно. Следует отметить, что этот метод может быть реализован при использовании любого из имеющихся пакетов программ определения технологических показателей разработки месторождений нефти и газа.

Сформулирована и решена обратная задача неустановившейся фильтрации реальных нефтей и газов в деформируемых трещиновато-пористых коллекторах, позволяющая впервые определять все фильтрационные параметры как системы трещин, так и пористых блоков в отдельности, а также оценивать параметр, характеризующий интенсивность перетока нефти и газа между системой трещин и пористыми блоками [38].

Были предложены новые методы определения фильтрационных параметров трещиноватых пластов по данным газодинамического исследования газовых скважин на уста-

новившихся режимах в условиях высоких давлений. Обработка результатов исследований газовых скважин различных месторождений позволила установить влияние изменения реальных свойств газа и коллектора, а также инерционных сил на характер изменения коэффициента продуктивности и на определяемые значения фильтрационных параметров трещиноватых пластов [8].

Был выполнен широкий круг математических экспериментов на электроинтеграторе, связанных с моделированием фильтрационных течений в среде со случайным распределением проницаемости [38].

**V.** Было проведено большое число исследований и получен ряд точных решений по вопросам взаимодействия и обводнения скважин, перемещения контура нефтеносности с учетом разнодебитности скважин, неоднородности по проницаемости и наклона пласта, формы начального контура нефтеносности, расположения эксплуатационных и нагнетательных скважин и т.д. [39].

Путем упрощения полученных решений были предложены достаточно простые расчетные формулы по определению процента воды в дебитах различным образом расположенных скважин при жестком и упруго-водонапорном режимах пласта, а также контурной, внутренеконтурной и площадной систем заводнения нефтяных месторождений.

Была предложена расчетная схема для определения положения контура нефтеносности и процента обводнения скважин в условиях течения газированной жидкости в пласте при наличии законтурной водяной области.

Определено поле давлений, изучены движение водонефтяного контакта и процесс обводнения скважин в условиях искривленных пластов различных форм.

Было проведено гидродинамическое исследование процессов форсированного отбора жидкости из залежи, находящейся на поздней стадии разработки, в условиях жесткого и упруго-водонапорного режимов с учетом многочисленных физико-геологических факторов.

Были решены задачи по оптимальному размещению скважин прямолинейных и круговых батарей для обеспечения минимального срока разработки с учетом водного периода их работы.

Были исследованы вопросы перемещения контура нефтеносности и обводнения скважин в условиях многорядных систем. При этом были учтены двухфазность потока и неоднородность по проницаемости вдоль площади и мощности залежей при различных системах размещения скважин.

Предложенные расчетные схемы были использованы при проектировании и анализе разработки конкретных месторождений Азербайджана.

**VI.** Были предложены газогидродинамические методы расчета **разработки** многослойных газовых месторождений с учетом взаимодействия скважин, различного вида связи между пластами, изменения реальных свойств коллекторов и насыщающих их газов при газовом и водонапорном режимах [30].

Используя линеаризованное уравнение фильтрации газа с учетом реальных свойств, получено решение задач о нестационарном движении газа к системе скважин в неоднородных по проницаемости пластах при газовом режиме. Исследована фильтрация газа к системе скважин в многопластовых месторождениях, пласти которых изолированы друг от друга или связаны через литологические окна и неоднородны по площади.

Получены формулы для распределения забойных и контурных давлений, доли дебита скважин из каждого пласта.

Была предложена расчетная схема для случая вытеснения реального и идеального газа водой к системе скважин в зонально-неоднородном по проницаемости пласте. Получены формулы для определения перемещения контура газоносности во времени, переменного давления на этом контуре, а также забойных давлений скважин [30].

Было рассмотрено вытеснение жирного газа «сухим» с учетом его реальных свойств к системе скважин в неоднородном пласте при различных вязкостях газов.

Предложено эффективное уравнение неустановившейся фильтрации реального газа в условиях высоких пластовых давлений и больших рабочих депрессий. При этом была изучена связь между функцией Лейбензона и давлением в широком диапазоне изменения давлений.

Был исследован процесс вытеснения лёгкой нефти водой при жестко- и упруговодо-

напорном режимах и установлено влияние различных природных и технологических факторов на его основные показатели.

Были разработаны и рекомендованы для практического использования новые уравнения притока реального газа к скважине и методы интерпретации результатов газодинамических исследований газовых скважин при различных законах и режимах фильтрации.

Было установлено, что пренебрежение изменениями параметров реального газа от давления по сравнению с их учетом при интерпретации результатов данных исследования скважин приводит к существенному занижению исключительной величины коэффициента проницаемости пористого пласта и дебита скважин.

**VII.** Были исследованы особенности фильтрации жидкости к системе совершенных и несовершенных скважин в кусочно-однородных пластах, состоящих из участков (фрагментов) с разными проницаемостями. Неоднородный пласт определенной геометрической формы разбивался ортогональной сеткой прямых на разные участки с разными проницаемостями [38]. Для таких условий модели были сформулированы краевые задачи о нахождении поля давлений. Эти модели неоднородных пластов отличаются своей простотой и общностью. На основе полученных приближенных зависимостей между дебитами и давлениями на скважинах была предложена методика определения пластовых давлений и гидропроводностей неоднородных пластов с учетом интерференции скважин, которая использовалась при обработке данных гидродинамических исследований скважин для определения пластовых давлений и гидропроводности на месторождении Грязевая Сопка.

**VIII.** Был разработан эффективный метод, позволяющий решать большой класс пространственных задач фильтрации в неоднородной среде с достаточно высокой степенью точности. Были предложены расчетные приемы и выведены формулы притока к несовершенной скважине и к скважине с заиленным фильтром в однородном и слоисто-однородном пластах; установлено влияние неpronицаемой перегородки и гидравлического разрыва на производительность скважин в однородном и неоднородном по проницаемости пластах, интерференции скважин при этих условиях и др. [21,38].

Были разработаны методы решения задач пространственной фильтрации однородной жидкости к системе несовершенных вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин в кусочно-однородных средах, состоящих из любого числа зон и слоев с различными проницаемостями. Предполагая наличие различного вида связи (пласты изолированы, имеют сплошные связи или связаны через гидравлические окна и слабо проницаемые перемычки) между пластами (пропластками) многопластового месторождения, было получено замкнутое аналитическое решение задач о распределении поля давления.

Были предложены расчетные формулы для определения процесса обводнения скважин в многопластовых месторождениях, состоящих из изолированных пластов, а также для случая, когда между пластами имеются гидравлические окна [12].

**IX.** Были исследованы вопросы фильтрации жидкости в глубокозалегающих трещиноватых коллекторах с учетом изменения физических параметров флюида и коллектора от давления. С этой целью использовались линеаризованные дифференциальные уравнения и были получены аналитические решения многих задач с учетом влияния несовершенства и взаимодействия скважин, неоднородности и геометрии пласта, нестационарности процесса. Был изучен также процесс перемещения водонефтяного контакта и обводнения скважин с учетом различия вязкости нефти и воды в условиях водонапорного режима.

Эти же исследования легко обобщаются для случаев, когда залежи вдоль площади и мощности состоят из зон с различными проницаемостями.

Впервые аналитическими методами исследовалось нестационарное движение газов с учетом их реальных свойств в неоднородных трещиноватых породах при произвольном расположении скважин.

Принимая, что проницаемость блоков во много раз меньше проницаемости трещин, а пористость трещин во много раз меньше, чем у блоков, рассмотрено движение газа к системе скважин в трещиновато-пористом пласте. Получены формулы для распределения давления и забойных давлений.

Был выполнен комплекс исследований

по изучению особенностей движения границы нефть-вода и обводнения скважин в пластах с трещиноватыми коллекторами и установлено влияние на них изменения физических параметров флюидов и среды с изменением давления [38,17].

**X.** Был проведен комплекс теоретических исследований по прямым и обратным задачам неравновесной фильтрации однородных флюидов с целью изучения влияния релаксационных эффектов на динамику разработки пласта [22,23,42]. При этом:

- была установлена неадекватность используемых в литературе математических постановок ряда задач линейной релаксационной фильтрации, имеющих важное значение как для экспресс-оценки влияния релаксационных эффектов на показатели разработки, так и для определения параметров пласта;

- даны адекватные постановки этих задач. При этом задачи релаксационной фильтрации были сформулированы не для одного дифференциального уравнения высокого порядка по времени, а для исходной замкнутой системы уравнений относительно нескольких неизвестных величин либо для интегро-дифференциального уравнения первого порядка по времени.

Таким образом, были решены конкретные задачи для следующих моделей релаксационной фильтрации:

- модели фильтрации вязко-упругой жидкости в упругой пористой среде при релаксации давления и скорости фильтрации;

- модели фильтрации упругой жидкости по закону Дарси в релаксационно-сжимаемых и ползучих пористых средах;

- модели фильтрации идеального газа в ползучих пористых средах.

Были получены также точные решения задачи о пуске скважины с заданным дебитом в первоначально невозмущенном бесконечном пласте для моделей фильтрации вязкоупругой жидкости в упругом пласте и фильтрации упругой жидкости по закону Дарси в релаксационно-сжимаемом пласте.

С помощью этих решений расчетным путем были даны оценки точности одного известного в литературе графоаналитического метода определения параметров пласта, основанного на асимптотических представлениях

точных решений при малых и больших значениях времени.

Были получены формулы, позволяющие определять фильтрационные и релаксационные параметры пласта для моделей фильтрации вязко-упругой жидкости в упругом пласте и фильтрации упругой жидкости по закону Дарси в релаксационном-сжимаемом пласте по данным восстановления забойных давлений. С этой целью для указанных моделей релаксационной фильтрации была решена задача об остановке скважины, работающей до остановки с постоянным дебитом в открытом круговом пласте, и получены соотношения между детерминированными моментами давления любого порядка в любой точке пласта и неизвестными параметрами пласта.

Для рассмотренных моделей релаксационной фильтрации было изучено также влияние релаксационных эффектов на динамику пластового и забойного давлений, на изменение пористости в релаксационно-сжимаемом и ползучем пластах. Показано, что при моделировании, проектировании и анализе разработки ползучих пластов необходимо учитывать также влияние деформации пласта на его проницаемость. Показано также, что пренебрежение релаксационными эффектами может привести к существенным погрешностям при определении фильтрационных параметров пласта.

Был разработан пакет программ для автоматизированного расчетного определения фильтрационных и релаксационных параметров пласта по данным нестационарных исследований скважин. Пакет программ апробирован также по конкретным данным исследования скважин месторождений Нефт Дашилары, Сангачалы-дениз – Дуванный-дениз – Хара-Зира асады, Гум-дениз, и исследован вопрос о требованиях к конкретным данным нестационарных исследований скважин, повышающих надежность определения параметров пласта по рассмотренным расчетным формулам.

**XI.** При составлении технологических схем и проектов, а также анализе разработки нефтяных залежей с применением тепловых методов воздействия на пластины обычно наряду с другими расчетами проводятся и различные расчеты для изучения особенностей аккумулирования тепла в различных продуктивных пластах, количественной оценки ее

ухода из этих пластов во внутренние и внешние непродуктивные горизонты и эффективности термозаводнения в сложных гидродинамических условиях. Очевидно, что установление этих важных характеристик возможно на основе надежных расчетных схем определения температурных полей в нефтяных залежах, учитывающих реальные пластовые условия. В связи с этим был проведен комплекс исследований с целью математического моделирования тепловых процессов в одно- и многопластовых, многослойных нефтяных залежах различных форм в условиях термического воздействия на пласт [11,37]. При этом:

- была сформулирована математическая модель и разработана методика расчета температурных полей, позволяющие в последующем решать задачи двухфазной неизотермической фильтрации жидкости к системе скважин в условиях однопластовой и многопластовой систем;

- на базе проведенных исследований была предложена обобщенная упрощенная аналитическая схема расчета для прогнозирования температурной обстановки в многослойных и многопластовых месторождениях при термозаводнении;

- на основе предложенной расчетной схемы распределения температур в залежи было дано приближенное аналитическое решение задачи вытеснения нефти к системе скважин горячей водой в многопластовых залежах при совместной эксплуатации пластов;

- был проведен сопоставительный анализ при широком диапазоне изменения исходных физических и геологических данных результатов расчетов, выполненных аналитическим и существующим численным методами и установлена граница применимости предложенных упрощенных решений.

Указанные выше результаты нашли отражение в комплексных работах, награжденных Государственной премией Азербайджана, премией им.академика И.М.Губкина, неоднократно наградами ВДНХ СССР, а также были приняты как важнейшие научные результаты АН СССР и НАН Азербайджана.

Естественно, что будущие исследования в области подземной нефтяной гидрогазодинамики во многом будут связаны и с более глубокими комплексными и системными ис-

следованиями физико-химических явлений, происходящих именно в процессе разработки месторождений нефти и газа; умением более объективно строить гидродинамические модели залежей, способствующие совершенствованию новых методов и технологий их разработки. Большое значение будет иметь развитие численных методов решения задач подземной гидрогазодинамики.

Большой вклад в науку в области подземной гидрогазодинамики в Азербайджане помимо указанных выше представителей нашей научной школы внесли: Аббасов А.А., Азимов Б.А., Аметов И.М., Гусейнов Г.П., Мирзаджанзаде А.Х., Насруллаев И.А., Пирвердиев А.М., Салаватов Т.Ш. и др.

В бывшем СССР, а в последующем в странах СНГ исследования в области подземной гидрогазодинамики развивались усиленными темпами. На наш взгляд, следовало бы отметить следующих ученых, внесших большой вклад в эту науку: Абуталиев Ф.Б., Абуталиев Э.Б., Алиев З.С., Алишаев М.Г., Баренблatt Г.И., Борисов Ю.П., Бузинов С.Н., Вахитов Г.Г., Веригин Н.Н., Горбунов А.Т., Гусейзаде М.А., Данилов В.Л., Ентов В.М., Желтов Ю.П., Закиров С.Н., Коротаев Ю.П., Курбанов А.К., Молокович Ю.М., Николаевский В.Н., Полубаринова-Кочина П.Я., Пудовкин М.А., Салехов Г.С., Соколовский Э.В., Тумашев Г.Г., Хасанов М.М., Хейн А.Д., Чекалик Э.Б., Швидлер М.И. и др.

## ЛИТЕРАТУРА

1. АБАСОВ, М.Т. 1966. Вопросы гидродинамических исследований разработки газонефтяных и газоконденсатных месторождений. В: Материалы годичного общего собрания АН Азербайджана, 108-132.
2. АБАСОВ, М.Т. 1968. Гидродинамические исследования разработки газонефтяных и газоконденсатных месторождений. Теория и практика добычи нефти (ежегодник). Недра. Москва. 68-82.
3. АБАСОВ, М.Т., АББАСОВ, З.Я., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., ФЕЙЗУЛЛАЕВ, Х.А., РЗАЕВА, В.Г. 1999. Моделирование процесса извлечения конденсата из призабойной зоны скважины «сухим» углеводородным газом. Известия НАНА. Науки о земле, 2, 3-10.
4. АБАСОВ, М.Т., АББАСОВ, З.Я., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., ФЕЙЗУЛЛАЕВ, Х.А., РЗАЕВА, В.Г., ГАСАНОВ, Ф.Г. 1963. К расчетам разработки газоконденсатно-нефтяных месторождений. АНХ, 10, 21-23.
5. АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., БУРЯКОВСКИЙ, Л.А. и др. 1986. Геолого-геофизические и гидродинамические методы изучения многопластовых месторождений нефти и газа в сложных горно-геологических условиях. *Изв.АН Аз.ССР, серия наук о Земле*, 5, 3-13.
6. АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., ИБРАГИМОВ, Т.М. 1991. Об одном решении коэффициентной обратной задачи при нестационарной фильтрации нефти и газа в пласте. *Докл.АН СССР*, 318, 3, 566-569.
7. АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., ИБРАГИМОВ, Т.М., САЛМАНОВА, С.С. 1991. Аналитическое исследование взаимодействия изолированных пластов в условиях их совместной разработки. *Докл.АН СССР*, 321, 5, 925-928.
8. АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., КУЛИЕВ, А.М. 1993. Гидродинамические исследования скважин глубокозалегающих месторождений. Азербайджансское государственное издательство. Баку. 176.
9. АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., САЛМАНОВА, С.С. 1982. О решении задач фильтрации нефти в трещиновато-пористых коллекторах. *Изв.АН Аз.ССР, сер. наук о Земле*, 3, 43-49.
10. АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., САЛМАНОВА, С.С. 1985. О нестационарной фильтрации нефти к скважине в бесконечных изолированных пластах. *Докл.АН Аз.ССР*, 41, 7, 48-51.
11. АБАСОВ, М.Т., АСЛАНОВ, М.С., ДЖАЛИЛОВ, К.Н., ДЖАФАРОВ, Н.Д. 1995. Температурное поле в многопластовых месторождениях при термозаводнении. *Изв.АН Азербайджана. Науки о Земле*, 1-3, 16-22.
12. АБАСОВ, М.Т., ГАДЖИЕВ, М.А., ДЖАЛИЛОВ, К.Н. и др. 1980. Вопросы обводнения скважин в многопластовых месторождениях. Элм. Баку. 160 с.
13. АБАСОВ, М.Т., ГАДЖИЕВ, М.А., ДЖАЛАЛОВ, Г.И. и др. 1982. Вопросы подземной гидродинамики. *Изв.АН Аз.ССР, сер.наук о Земле*, 6, 56-62.
14. АБАСОВ, М.Т., ГАСАНОВ, Ф.Г. 1963. К расчетам разработки газоконденсатно-нефтяных месторождений. АНХ, 10, 21-23.
15. АБАСОВ, М.Т., ДЖАВАНШИР, Р.Д., ИМАНОВ, А.А., ДЖАЛАЛОВ, Г.И. 1997. О влиянии пластового давления на изменение фильтрационно емкостных свойств пород-коллекторов в процессе разработки месторождений нефти и газа. *Геология нефти и газа*, 5, 34-39.
16. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., ДЖАЛИЛОВ, К.Н. 1989. Моделирование и исследование фильтрационных процессов в деформируемых средах В: *Нефтегазонность больших глубин и грязевой вулканализм* (Тезисы I Всесоюзного совещания-семинара, октябрь 1989 г.), Баку, 126-129.
17. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., ДЖАЛИЛОВ, К.Н. и др. 1988. Гидрогазодинамика трещиноватых коллекторов. Элм. Баку. 291.
18. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., ИБРАГИМОВ, Т.М., МАМЕДОВ, А.М., ФЕЙЗУЛЛАЕВ, Х.А. 2002. Численное исследование задачи о притоке газокон-

- денсатной смеси к несовершенной по степени вскрытия скважине в однородно-анизотропном по проницаемости пласте. *Изв. НАНА. Науки о Земле*, 3, 7-9.
19. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., КУЛИЕВ, Г.Ф., ФЕЙЗУЛЛАЕВ, Х.А. 2004. Идентификация функций относительных фазовых проницаемостей при фильтрации газоконденсатной смеси. *Изв. НАНА. Науки о Земле*, 2, 78-81.
  20. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛАЛОВ, Г.И., МАМЕДОВ, А.М. 1988. О методах нестационарных задач фильтрации жидкости в трещиновато - пористых коллекторах. *Изв. АН Аз. ССР. Науки о Земле*, 2, 22-34.
  21. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛИЛОВ, К.Н. 1960. Вопросы подземной гидродинамики и разработки нефтяных и газовых месторождений. Азернефтнешр. Баку. 255.
  22. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛИЛОВ, К.Н., КЕРИМОВ, З.А., МИРЗОЕВА, Д.Р. 2000 а. Об определении параметров релаксационно-сжимаемого пласта. *Изв. АН. Науки о Земле*, 2, 39-45.
  23. АБАСОВ, М.Т., ДЖАЛИЛОВ, К.Н., КЕРИМОВ, З.А., МИРЗОЕВА, Д.Р. 2000 б. О фильтрации жидкости в релаксационно-сжимаемом и ползучем пластах при релаксации скорости и давления. *Известия АН. Науки о Земле*, 2, 25-38.
  24. АБАСОВ, М.Т., ДЖАМАЛБЕКОВ, М.А., ОРУДЖАЛИЕВ, Ф.Г. 1984. Особенности истощения газоконденсатных залежей в трещиноватых коллекторах. *Изв. АН Аз. ССР, сер.наук о Земле*, 1, 3-8.
  25. АБАСОВ, М.Т., ДЖАМАЛБЕКОВ, М.А., ОРУДЖАЛИЕВ, Ф.Г. 1983. Фильтрация газоконденсатной смеси в трещиноватых коллекторах. *Изв. АН Аз. ССР, сер.наук о Земле*, 5, 3-8.
  26. АБАСОВ, М.Т., ИБРАГИМОВ, Т.М., МАМИЕВ, В.С., ДЖАЛАЛОВ, Г.И. 2000. Об адаптации гидродинамических моделей углеводородных залежей по данным истории их разработки. В Трудах математического центра имени Н.И.Лобачевского, том 7: *Краевые задачи аэрогидромеханики и их приложения*. (Материалы международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Г.Г.Тумашева, Казань, 21-24 ноября 2000г.) ДАС. Казань. 22-27.
  27. АБАСОВ, М.Т., ИМАНОВ, А.А., ДЖАЛАЛОВ, Г.И. 2006. Деформация глубокозалегающих природных резервуаров залежей нефти и газа при разработке. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 3-4, ВНИОЭНГ, Москва, 62-66.
  28. АБАСОВ, М.Т., ИМАНОВ, А.А., ДЖАЛАЛОВ, Г.И. 2004. Многофакторная оценка деформационных процессов в коллекторах по результатам экспериментальных исследований керна. В материалах международной конференции 24-26 ноября 2004г.: *Фундаментальные проблемы разработки нефтегазовых месторождений, добычи и транспортировки углеводородного сырья*. Москва. 156-157.
  29. АБАСОВ, М.Т., КЕРИМОВ, З.А., МИРЗОЕВА, Д.Р., КАЗЫМОВА, Т.Ш. 2006. Об определении параметров ползучего и релаксационно-сжимаемого пластов по данным гидродинамических исследований скважин. *Изв. НАНА. Науки о Земле*, 1, 59-64.
  30. АБАСОВ, М.Т., КУЛИЕВ, А.М. 1976. Методы гидрогазодинамических расчетов разработки многопластовых месторождений нефти и газа. Элм. Баку. 204.
  31. АБАСОВ, М.Т., КУЛИЕВ, А.М., АЗИМОВ, Э.Х. 1976. Определение параметров трещиноватого газового пласта по данным наблюдения нестационарной фильтрации в нем реального газа. *Изв. АН Аз. ССР, сер.наук о Земле*, 2, 52-59.
  32. АБАСОВ, М.Т., МАМЕДОВ, О.А. 1963. О расчетах фильтрации газированной нефти. *Докл.АН Азерб.ССР*, 19, 3, 19-22.
  33. АБАСОВ, М.Т., МАМЕДОВ, О.А. 1963. Начальная фаза прямолинейного движения нефти в пласте при режиме растворенного газа. *Докл.АН Азерб.ССР*, 19, 8, 15-19.
  34. АБАСОВ М.Т., ОРУДЖАЛИЕВ Ф.Г. 1989. Газогидродинамика и разработка газоконденсатных месторождений. Недра. Москва. 262.
  35. АБАСОВ, М.Т., ПАЛАТНИК, Г.Г., ЗАКИРОВ, И.С. 1990. Идентификация функций относительных фазовых проницаемостей при двухфазной фильтрации. *Докл. АН СССР. Геология*, 4, 312.
  36. АНАЛИЗ ДАННЫХ исследования скважин многопластовых залежей с совместно разрабатываемыми изолированными пластами. 1996. Отчет по проекту ИПГНГМ НАН Азербайджана. ЮНОКАЛ, США.
  37. АСЛАНОВ, М.С. 1998. Разработка методов расчета температурных полей и вытеснения нефти горячей водой в многопластовых залежах: Дисс. канд.физ.-мат.наук. Баку. 124.
  38. ДЖАЛАЛОВ, Г.И. 1990. Гидрогазодинамика разработки нефтяных и газовых залежей в деформируемых коллекторах. Дисс.док.тех.наук. Баку. 502.
  39. ДЖАЛИЛОВ, К.Н. 1974. Вопросы перемещения контура нефтеносности и обводнения скважин. Элм. Баку. 286.
  40. ДЖАЛИЛОВ, К.Н., ДЖАФАРОВ, Н.Д., АСЛАНОВ, М.С. 1995. Эффективный способ определения температурного поля при термозаводнении. *Изв. АН Азербайджана, сер.наук о Земле*, 1-3, 10-15.
  41. ДЖАФАРОВ, Н.Д. 1992. Математическое моделирование фильтрационных процессов в неоднородных коллекторах месторождений нефти и газа. Дисс. док. тех.наук. Баку. 52.
  42. МИРЗОЕВА, Д.Р. 2002. Гидродинамические методы исследования процессов релаксационной фильтрации. Дисс.канд.тех.наук. Баку. 157.
  43. АБАСОВ, М.Т., АББАСОВ, З.Я., JALALOV, G.I., FEYZULLAYEV, KH.A., HAMIDOV, N.N. 2003. Problems of gas condensate wells productivity increase at the late stage of fields development. World Gas Congress, Tokyo, Japan.