

# ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СИСТЕМАХ

В.М. Фаталиев

Институт геологии Национальной Академии наук Азербайджана

Известно, что пластовая вода как составная часть насыщающих пористую среду флюидов принимает активное участие в процессах, протекающих при разработке углеводородных залежей [1, 2]. Большой интерес представляет фазовое поведение газоконденсатных систем в присутствии пластовой воды.

Оценку влияния воды на пластовые процессы проводят экспериментально в ходе исследования в pVT бомбе или модели пласта. При этом возникает вопрос, насколько существенны различия в результатах этих исследований. Также важно установить основные закономерности, которые можно переносить на процессы в реальной газоконденсатной залежи. Целью данной работы является попытка ответить на эти и сопутствующие вопросы на базе собственных экспериментальных исследований автора, проводимых как в pVT бомбе, так и в модели пласта.

## Результаты экспериментов в pVT бомбе

В периодической литературе широко освещены характерные особенности фазового поведения газоконденсатных смесей в зависимости от давления, температуры и состава. Изучено их влияние на величину давления начала конденсации, динамику выпадения ретроградного конденсата [1, 3, 4, 5]. Эксперименты проводились в pVT бомбе или похожем на нее сосуде без наличия пористой среды.

Влияние указанных факторов на компонентоотдачу обводненной газоконденсатной системы изучено автором на установке УГК-3 по известной методике дифференциальной конденсации. В экспериментах использованы пробы пластового газа следующего состава (в мол. %): метан – 93,5; этан – 4,21; пропан – 1,24; бутаны: изо – 0,38, норм. – 0,27; сумма: пентанов – 0,14, гексанов – 0,04; углекислый газ – 0,22. Проба пластового газа смешивалась с конденсатом плотностью 745,7 кг/м<sup>3</sup> из скважины № 46 (глубокозалегающей газоконденсатной залежи VII горизонта месторождения Булладениз). При этом конденсатосодержание системы и температура во всех экспериментах принимались постоянными – 150 г/м<sup>3</sup> и 80 °С, соответственно.

Давление начала конденсации безводной системы составляло 25,2 МПа. При наличии воды данную величину оценить не удалось из-за невозможности наблюдения начала конденсации через смотровое окно в случае постоянного присутствия жидкой фазы. Поэтому начальное давление в pVT установке, учитывая ее технические возможности, задавалось с запасом на уровне 30,0 МПа. В процессе эксперимента давление в системе снижалось до 6,0 МПа с шагом около 5,0 МПа. Пошагово определялись количество, состав и физические свойства добытого газа и конденсата. Исследования проведены как для безводной системы, так и при добавлении в смесь 10, 20, 30 и 40% воды. Результаты pVT исследований приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, рост содержания воды в системе приводит к уменьшению количества добываемого конденсата при увеличении объема газа в пределах заданного шага по давлению.

Таблица 1

Сведения о количестве добытого газа и конденсата из бомбы pVT  
на различных этапах снижения давления

| № | Вода,<br>% | Давление в интервалах, МПа    |  |                               |  |                               |  |                               |  |
|---|------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--|
|   |            | 30-24                         |  | 24-18                         |  | 18-12                         |  | 12-6                          |  |
|   |            | газ,<br>$10^{-3} \text{ м}^3$ | конден-<br>сат,<br>$10^{-6} \text{ м}^3$ |
| 1 | 0          | 19,0                          | 2,5                                      | 25,5                          | 3,0                                      | 29,2                          | 1,6                                      | 29,6                          | 0,5                                      |
| 2 | 10         | 24,3                          | 1,9                                      | 36,3                          | 2,6                                      | 39,4                          | 1,8                                      | 41,1                          | 0,3                                      |
| 3 | 20         | 26,5                          | 1,9                                      | 38,6                          | 2,6                                      | 39,3                          | 1,4                                      | 41,7                          | 0,3                                      |
| 4 | 30         | 27,5                          | 1,7                                      | 39,2                          | 2,4                                      | 40,8                          | 1,4                                      | 42,0                          | 0,3                                      |
| 5 | 40         | 28,6                          | 1,6                                      | 39,6                          | 2,2                                      | 42,3                          | 1,4                                      | 42,6                          | 0,3                                      |

На рис. 1 синей линией с ромбами показан график зависимости конечного коэффициента конденсатоотдачи от содержания воды для процесса дифференциальной конденсации в pVT бомбе.

Как видно из рис. 1, рост количества воды в газоконденсатной системе приводит к снижению конечного коэффициента конденсатоотдачи, но зависимость носит нелинейный характер. Так, наиболее интенсивное снижение конденсатоотдачи имеет место с ростом содержания воды при ее доле в смеси до 10% и составляет 3% абс. С дальнейшим ростом

содержания воды до 40% коэффициент конденсатоотдачи снижается практически линейно примерно на 4% абс.

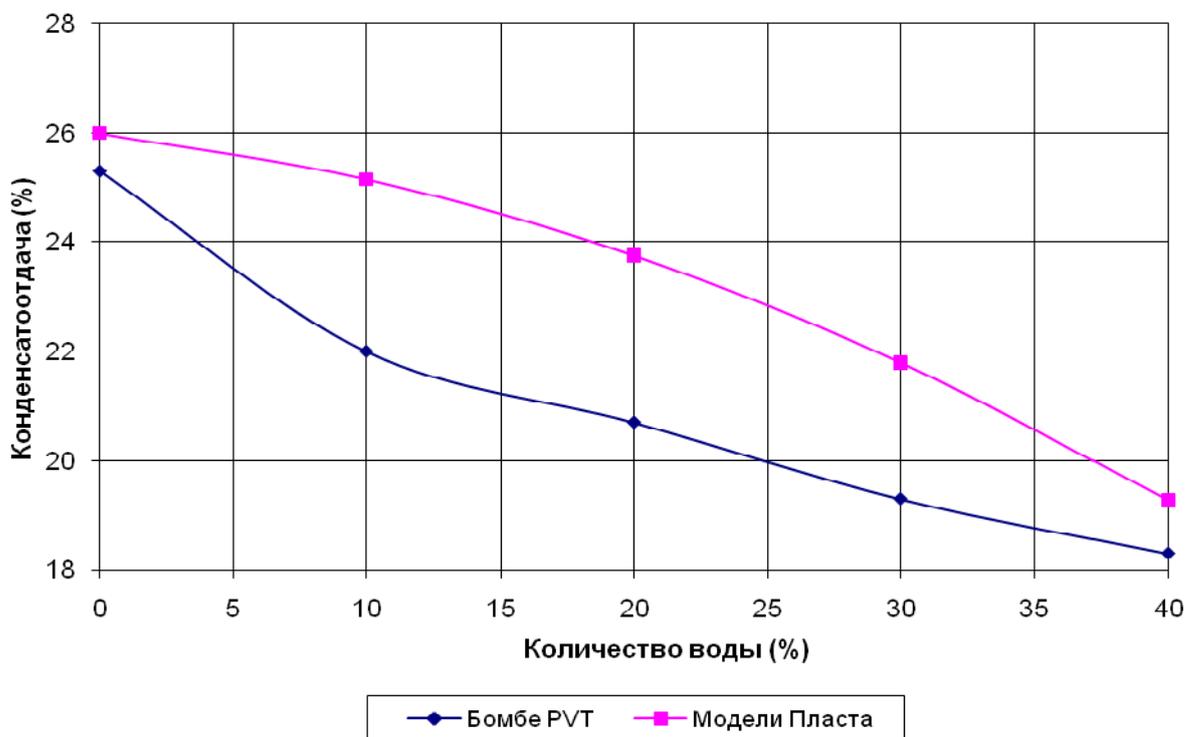


Рис. 1. Зависимости конечного коэффициента конденсатоотдачи от содержания воды в газоконденсатной системе

На рис. 2 представлена зависимость конденсатосодержания добываемого газа от давления (пошагово) при процессе дифференциальной конденсации для случаев начальной доли воды в системе от 0 до 40%.

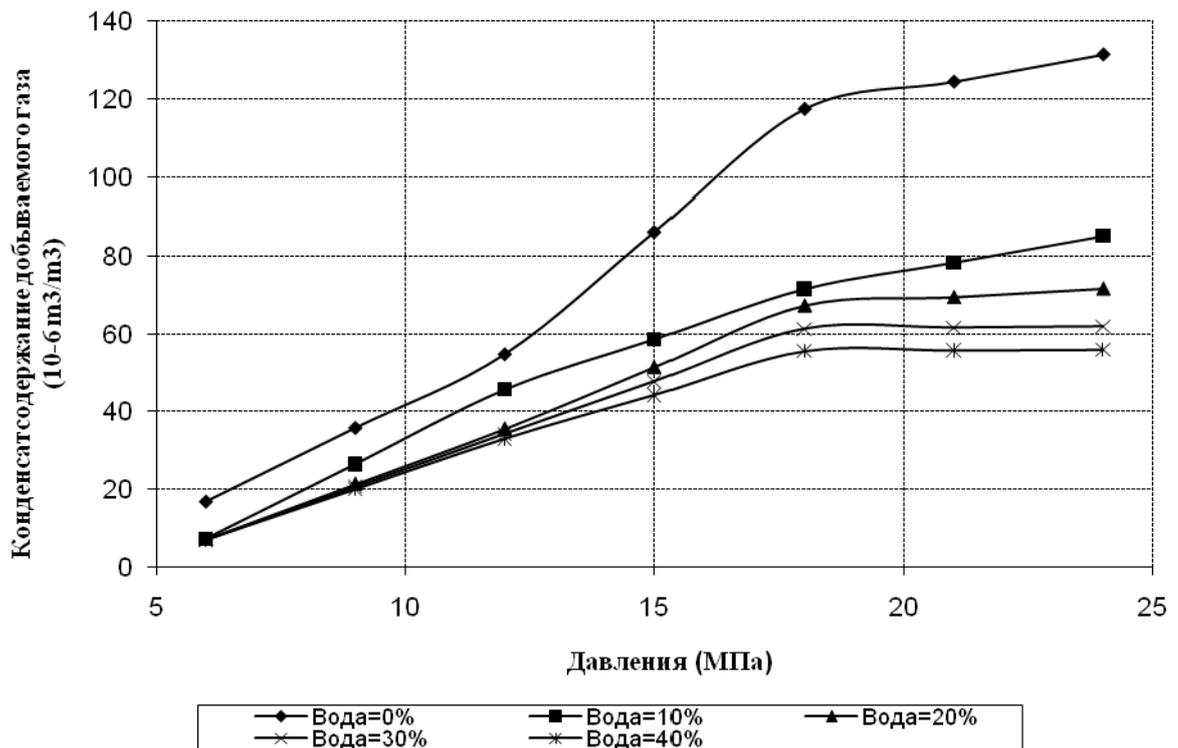


Рис. 2. Зависимости конденсатосодержания добываемого газа от давления при дифференциальной конденсации в pVT бомбе для различной доли воды в начальной смеси

Как и в случае, показанном на рис. 1, наибольшее влияние воды на динамику конденсатосодержания имеет место при ее доле в смеси до 10% (рис. 2). При дальнейшем росте содержания воды его влияние на выход конденсата ослабевает и постепенно стабилизируется. После достижения давления 10,0 МПа конденсатосодержание добываемого газа в экспериментах с различной долей воды отличается незначительно.

### Результаты экспериментов в модели пласта

Вторая серия экспериментов проводилась на пластовой модели, заполненной кварцевым песком. Пористость регулировалась изменением содержания различных фракций с диаметром песчинок 0,15–0,40 мм. Факторы, влияющие на конденсатоотдачу залежей, и диапазон их изменения определялись, исходя из практики разработки месторождений. Рассматривались следующие значения параметров: температура пласта – 70, 80, 90, 100 и 110 °С; пористость – 0,1912; 0,2431; 0,2903; 0,3455 и 0,4012; водонасыщенность – 0, 10, 20, 30, 40%; плотность конденсата - 727,42; 737,91; 749,08; 760,52 и 771,26 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, исследовано влияние на конденсатоотдачу четырех

параметров с пятью значениями каждого. Применение методики планирования экспериментов с использованием комбинационных квадратов [6] позволило снизить необходимое число экспериментов с 625 до 25.

В качестве модели пластовой воды, во избежание воздействия ее химического состава на показатели процесса, использована питьевая вода. Требуемая водонасыщенность создавалась за счет насыщения модели пласта водой и дальнейшего ее вытеснения азотом.

Геометрические размеры модели пласта определялись по [3, 7] с использованием термодинамических критериев подобия. Длина ее составляла 0,85 м, площадь поперечного сечения –  $4,415 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Модель насыщалась газоконденсатной смесью при конденсатосодержании  $150 \text{ г/м}^3$ . Процесс дифференциальной конденсации изучался в интервале давления 30,0–6,0 МПа с величиной шага его снижения около 5,0 МПа. Полученные данные обрабатывались по приведенной в [6] методике. В результате получена регрессионная зависимость, связывающая коэффициент конденсатоотдачи с пористостью, обводненностью, температурой и плотностью стабильного конденсата:

$$\text{КИК} = 0,3t - 7,9 (19,124m - 2,627)^{-1} - 0,28 (0,1\varphi + 1)^2 - 0,181\rho + 143,84.$$

Здесь КИК – конечный коэффициент конденсатоотдачи, %; m,  $\varphi$  – коэффициенты пористости и водонасыщенности, соответственно, %; t – температура, °С;  $\rho$  – плотность конденсата,  $\text{кг/м}^3$ .

С использованием приведенной формулы изучено влияние водонасыщенности на конденсатоотдачу для экспериментов на модели пласта при значениях параметров, аналогичных использованным для экспериментов в бомбе pVT (плотность стабильного конденсата –  $745,7 \text{ кг/м}^3$ , температура –  $80 \text{ °С}$ , пористость – 20%, конденсатосодержание –  $150 \text{ г/м}^3$ ).

Как видно из полученных результатов (см. рис. 1), наличие воды в пористой среде (как и в бомбе pVT) отрицательно влияет на величину коэффициента конденсатоотдачи. Но характер этого влияния иной: с ростом количества воды ее негативный эффект усиливается. Если при изменении водонасыщенности с 0 до 15% конденсатоотдача снижается на 1,5%, то при росте содержания воды с 15 до 30% – уже на 2,7%. В целом, с ростом водонасыщенности от 0 до 40% конденсатоотдача снижается с 26 до 19,3%. То

есть, влияние воды на фазовые превращения газоконденсатных систем в бомбе pVT и в пористой среде существенно различается.

При анализе данных, показанных на рис. 1, следует учитывать, что график для бомбы pVT отражает результат конкретного эксперимента, а для пористой среды – корреляционную зависимость, полученную по результатам серии экспериментов. То есть, более высокие значения конечной конденсатоотдачи для модели пласта при одинаковом содержании воды нельзя считать свидетельством положительного влияния пористой среды на выход конденсата. Поэтому при анализе эффектов, вызванных наличием воды в газоконденсатной системе, автор опирается на форму графиков, а не на конкретные значения на соответствующих кривых.

#### **Анализ влияния воды на фазовые превращения газоконденсатных систем в бомбе pVT**

Известно, что при добавлении в газоконденсатную систему какого-либо компонента с критической температурой, большей, чем у системы, фазовая диаграмма смещается вправо по сравнению с диаграммой для начального состава. Это означает, что возрастает давление начала ретроградной конденсации. Однако результаты проведенных нами экспериментальных и аналитических исследований не совсем согласуются с вышеприведенными утверждениями.

Обратимся сначала к результатам экспериментальных исследований в pVT бомбе. Как видно из табл. 1 и рис. 1, наличие до 10% воды в системе значительно влияет на выпадение ретроградного конденсата. При дальнейшем росте содержания воды его влияние ослабевает. Этот результат не противоречит классическим законам термодинамики. При изменении давления и температуры часть находящейся в системе воды испаряется, пока в соответствии с ее парциальным давлением не наступит равновесие между фазами. Поскольку увеличение содержания паров воды в газовой фазе ведет к смещению вправо фазовой диаграммы, то соответственно при том же давлении увеличиваются и потери конденсата в жидкую фазу.

При заданных давлении и температуре максимальное количество водяного пара определяется абсолютной влажностью газовой фазы. Дальнейший рост количества воды в системе приводит только к увеличению содержания жидкой фазы. Сказанное подтвердилось визуально в процессе проведения экспериментов в pVT сосуде.

Следовательно, максимальные потери в конденсатоотдаче будут иметь место до достижения порогового значения водосодержания, соответствующего абсолютной влажности газовой фазы при соответствующем давлении. Форма графика для pVT бомбы на рис. 1 показывает, что при содержании воды в системе около 10% содержание водяного пара в газовой фазе достигает своей максимальной величины, что соответствует наибольшей потере конденсата на первых шагах процесса дифференциальной конденсации.

При объяснении механизма конденсатных потерь только влиянием количества водяных паров в газовой фазе мы должны ожидать, что с определенного уровня повышение содержания воды будет приводить только к росту общего количества жидкой фазы, но не влиять на конденсатоотдачу. Однако в реальных экспериментах любой рост количества свободной воды в системе повышает конденсатные потери. Причина данного эффекта состоит в том, что по мере роста водосодержания возрастает и начальное соотношение между объемами жидкой и газовой фазы. В проведенных нами экспериментах в pVT бомбе рост доли воды в смеси с 0 до 40% приводит к повышению указанного параметра от 150 г/м<sup>3</sup> до 1316,3 г/м<sup>3</sup>. Несмотря на слабую растворимость углеводородных газов в воде, присутствие жидкой воды интенсифицирует ретроградные потери конденсата. Кроме того, как показано в [8, 9], наличие в составе углеводородной системы хорошо растворимых компонентов снижает ретроградное выпадение конденсата. В то же время, потеря таких компонентов за счет их растворения в воде интенсифицирует ретроградную конденсацию.

Таким образом, в рамках процессов в свободном объеме наличие воды в составе углеводородной смеси влияет на фазовое поведение в двух направлениях.

1) Испарение воды в процессе восстановления термодинамического равновесия системы приводит к образованию смеси с более высокими критическими параметрами. Как следствие, повышается давление начала конденсации и интенсифицируется динамика ретроградной конденсации.

2) Возрастание содержания воды в виде жидкой фазы приводит к изменению фазового соотношения жидкость–газ и интенсификации процесса ретроградной конденсации за счет частичной потери тяжелых углеводородных компонентов, обладающих хорошей растворимостью в воде.

## **Анализ влияния воды на фазовые превращения газоконденсатных систем в пористой среде**

Влияние воды на показатели процесса дифференциальной конденсации в пористой среде существенно отличается от такового в pVT бомбе.

1. Согласно рис. 1, рост водонасыщенности пористой среды с 0 до 10% приводит к относительно небольшому росту конденсатных потерь. Дальнейшее повышение водонасыщенности более существенно сказывается в негативном плане на конденсатоотдаче (рис. 1).

Отметим, что известны работы [1, 10], где указывается на нейтральное или положительное влияние наличия до 15% воды в пористой среде на коэффициент углеводородоотдачи продуктивного пласта. В частности, в [1] показано, что водонасыщенность до 15% не влияет на фазовое поведение газоконденсатной системы. Это объясняется обволакиванием водой песчинок и соответствующим снижением интенсивности сорбционных процессов.

Вместе с тем, как отмечено выше, любое количество свободной воды обязательно приводит к снижению конденсатоотдачи из-за испарения воды в газовую фазу и смещения фазовой диаграммы. То есть, отсутствие такого снижения означает, что вода в пористой среде имеет тесную связь с песчинками пласта. И в таком случае процессы ее испарения за счет действия поверхностных и адсорбционных сил являются слабыми или отсутствуют.

Согласно [11], толщина водяной пленки на песчинках составляет порядка  $5 \cdot 10^{-8}$  м. Тогда, при пористости 0,1912 (самое низкое значение в проведенных автором экспериментах) и удельной поверхности  $660908 \text{ м}^2/\text{м}^3$  (самое высокое значение), количество связанной воды составит 3,29% от объема пористой среды. Одновременно, не исключается возможность роста количества связанной воды за счет сорбционных процессов в пористой среде. Это свидетельствует о том, что из-за наличия тесной связи с поверхностью песчинок часть остаточной воды почти не участвует в термодинамических процессах. Кроме того, остаточная вода, обволакивая поверхности песчинок, создает определенный барьер между углеводородными компонентами и породой. Поэтому ослабевает влияние пористой среды на процесс ретроградной конденсации системы.

Указанные причины объясняют, почему в выполненных экспериментах наблюдалось слабое влияние водонасыщенности пористой среды, при ее значениях до 10%, на фазовое поведение газоконденсатной системы.

2. Наличие более 10% воды в пористой среде приводит к росту интенсивности потери конденсата. По мнению автора, в этом случае избыток воды находится в свободном состоянии. Свободная вода, активно участвуя в процессах растворения и испарения, ведет себя так же, как и в pVT бомбе и аналогично влияет на термодинамические процессы в углеводородной системе.

Немонотонный характер влияния воды на фазовое поведение углеводородной смеси в пористой среде в зависимости от водонасыщенности ранее отмечен также авторами работы [12].

Процесс испарения воды в газовую фазу с последующим ее отбором при дифференциальной конденсации может иметь как положительное, так и отрицательное влияние на величину коэффициента конденсатоотдачи.

Отрицательное влияние связано с двумя эффектами.

1) Рост доли водяного пара в газовой фазе приводит к более интенсивной потере тяжелых углеводородных компонентов.

2) После снижения давления до определенного уровня возможно испарение связанной воды и «высушивание» пористой среды, что приводит к ускорению ретроградной конденсации.

Положительное влияние испарения воды связано со следующим эффектом. Уменьшение количества свободной воды в порах пласта и возвращение растворенных в воде углеводородных газов в газовую фазу влечет за собой некоторое снижение темпа падения пластового давления.

## **ВЫВОДЫ**

В данной работе экспериментально исследовано влияние воды на конденсатоотдачу при дифференциальной конденсации в pVT бомбе и в модели пласта. Для сокращения необходимого числа экспериментов использованы методы планирования эксперимента. Результаты проанализированы с привлечением современных статистических методов.

Сформулированы отличительные особенности массообменных процессов, сопровождающих фазовые превращения в газоконденсатных системах в присутствии воды.

1. Влияние воды на процесс ретроградной конденсации газоконденсатной системы в бомбе pVT и в модельной пористой среде имеет различный характер. Наибольший рост

интенсивности потери конденсата в свободном объеме наблюдался при водосодержании до 15%. В модели пласта, наоборот, влияние воды на ретроградную конденсацию минимально при водонасыщенности до 10% и с дальнейшим ее ростом постепенно усиливается.

2. Вода, находящаяся в жидком, паровом и связанном состоянии, в зависимости от пластовых условий по-разному влияет на фазовое поведение газоконденсатных систем. В статье соответствующие особенности проанализированы с теоретических позиций и подтверждены результатами выполненных экспериментов.

3. Как в pVT бомбе, так и в модели пласта наибольший рост ретроградных потерь конденсата под влиянием воды имеет место при высоких значениях давления. По мере истощения системы часть воды испаряется и выносится с добываемым газом. Это приводит к снижению ее влияния на фазовое поведение газоконденсатной смеси.

4. С ростом водонасыщенности пористой среды увеличивается доля свободной воды. Это приводит к изменению состава газоконденсатной системы из-за растворения в воде хорошо растворимых газовых компонентов. В результате ретроградные потери тяжелых компонентов возрастают и снижается плотность добываемого конденсата.

5. Результаты выполненных исследований демонстрируют, что для достоверного проектирования разработки газоконденсатных залежей необходимо проведение экспериментов на моделях пласта с воспроизведением природной остаточной водонасыщенности. Данный вывод находится в согласии с методологическими положениями концепции эффективного порового пространства [13].

Автор выражает искреннюю благодарность члену-корреспонденту Национальной Академии наук Азербайджана З.Я. Аббасову за активное участие в проведении экспериментов и анализе их результатов и д.т.н. И.М. Индрупскому (ИПНГ РАН) за полезные советы при подготовке данной статьи к публикации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гриценко А.И., Николаев В.А., Тер-Саркисов Р.М.* Компонентоотдача пласта при разработке газоконденсатных залежей. М.: Недра, 1995. 264 с.
2. *Закиров С.Н., Васильев В.И., Гутников А.И.* и др. Прогнозирование и регулирование разработки газовых месторождений. М.: Недра, 1984. 295 с.
3. *Эфрос Д.А.* Исследования фильтрации неоднородных систем. Л.: Гостоптехиздат, 1963. 350 с.

4. *Shinta A.A, Firoozabadi A.* Predicting phase behavior of water/reservoir-crude systems with the association concept // SPE Reservoir Engineering. May 1997. P. 131-137
5. *Kokal S., Al-Dokhi M., Sayegh S.* Phase behavior of gas-condensate/water system // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, USA. 1-4 October 2000.
6. *Протодьяконов М.М., Тедер Р.И.* Методика рационального планирования экспериментов. М.: Недра, 1970. 76 с.
7. *Cuiham W.E., Faroug Ali S.M., Stahl C.D.* Experimental and numerical simulation of two-phase flow with interphase mass transfer in one and two dimensions // AIME 43<sup>rd</sup> Annual Fall Meeting. Houston, USA. 29 September 1968.
8. *Абасов М.Т., Аббасов З.Я., Фаталиев В.М, Гамидов Н.Н., Мамедова Г.Г.* Экспериментальное исследование влияния растворимости в углеводородных конденсатах газов различного состава на показатели истощения газоконденсатной системы // Изв. НАН Азерб. Науки о Земле. № 3, 2006. С. 64-69.
9. *Абасов М.Т., Аббасов З.Я., Фаталиев В.М, Гамидов Н.Н., Мамедова Г.Г.* Прикладные вопросы термодинамики при добыче нефти и газа. Баку: Nafta-Press, 2013. 212 с.
10. *Chawla I.S., Barrufet M.A., Rahman S., Beladi M.K., Wu C.H.* Influence of temperature, pressure and molecular weight of hydrocarbon components on the multi-phase equilibria of hydrocarbon/ester systems // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, USA. 22-25 October 1995. P. 901-915
11. *Гиматудинов Ш. К.* Физика нефтяного и газового пласта: Учебник. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Недра, 1971. 312 с.
12. *Булейко В.М., Воронов В.И., Закиров С.Н., Закиров Э.С., Индрупский И.М.* Закономерности поведения углеводородных систем залежей нефти и газа // Доклады РАН. 2007. Том 414, № 6. С. 788 – 792.
13. *Закиров С.Н., Индрупский И.М., Закиров Э.С. и др.* Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2009. Часть 2. 484 с.