

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА И РАЗРАБОТКА

НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

11.96



МОСКВА – 1996



ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА И РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научно-технический журнал

Издается с 1992 г.

Ноябрь 1996 г.

№ 11

Выходит 12 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА

- Дмитриевский А. Н., Илюхин Л. Н., Постникова О. В.,
Тихомирова Г. И., Фомичева Л. Н., Шапошникова Е. Ю.
Роль блоковых движений земной коры в формировании
седиментационных циклитов вендско-нижнесмбрийского
подсолевого карбонатного комплекса Байкитской антеклизы . 2
- Кнеллер Л. Е., Рыскаль О. Е. Определение параметров
низкопористых, трещиноватых пород (на примере
рифейских отложений Юрубчено-Тохомской зоны Восточ-
ной Сибири) 6

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Мирзоян Ю. Д., Ойфа В. Я. Векторная (поляризационная)
сейсморазведка и опыт ее применения в различных средах . 12

РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

- Лысенко В. Д. О геологическом и гидродинамическом мо-
делировании при проектировании разработки нефтяных
пластов 42
- Ермаков П. П., Еремин Н. А. Нагнетание азота в пористые
среды для увеличения нефтеотдачи 45
- Пономаренко Е. М., Еремин Н. А. Апробация методики
определения сходства нефтесодержащих пластов в задаче
выделения эксплуатационных объектов на реальных место-
рождениях 51

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. А. Дауреченский — главный редактор

С. Е. Алферов (зам. главного редактора),
В. С. Акимов, А. А. Алексеев, В. Е. Газура,
В. З. Гарипов, В. М. Глазова, В. Е. Леуцкая,
Н. Н. Лисовский, Н. Я. Медведев,
Р. Н. Мухаметзянов, В. Н. Николаев,
А. А. Новиков, Н. Л. Сорокина,
В. С. Ульямов, А. М. Хитров, В. В. Шелепов,
Г. Ю. Швакряцкий

Ведущие редакторы: А. Я. Яценко,
Н. С. Саватеева

Компьютерный набор Н. А. Аспосова

Компьютерная верстка Т. Д. Дмитриевой

Корректор Н. Г. Евдокимова

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 020439 от 28.02.92

Адрес редакции: 117420 Москва, ул.
Наметкина, 14, корп. Б, ОАО "ВНИИОЭНГ".
Тел. ред. 332-00-29, 332-00-35

Подписано в печать 23.09.96. Формат 84×108 1/16.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л.
5,88. Уч.-изд. л. 7,13. Тираж 365 экз.
Заказ № 127. Цена договорная.
ОАО "ВНИИОЭНГ" № 4523.

Печать-множительная база
ОАО "ВНИИОЭНГ".
113162 Москва, Хавская, 11.

ОАО "ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ОРГАНИЗАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ
И ЭКОНОМИКИ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ"

© ОАО "ВНИИОЭНГ", 1996.

При перепечатке материалов ссылка на издание обязательна.

УДК 622.276.42:661.939

Нагнетание азота в пористые среды для увеличения нефтеотдачи

П. П. Ермаков (ГАНГ им. И.М.Губкина)
Н. А. Еремин (ИПНГ РАН)

Введение

В последнее время все большее внимание уделяется вопросам повышения нефтеотдачи. Не секрет, что применение традиционного заводнения залежи обычно позволяет добыть менее половины содержащихся в пласте углеводородов. Методы воздействия, которые увеличивают коэффициент извлечения, становятся все более и более привлекательными на поздних стадиях разработки для добывающих компаний. В зависимости от геологических условий обычно возможно применение лишь ограниченного набора методов повышения нефтеотдачи. Окончательный выбор метода зависит от его рентабельности, т. е. соотношения между стоимостью добытой с его помощью нефти и расходами на его проведение.

В настоящее время открытие месторождений с легкоизвлекаемыми запасами становится все более маловероятным. В этих условиях все большее внимание привлекают месторождения с трудноизвлекаемыми запасами, ранее считавшиеся нерентабельными. На таких месторождениях наиболее перспективно применение методов повышения нефтеотдачи, которые, однако, довольно дороги. Тем не менее, такие месторождения разрабатываются с прицелом на будущее с целью покрыть все расходы на разработку через несколько лет эксплуатации. Конечно, такие проекты под силу только крупным компаниям.

Методы повышения нефтеотдачи обычно классифицируют по рабочему агенту, который нагнетается в пласт. Они делятся: на гидродинамические, тепловые, физико-химические, газовые и микробиологические. Закачка в пласт азота как метод повышения нефтеотдачи относится к газовым методам, наряду с методами нагнетания углекислого газа, газа высокого давления, углеводородных растворителей и обогащенного газа. Эти методы тесно связаны между собой и иногда применяются совместно.

Вытесняющие свойства азота

Азот — бесцветный газ без вкуса и запаха. Как и любой реальный газ, он обладает сжимаемостью, зависящей от давления. При давлении 20 МПа фактор сжимаемости азота составляет 1,1, что примерно в 1,5 и 3 раза меньше соответственно сжимаемости углеводородного газа и углекислого газа. Газообразный азот слабо растворим в воде и нефти. Растворимость с изменением температуры меняется незначительно. В воде азот растворяется значительно (примерно в 17 раз) хуже, чем в нефти. Азот лучше смешивается с легкой нефтью, чем с тяжелой. Он легко смешивается с метаном, а при давлении 20...25 МПа с конденсатом и летучей нефтью. Поэтому коэффициент вытеснения метана, конденсата и летучей нефти азотом достигает 92...98% при давлении более 20 МПа. Условие полного смешивания азота с нефтью достигается при давлениях 36...50 МПа, что выше, чем для углекислого и углеводородного газов. Все это приводит к тому, что коэффициент смешивающегося вытеснения нефти азотом ниже подобного коэффициента для вышеперечисленных газов на 4...7 %. Эффективность несмешивающегося вытеснения нефти азотом и дымовым газом также будет несколько ниже, чем углекислым газом и метаном, так как ухудшаются межфазные процессы и вязкостные эффекты.

Но у азота как вытесняющего реагента есть много преимуществ перед другими реагентами. Азот, будучи инертным газом, не вызывает коррозию породы и не абсорбируется на ней. Он наносит минимальный ущерб проницаемости породы. Исчезают проблемы, связанные с разбуханием и переносом породы. Добываемые нефтепродукты легко очищаются от азота. Вследствие отсутствия жидкости в породе увеличивается долговременная производительность скважины. И главное, стоимость азота в 2...3 раза меньше стоимости углекислого газа и в 4...8 раз меньше стоимости угле-

водородного газа, что обеспечивает быстрый возврат вложенного капитала. В связи с более низкой сжимаемостью безвозвратные потери азота в пласт и расходы на его компримирование будут в 2...3 раза меньше, чем при использовании углекислого газа или метана.

С учетом этих факторов расходы на закачку азота могут составлять лишь 20...30 % расходов при применении углекислого газа и метана.

Методы увеличения добычи нефти и газа закачкой азота

Рассмотрим шесть основных методов применения азота.

Азот может использоваться как агент поддержания пластового давления. Один из наиболее простых и старейших методов добычи нефти состоит в закачке газа. Многие годы попутный газ, добываемый с нефтью, вновь закачивался в пласт для поддержания пластового давления и увеличения суммарной добычи. Если попутного газа не хватало, то дополнительно закачивали газ из газовых месторождений или сухой газ, подаваемый с газобензиновых заводов. При этом добыча нефти происходила путем несмешивающегося или гравитационного вытеснения. В настоящее время высокая стоимость добычи и транспортировки природного газа сдерживает его использование для поддержания давления. Поэтому его заменяют азотом или дымовыми газами, поскольку их стоимость в 3...4 раза дешевле.

Азот может заменить природный газ и при рециркуляции газа при эксплуатации газоконденсатных месторождений. Если пластовая температура близка к точке начала кипения, то природный газ можно с успехом заменить азотом или другими доступными газами, которые обеспечивают эффективное поддержание пластового давления и вынос конденсата к забоям эксплуатационной скважины. Определяющими, как и всегда, будут лишь экономические соображения.

При разработке крупнопадающего нефтяного пласта с активным водонапорным режимом некоторое количество нефти может остаться в кровельной части пласта. Бурение дополнительных скважин экономически не оправдано. Нефть, оставшаяся в верхней части пласта, может быть добыта вытеснением ее газом, закачиваемым через одиночную скважину. Вместо природного газа здесь опять же выгодно использовать азот.

При разработке нефтяных залежей с газовой шапкой для более полного извлечения нефти газ из газовой шапки первоначально не добывается, чтобы не снижать пластовое давление. Отбор газа из газовой шапки начинается после завершения

добычи нефти, т. е. через много лет после начала разработки. В условиях повышенного спроса на газ и его высокой стоимости отсрочка добычи газа из газовой шапки может оказаться нежелательной, а возможно, и нерентабельной. Закачка азота в пласт позволяет отбирать газ из газовой шапки, не снижая пластового давления, на ранней стадии эксплуатации месторождения.

В настоящее время углекислый газ находит все большее применение для увеличения нефтеотдачи. Двуокись углерода эффективна с точки зрения вытеснения нефти, но имеет высокую стоимость. Поэтому для проталкивания оторочки углекислого газа через пласт можно использовать азот попеременно с водой. То же самое верно и для проталкивания оторочки растворителя. Наконец, возможно простое смешивающееся и несмешивающееся вытеснение нефти азотом. Тип вытеснения зависит от характеристик пласта. Определяющими факторами являются глубина залегания пласта, от которой зависит давление смешивания, и присутствие в нефти достаточного количества легких фракций. Хорошее смешивание достигается при глубине пласта не менее 3000 м и плотности нефти не выше 800 кг/м³.

Наибольшего эффекта можно достичь при технологии, обеспечивающей полное смешивание (растворимость) закачиваемого газа с нефтью в относительно однородных пластах, меньший эффект — в условиях несмешивающегося вытеснения при движении свободного газа в неоднородном пласте.

Ограничений на применение дымовых газов и азота накладывается значительно меньше, чем на использование физико-химических и тепловых методов. Только для реализации смешивающегося вытеснения требуются залежи с относительно легкой нефтью, большой глубиной залегания и высокие давления нагнетания газа — более 35...40 МПа. При продвижении газовых оторочек азотом также необходимо иметь легкую нефть.

Источники получения азота и очистки добываемых нефти и газа от него

Основной источник азота — воздух, который как известно, содержит 78 % азота. В основном применяются два способа получения азота: выделение его из воздуха и из дымовых газов. Дымовые газы содержат более 85 % азота и до 15 % углекислого газа. Дымовые газы получают при сжигании природного газа в паровом котле. При этом объем получаемого дымового газа почти в 9 раз превышает объем сжигаемого природного газа. Получение азота из воздуха заключается в сжигании воздуха с последующей перегонкой, в

результате чего получается почти чистый азот. Из дымовых газов получается газ, содержащий не менее 88 % азота, а также углекислый газ, угарный газ, пары воды и остаточный кислород.

Когда для увеличения нефтеотдачи применяются углекислый газ, дымовые газы или чистый азот, рано или поздно происходит прорыв этих реагентов в эксплуатационные скважины. Значительное же содержание таких газов в продукции добывающих скважин нежелательно по многим причинам. Вот главные из них: снижается теплота сгорания и для того, чтобы довести ее до нормативного или оговоренного в контракте уровня, необходимо обогащение нефти или газа; увеличиваются эксплуатационные затраты на перекачку по трубопроводу.

В связи с этим возникает необходимость удаления этих примесей. Углекислый газ можно экстрагировать с помощью "влажного" абсорбционного процесса. Если в пласт закачиваются углекислый газ и азот, то необходимо удалять оба этих газа. При этом прорыв углекислого газа в добывающую скважину может задерживаться поскольку он характеризуется повышенной растворимостью в нефти и воде. Однако в дальнейшем отношение углекислый газ/азот будет приближаться к исходному значению. Азот же можно эффективно отделять путем охлаждения, сжижения и фракционирования при низких температурах. Этим методом можно получить 99% метана и практически все более тяжелые фракции.

Механизм вытеснения нефти азотом и дымовыми газами

При несмешивающемся вытеснении нефти азотом процесс вытеснения близок к поршневому, что описывается в крупномасштабном приближении теорией Баклея—Леверетта.

Так как для газожидкостных систем характерны небольшие скорости движения в пористых средах, есть основания предполагать, что в пластовых условиях межфазный массообмен будет близок к равновесному.

При смешивающемся вытеснении нефти азотом наблюдается многоконтактный процесс, когда азот, смешиваясь с пластовой нефтью, постепенно обогащается метаном, n-бутаном и парами легких фракций нефти. С другой стороны, эта газовая смесь растворяется в вытесняемой ею нефти. В результате образуется переходная зона газожидкостной смеси небольшой протяженности, в которой происходят активные межфазные перетоки компонентов между фазами.

Азот, нагнетаемый при давлении выше давления насыщения нефти, с одной стороны, растворяется в ней, а с другой — происходит испарение в азот легких углеводородных компонентов нефти. По мере движения азота по пласту будет происходить все большее его обогащение углеводородными компонентами. В конечном итоге на фронте вытеснения будет двигаться газ, состоящий из смеси углеводородных составляющих и азота, соотношение которых будет постоянным и зависеть от начальных условий вытеснения. Этот газ, с одной стороны, расходует, растворяясь в вытесняемой им нефти, имеющей давление насыщения ниже давления вытеснения, с другой — происходит его восполнение за счет перехода в газовую фазу из нефти метана, n-бутана и паров легких фракций. Растворение такой газовой смеси в пластовой нефти повышает содержание в ней легких компонентов. Облегчение пластовой нефти может привести к возникновению полной смешиваемости между нефтью и обогащенным углеводородными компонентами газом, движущимся на фронте. Если даже полная смешиваемость не достигается, то все равно коэффициент вытеснения достаточно высок, во-первых, за счет переноса газом легких фракций из остаточной нефти в невытесненную и, во-вторых, за счет увеличения объема нефти при растворении в ней такого обогащенного газа.

Лабораторные исследования процесса вытеснения нефти азотом и дымовыми газами

При выборе того или иного метода повышения нефтеотдачи обычно проводят лабораторное моделирование процесса, т. е. в лабораторных условиях создается образец пласта, максимально приближенный (по возможности) к реальному пласту. На нем проводят серию экспериментов для определения наилучшего режима воздействия на пласт и неизвестных характеристик пласта. Но основной целью экспериментов является оценка эффективности того или иного метода.

Подобные эксперименты для азота и дымовых газов в Советском Союзе проводились, по видимому, только группой ученых ВНИИ (Г. Г. Вахитов, А. Ю. Намин, В. Г. Скрипка, А. А. Фаткуллин) в середине 80-х гг. Их основные результаты были отражены А. А. Фаткуллиным в его кандидатской диссертации и нескольких публикациях. В этих опытах определялись масса вытесняемой жидкости, ее фракционный состав, объем и компонентный состав газа.

За рубежом также проводились эксперименты по вытеснению нефти азотом, в частности, компанией Amoco в 1988 г. В этих опытах определялись

такие характеристики, как величина и состав извлекаемой жидкости, профиль фронта продвижения азота, период до прорыва газа. Основные результаты отражены в виде графиков распределения фаз в пористой среде.

Математическое моделирование процесса вытеснения нефти азотом

Математическая модель процесса вытеснения нефти азотом зависит прежде всего от типа вытеснения. Процесс несмешивающегося вытеснения нефти азотом можно рассматривать как процесс поршневого вытеснения, и, следовательно, для него можно применить модель Баклея—Левверетта, в которой в расчетах для газа нужно использовать вместо давления функцию Христиановича.

Процесс смешивающегося вытеснения нефти азотом представляет собой частный случай процесса многофазной фильтрации многокомпонентных смесей. Это сложный процесс, включающий конвективный перенос фаз и компонентов, изменение фильтрационных параметров потока в пространстве и во времени, межфазовый массоперенос отдельных компонентов, их адсорбцию и десорбцию на скелете породы, диффузионные, капиллярные и некоторые другие явления. Обобщенная модель многофазной многокомпонентной фильтрации включает в себя уравнения, описывающие все вышеперечисленные явления. В случае изотермического вытеснения нефти азотом их можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^k m_{vj} \rho_j X_{vj} \right) + \operatorname{div} \bar{q}_i = 0;$$

$$\bar{q}_i = \bar{q}_{ic} + \bar{q}_{id};$$

$$\bar{q}_{ic} = \sum_{j=1}^k \rho_j X_{vj} \bar{u}_j;$$

$$\bar{q}_{id} = \sum_{j=1}^k D_{ij} \nabla X_{vj}; \quad i = 1, \dots, k.$$

$$\sum_{j=1}^k s_j = 1, \quad \sum_{j=1}^k X_{vj} = 1; \quad j = 1, 2.$$

Здесь X_{vj} - массовые концентрации k компонентов в газовой и нефтяной фазах; $\bar{q}_i$ - суммарный поток каждого компонента, складывающийся из

конвективного $\bar{q}_{ic}$ и диффузионного $\bar{q}_{id}$ потоков; $\bar{u}_j$ и ρ_j - скорость фильтрации и плотность j -й фазы; D_{ij} - коэффициент диффузии i -го компонента в газовой и нефтяной фазах. Для каждой из фаз считается справедливым обобщенный закон Дарси:

$$\bar{u}_j = - \frac{K}{\mu_j} f_j \nabla p_j; \quad j = 1, 2;$$

$$f_j = f_j(s_j, X_{vj}, p_j);$$

$$i = 1, \dots, k,$$

где K - проницаемость пористой среды; μ_j, f_j, p_j - соответственно вязкость, относительная фазовая проницаемость j -ой фазы и давление в ней.

Кроме этого, имеются уравнения состояния для каждой фазы, связывающие плотность и вязкость каждой фазы с массовыми концентрациями компонентов и давлением в фазе, и условия термодинамического равновесия, включающие условия капиллярного и фазового равновесия.

$$p_j = p_j(X_{vj}, p_j); \quad \mu_j = \mu_j(X_{vj}, p_j); \quad i = 1, \dots, k; \\ j = 1, 2.$$

$$p_2 - p_1 = p_c(s_j, X_{vj}); \quad i = 1, \dots, k; \quad j = 1, 2.$$

$$F_r(X_{vj}, p_j) = 0; \quad r, i = 1, \dots, k; \quad j = 1, 2.$$

Для моделирования процессов с конкретными технико-геологическими условиями эту модель упрощают, делая необходимые допущения. Обычно первым допущением является рассмотрение процесса фильтрации в крупномасштабном приближении, т. е. пренебрегают диффузионными, капиллярными и неравновесными эффектами, что позволяет существенно упростить математическую модель и значительно уменьшить необходимый для расчетов объем экспериментальных данных. Кроме того, принимается, что относительные фазовые проницаемости, плотности, вязкости и условия фазового равновесия не зависят от давления, поскольку перепад давления мал по сравнению с абсолютными значениями давления. После введения по аналогии с моделью Баклея—Левверетта суммарной скорости фильтрации U и исключения давления из числа неизвестных получаем следующую

систему (для одномерного случая и трех-компонентной системы):

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho_1 sX_{i1} + m\rho_2(1-s)X_{i2}) + \frac{\partial}{\partial x}(U\rho_1 FX_{i1} + U\rho_2(1-F)X_{i2}) = 0;$$

$$i = 1, 2, 3.$$

$$X_{1j} + X_{2j} + X_{3j} = 1; \quad s = s_i; \quad u_i = FU;$$

$$u_2 = (1-F)U;$$

$$F = \frac{f_1}{H_1} \left(\frac{f_1}{H_1} + \frac{f_2}{H_2} \right)^{-1}.$$

Здесь шесть концентраций X_{ij} связаны тремя условиями фазового равновесия и двумя условиями $X_{1j} + X_{2j} + X_{3j} = 1$, поэтому независимой из них является лишь одна. Поэтому функция Бакля—Лeverетта F зависит только от насыщенности s и этой одной независимой концентрации s . Для замыкания системы должны быть известны еще зависимости $\rho_i(s)$ и $X_{ij}(s)$.

Если еще пренебречь влиянием сжимаемостей газовой и жидкой равновесных фаз в пласте и неаддитивности парциальных объемов азота и компонентов нефти на процесс вытеснения, то получается наиболее простая модель вытеснения. При принятых выше допущениях одномерный процесс вытеснения нефти азотом можно моделировать процессом двухфазной трехкомпонентной фильтрации, выделяя в качестве отдельных компонентов азот (или дымовой газ), группу углеводородов от метана до бутанов и группу углеводородов C_{5+} . Такая модель описывается системой двух гиперболических уравнений относительно концентраций азота и группы C_1-C_4 в газожидкостной смеси:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial X} = 0;$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial X} = 0, \quad 0 \leq X \leq 1,$$

где σ и ω - объемные доли в смеси пластовой нефти и азота (или дымового газа) групп $N_2(+CO_2)$ и C_1-C_4 соответственно; G и E - их объемные доли в потоке; X и t - безразмерные линейная координата и время. При наличии двух фаз в потоке (жидкой и газовой) функции σ , ω , G и E выражаются че-

рез насыщенность s пласта газовой фазой, функцию распределения фаз в потоке F и концентрации групп $N_2(+CO_2)$ и C_1-C_4 в каждой фазе y_1, y_2, x_1, x_2 :

$$\sigma = y_1 s + x_1(1-s),$$

$$\omega = y_2 s + x_2(1-s),$$

$$G = y_1 F + x_1(1-F),$$

$$E = y_2 F + x_2(1-F).$$

Модель замыкается начальными и граничными условиями:

$$\sigma = \sigma_0, \quad \omega = \omega_0 \quad \text{при } t = 0, \quad 0 \leq X \leq 1,$$

$$\sigma = 1, \quad \omega = 0 \quad \text{при } t > 0, \quad X = 0.$$

На основе моделей несмешивающегося и смешивающегося вытеснения был проведен расчет для условий Приразломного месторождения шельфа Баренцева моря.

При расчетах использовалась следующая исходная информация:

Проницаемость пласта, мкм ²	0,1
Пористость пласта, %	20
Вязкость нефти, мПа·с	3,87
Давление, МПа	25,75
Температура, К	331
Глубина, м	2450
Объемный коэффициент	1,111
Плотность нефти, кг/м ³	876,2

Исходная пластовая нефть содержит 1,55% группы $N_2(+CO_2)$, 34,31% группы C_1-C_4 и 64,14 % группы C_{5+} . При расчете по модели линейного несмешивающегося вытеснения нефти азотом конечный коэффициент нефтеотдачи составил 0,45. Для сравнения расчет по такой же линейной модели смешивающегося вытеснения с увеличением давления до 35 МПа, при котором для данного состава нефти достигается эффективное смешивание с азотом, показал коэффициент конечной нефтеотдачи, равный 0,72. Следует принять во внимание, что расчеты проводились по наиболее простым линейным моделям, которые дают завышенную оценку коэффициента нефтеотдачи. Тем не менее, они достаточно объек-

тивно отражают различие двух основных режимов вытеснения.

Промысловые применения азота и дымовых газов и их перспективы

Впервые дымовой газ был применен на месторождении Блок 31 в штате Техас, США, в 1966 г. в связи с дефицитом углеводородного газа. Положительные результаты использования дымового газа на этом месторождении привели к выводу о возможности использования азота и дымовых газов для увеличения нефтеотдачи пластов. К середине 80-х гг. в США осуществили 10 проектов с дымовыми газами и 19 проектов с азотом. В них дымовые газы и азот используют в виде пяти различных технологий: смешивающегося и несмешивающегося вытеснения, гравитационного дренирования, поддержания давления и с целью продвижения смешивающихся оторочек.

Перспективы применения азота и дымовых газов в связи с малым числом ограничивающих факторов и явными экономическими преимуществами по сравнению с углеводородным и углекислым газами можно считать весьма широкими. В Западной Сибири со значительными ресурсами углеводородного газа некоторую его долю можно использовать для получения больших объемов дымовых газов или азота с целью увеличения нефтеотдачи на многих месторождениях. На нефтегазовых месторождениях это позволит одновременно разрабатывать нефтяные и газовые залежи, возвращая в газовые шапки лишь 10...12 % извлекаемого газа. Особенно перспективно применение азота и дымовых газов на месторождениях с крутым падением пластов и большими этапами нефтеносности, когда возможна реализация гравитационного дренирования даже при значительной вязкости нефти. Практически на всех месторождениях с мало-вязкими нефтями, на которых применяется или запланировано обычное водогазовое воздействие на пласт, могут найти применение азот или дымовые газы вне зависимости от давления нагнетания. Разработка залежей легких, летучих нефтей и газоконденсатных месторождений может быть также эффективна за счет нагнетания в них азота или дымовых газов.

Выбор между азотом и дымовыми газами на каждом конкретном месторождении нужно проводить на основе анализа свойств, газогидродинамических расчетов и расходов на их получение и нагнетание в пласт.

Выводы

Применение азота и дымовых газов для вытеснения нефти при определенных условиях является эффективным и рентабельным способом увеличения неф-

теотдачи. Закачка азота и дымовых газов успешно проводится на многих месторождениях, в основном за рубежом. Основными критериями применимости этого метода являются высокие пластовые давления (более 30...35 МПа) и наличие легких нефтей в пласте. При этих условиях реализуется смешивающееся вытеснение нефти азотом и дымовыми газами. В основе механизма этого процесса лежит многоконтный процесс. При более низких давлениях возможно или поршневое вытеснение нефти азотом, или же вытеснение в условиях ограниченной растворимости.

Лабораторные исследования по физическому моделированию процесса вытеснения нефти азотом, по данным анализа литературы, проводились преимущественно для расчета показателей разработки конкретного месторождения с целью определения эффективности применения данного способа повышения нефтеотдачи. Математические модели процесса вытеснения нефти азотом рассматривались в рамках общей теории вытеснения нефти раствором активной примеси, влияющей на фазовое равновесие, по степени уменьшения их сложности и увеличения принятых допущений. На основе обобщения накопленного материала по тематике вытеснения нефти азотом и дымовыми газами был проведен численный анализ на примере конкретного месторождения с использованием наиболее простых моделей. По результатам этих расчетов удалось получить значения коэффициентов конечной нефтеотдачи для двух основных типов процесса вытеснения — смешивающегося и несмешивающегося.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егитов В. М., Засовский А. Ф. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи. — М.: Недра, 1989. — 232 с.
2. Гуревич Г. Р., Засовский А. Ф. Математическое моделирование процесса вытеснения нефти дымовым газом // Известия высших учебных заведений. "Нефть и газ". — 1987. — № 8. — С. 49—54.
3. Гуревич Г. Р., Засовский А. Ф. Вытеснение нефти азотом: поддержание газом/Нефть, хоз.-во. — 1988. — № 1. — С. 34—38.
4. Вахитов Г. Г., Намалов А. Ю., Скрипка В. Г., Фаткуллин А. А. Изучение вытеснения нефти азотом на модели пласта при давлениях до 70 МПа/Нефть, хоз.-во. — 1985. — № 1. — С. 35—37.
5. Сурчужев М. Л. Перспективы применения азота и дымовых газов для увеличения нефтеотдачи пластов/Нефть, хоз.-во. — 1989. — № 2. — С. 75—77.
6. Казиси Дж. П., Кролл Д. Э., Гилкрист Р. Е. Применение азота для увеличения добычи нефти и природного газа/Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1981. — № 10. — С. 43—47.
7. Renner T. A., and oth. Displacement of a rich gas condensate by nitrogen: laboratory corefloods and numerical simulations. //SPE Reservoir Engineering. — 1989. — № 2. — P. 52—57.