

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАКАЧКИ АЗОТА В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Игнатьев Н.А., Синцов И.А.

ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»,
Тюмень, e-mail: punker91@list.ru

В данной статье рассматривается возможность применения азота для закачки в нефтяные и газоконденсатные залежи для увеличения нефте- и конденсатоотдачи на основе исследований зарубежных ученых. За счет своей широкой распространенности, дешевизны и отсутствия корродирующего эффекта азот является наиболее предпочтительным агентом закачки среди неуглеводородных газов. Азот обладает низкой способностью смешиваться с нефтью, однако достаточно успешно испаряет углеводородную жидкость в пластовых условиях и может применяться для гравитационного вытеснения. Азот может служить продавочным агентом при закачке в залежи метана и углекислого газа. Реализация закачки азота на месторождениях США и стран Ближнего Востока позволила увеличить текущую нефтеотдачу. В текущих макроэкономических условиях закачка азота является реальной альтернативой сайклинг-процессу.

Ключевые слова: закачка азота, повышение нефтеотдачи, несмешивающееся вытеснение, поддержание пластового давления

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF NITROGEN INJECTION IN OIL&GAS INDUSTRY

Ignatev N.A., Sintsov I.A.

Federal Budget Educational Institution of Higher Education
«Tyumen State Oil and Gas University», Tyumen, e-mail: punker91@list.ru

This article reviews the studies of foreign scientists dedicated to the application of nitrogen injection into oil and gas condensate reservoirs in order to increase hydrocarbon recovery factor. Being widespread, of low cost, and lacking corrosive effect, nitrogen is the preferred injection agent among non-hydrocarbon gases. Nitrogen has poor miscibility with oil; however, it effectively vaporizes the hydrocarbon liquid at reservoir conditions, and can be applied for gravity drainage. Nitrogen can serve as a displacement agent for injection into deposits of methane and carbon dioxide. The implementation of nitrogen injection at the oil and gas fields of the United States and the Middle East has increased current oil recovery. In the current macroeconomic environment, nitrogen injection is a viable alternative to cycling process.

Keywords: nitrogen injection, enhanced oil recovery, immiscible displacement, reservoir pressure maintenance

В настоящее время растворенные в газе жидкие углеводороды (конденсат, пропан-бутановая фракция) являются ценнейшим сырьем для нефтехимической промышленности и уже рассматриваются не менее важным целевым продуктом, чем природный газ. В связи с этим увеличение объемов добычи конденсата становится все более актуальной задачей. Основной причиной снижения коэффициента извлечения конденсата (КИК) является выпадение тяжелых углеводородных компонентов газа в жидкую фазу при снижении давления в залежи ниже давления насыщения. Одним из способов увеличения нефте- и конденсатоотдачи пластов является поддержание пластового давления путем закачки неуглеводородных газов.

Задачей выбора рабочего агента является достижение баланса позитивных и негативных факторов, сопровождающих закачку в пласт конкретного газа в специфических условиях выбранного месторождения. Несмотря на высокие показатели

вытеснения нефти при закачке углекислого газа, использование CO_2 ограничено ввиду его дороговизны и высокой степени коррозионного влияния на скважинное оборудование. Лучшей альтернативой метану среди неуглеводородных газов является азот. Огромные запасы азота присутствуют в атмосферном воздухе, а методы его получения достаточно просты, дешевы и хорошо изучены. Азот обладает низкой коррозионной активностью, что очень важно для бесперебойной работы скважинного оборудования. Физико-химические свойства N_2 также хорошо сочетаются со свойствами пластовых флюидов. К недостаткам применения азота стоит отнести плохую смешиваемость с нефтью, тем не менее его использование при правильном подходе к управлению разработкой технологически и экономически оправдано [4].

Возможность использования неуглеводородных газов для повышения нефте- и конденсатоотдачи активно рассматривается зарубежными нефтегазовыми компаниями

с начала 1970-х годов [5]. В промышленной практике азот применяется как:

- агент продавки при закачке порций углекислого газа, природного газа и других компонентов при смешивающемся вытеснении. CO₂ и природный газ характеризуются высоким коэффициентом вытеснения нефти, однако ввиду их растущей стоимости и возможного отсутствия необходимости для прокачки объемов использование дополнительных продажных объемов азота считается приемлемым способом повышения нефтеотдачи;

- альтернатива природному газу при поддержании пластового давления путем нагнетания в газовую шапку нефтяной залежи. Суть данного метода заключается в замене добываемого на промысле углеводородного газа более дешевым азотом. Кроме того, за счет внутрипластовой сегрегации азот постепенно становится барьером между нефтяной и газовой частями залежи, в результате чего, ввиду плохой смешиваемости с нефтью, минимизирует риски прорыва к забою добывающих скважин и обеспечивает так называемое «гравитационное вытеснение»;

- вытеснение «целиков» высоковязкой нефти при реализации заводнения. В ситуации, когда имеет место защемление мало-подвижной нефти в структурных поднятиях залежи, бурение дополнительных добывающих скважин несет в себе серьезные риски для экономики проекта. В данном случае азот используется для понижения вязкости нефти и гравитационного вытеснения при закачке в отдельную скважину;

- вытеснение газа газовой шапки. При наличии значительных запасов газа в газовой шапке и значительной выработке нефтяной части залежи азот может применяться для доизвлечения объемов природного газа путем прокачки дополнительных объемов азота;

- смешивающееся вытеснение нефти. Данный метод применим при наличии резервуара с маловязкой нефтью, способной смешиваться с азотом при пластовых давлениях и температуре;

- поддержание пластового давления в газоконденсатной залежи.

Широкий спектр применения азота связан с положительными результатами многочисленных лабораторных исследований [2]. Эксперименты по контактному испарению (CVD) углеводородной жидкости при нагнетании азота N₂ показали, что при заполнении азотом 50% порового объема коллектора происходит испарение до 16% жидкой фазы из смеси. Анализ опытов по прокачке азота через керн, насыщенный «тяжелой» нефтью, свидетельствует о том, что смешивания углеводородов с агентом не происходит, однако при эквивалентных пластовым

давлению и температуре азот достаточно инертен, и его свойства сопоставимы со свойствами пластового флюида, что положительно сказывается на процессе фильтрации в поровом пространстве.

Процесс производства азота из воздуха делится на пять стадий:

- 1) сжатие воздуха до 0,6–0,7 МПа при помощи компрессоров осевого или центробежного типа;

- 2) удаление примесей (водяной пар, углекислый газ и др.) механическим способом за счет их адсорбции в теплообменнике при низких температурах;

- 3) охлаждение в теплообменнике блочного типа до температуры –196°С;

- 4) разделение азота и кислорода за счет низкотемпературной дистилляции;

- 5) сжатие азота до необходимого давления закачки при помощи центробежных насосов или насосов возвратно-поступательного действия.

В состав установки по производству азота входят газовая турбина, компрессор, рабочий двигатель, адсорбционные емкости, теплообменник, молекулярные сита для удаления примесей, резервуары для дистилляции [9]. На сегодняшний день имеется несколько модификаций станций для производства азота, наибольшей популярностью пользуются станции адсорбции мембранного типа. Большинство месторождений Российской Федерации расположены в северных районах с суровыми климатическими условиями, поэтому необходимость в дополнительной холодильной камере для азотной установки отсутствует. В настоящее время ряд российских производителей предлагает азотные установки блочного типа, которые отличаются компактностью и простотой конструкции, но при этом значительно уступают зарубежным по объемам производства – до 60 тыс. м³/сут, тогда как крупнейшая азотная установка в США может производить до 120 тыс. м³/сут. Некоторые отечественные компании-операторы используют самоходные азотные установки для проведения освоения скважин, однако данные установки также характеризуются малой производительностью (до 40 тыс. м³/сут).

Несмотря на большое число предпосылок к использованию азота для увеличения нефтеотдачи, ни один из проектов не обходится без тщательного анализа технико-технологических и экономических показателей. Одним из примеров применения азота является Fordoche Field – нефтегазоконденсатное месторождение в штате Луизиана, США [7]. Коллектор представляет собой песчаник со средней проницаемостью 6 мД, пористостью 20%, характер насыщения –

легкая маловязкая нефть и газоконденсатная шапка. На этапе подбора агента вытеснения были исключены вода (негативное влияние на ОФП по нефти) и природный газ (как продукт для реализации). Лабораторные исследования и данные 3D-моделирования показали высокую эффективность азота при несмешиваемом вытеснении нефти, и было принято решение реализовать закачку смеси из 70% азота и 30% метана в купольную часть залежи (рис. 1).

фазе. После этого закачка азота была прекращена, а поддержание давления осуществлялось осушенным природным газом.

Необходимо отметить, что реализация закачки азота в нефтяные залежи всегда сопровождается особым комплексом мероприятий по управлению закачкой и тщательным мониторингом работы добывающего фонда. Частые исследования состава продукции на концентрацию азота необходимы для своевременного выявления

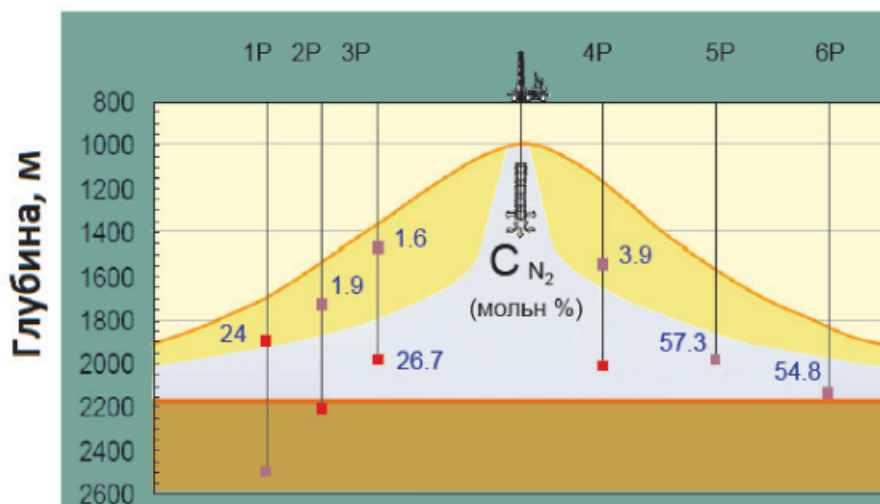


Рис. 1. Концентрации азота при закачке в купольную часть залежи, Fordoche Field

Реализация закачки смеси N_2 и CO_2 с 1979 года на протяжении двух лет позволила увеличить текущую нефтеотдачу пласта при незначительной степени истощения, однако ввиду ряда экономических проблем, среди которых присутствует снижение стоимости продукции, реализация проекта была остановлена раньше намеченных сроков. Отмечается, что прорывы азота в добывающие скважины не были зафиксированы, однако концентрация азота возрастала в среднем на 4% в год.

Закачка азота была реализована на кластере месторождений штата Вайоминг, США. Рассматриваемая газоконденсатно-нефтяная залежь Rocky Mountains представляет песчаный пласт с высокой степенью слоистой неоднородности и низкой проницаемостью (2 мД). Истощение залежи на момент реализации составляло 40%, при этом было достигнуто давление насыщения. Прокачка смеси из 35% азота и 65% метана позволила поддерживать постоянную добычу конденсата на протяжении нескольких лет, но после закачки азота свыше 0,6 порового объема залежи доля жидких углеводородов стала резко снижаться. Данный факт совпал с увеличением концентрации азота в продукции скважин до 90% по газовой

и предотвращения прорывов нагнетаемого агента, регулирования процесса закачки, изменения соотношения при закачке смеси газов [1]. Особенности применения азота для поддержания пластового давления также могут внести коррективы в размещение проектного фонда месторождения.

В современных условиях низкой рыночной стоимости нефти закачка азота в нефтяные залежи может не только не оправдать затрат на дополнительное оборудование, но и серьезно ухудшить экономику проекта. В то же время текущая ситуация не повлияла на цену газового конденсата, в связи с чем азот можно рассматривать для увеличения КИК на крупных газоконденсатных месторождениях севера Тюменской области.

Несмотря на продолжающиеся исследования в данном направлении, основным способом повышения конденсатоотдачи пластов до сих пор считается обратная закачка газа в залежь для поддержания пластового давления выше давления насыщения. В работах зарубежных авторов [8, 6] приведен анализ возможности применения азота в качестве агента закачки. Лабораторные исследования показали, что закачка азота в залежь позволяет снизить давление

насыщения и продлить таким образом стабильную добычу конденсата. Одной из проблем является высокая степень дисперсии между молекулами азота и жирного газа в пластовых условиях. Данный факт зависит от геологического строения залежи: высокая степень дисперсии характерна для однородных коллекторов; в гетерогенном коллекторе дисперсия зависит от скорости нагнетания вытесняющего агента и определяется значением числа Рейнольдса. При высоких значениях числа Рейнольдса, которые характерны для закачки в пластовых условиях, дисперсионное взаимодействие азота и конденсата практически не оказывает влияния на конечную конденсатоотдачу. Опытным путем установлено, что при взаимодействии закачиваемого азота с молекулами конденсата выпавшая жидкость может занимать до 25 % объема (у метана этот показатель равен 18–20%). Тем не менее, при прокачке азота на уровне 120% от объема породы наблюдается положительный эффект в виде значительного увеличения коэффициента конденсатоотдачи – до 90%. Проведенные в работе А.Ю. Юшкова экономические исследования показали, что сайклинг-процесс с использованием осушенного природного газа является экономически неэффективным, в связи с чем рассмотрение азота в качестве альтернативного агента является в большей степени актуальным вопросом. Принципиальная схема реализации закачки азота на газоконденсатном промысле представлена на рис. 2. Перечень

необходимого оборудования для получения азота и последующего отделения от продукции скважин одинаков для нефтяных и газоконденсатных месторождений.

Возможное применение азота для поддержания пластового давления рассматривалось на нескольких газоконденсатных месторождениях ОАЭ [3]. Месторождение Middle East представляет собой крупный однородный газоконденсатный резервуар антиклинального строения. Средняя пористость 18%, латеральная проницаемость – 10 мД. Разработка месторождения велась с 1974 года, дополнительные мощности для реализации обратной закачки начали строиться с 2001 года. На начальном этапе был проведен ряд РVT-исследований, которые выявили небольшое повышение давления насыщения при взаимодействии азота с пластовым газом. Построение и настройка гидродинамической модели пласта позволили оценить динамику выпадения жидкой фазы в пласте при прокачке природного газа и его смеси с N₂ (рис. 3).

Несмотря на стабилизацию процессов выпадения конденсата, конечная конденсатоотдача при реализации закачки азота всего на 2% превышает показатели при закачке природного газа. При этом отмечается прорыв азота к ближайшим добывающим скважинам уже через год после начала закачки. Данный проект рассматривается в долгосрочной перспективе с учетом текущих экономических предпосылок. При условии стабильных цен на необходимое оборудование и продукцию реализация проекта возможна в 2020-х годах.

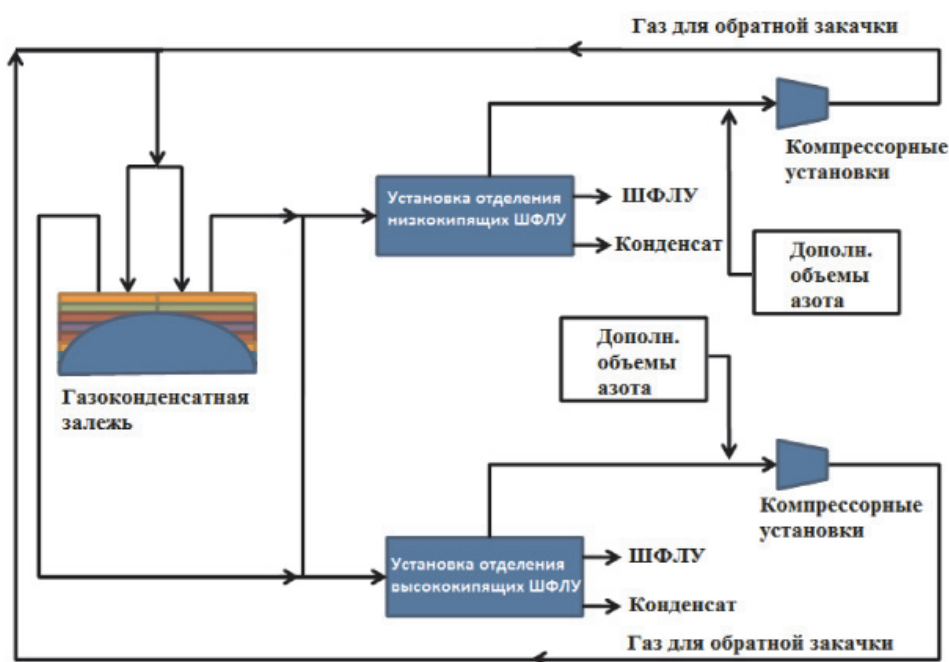


Рис. 2. Схема закачки азота на газоконденсатном промысле

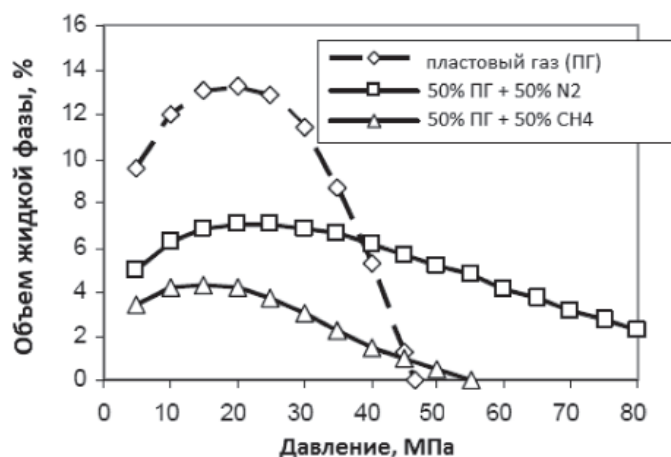


Рис. 3. Выпадение конденсата при прокачке смесей газов

Исследования возможности использования азота также проводились для месторождения Cantarell и юго-восточных активов ОАЭ. Были определены минимальные давления смешивания для конкретных пластов, проведено сравнение с метаном и углекислым газом, по результатам которого азот признан подходящим агентом закачки с учетом технико-технологических и экономических показателей. Однако стоит отметить, что для каждого конкретного месторождения результаты могут быть неодинаковыми вследствие дифференциации по термобарическим условиям и составу пластовых флюидов.

Проведенный обзор отечественных и зарубежных источников позволяет сформулировать следующие выводы:

1) физико-химические свойства азота и его распространенность делают его одним из наиболее доступных и в достаточной степени эффективных агентов для повышения нефте- и конденсатоотдачи пластов;

2) существующие методы получения азота и его отделения от продукции скважин характеризуются высокой степенью изученности, простотой и доступностью;

3) практический опыт вкупе со значительным объемом теоретических исследований свидетельствует о положительном влиянии закачки азота на разработку месторождений углеводородов;

4) наличие в РФ крупных месторождений со значительными запасами конденсата увеличивает важность поиска эффективных методов увеличения конденсатоотдачи, одним из которых может стать закачка азота для поддержания давления в газоконденсатной залежи/шапке.

Список литературы/References

1. Abdulwahab H., Belhaj H. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. "Managing the breakthrough of injected nitrogen at a gas condensate reservoir in Abu Dhabi". Abu Dhabi, UAE, 2010.
2. Arevalo J.A., Samaniego F., Lopez F.F., Urquieta E. International Petroleum Conference & Exhibition of Mexico. "On the exploitation conditions of the Akai reservoir considering gas cap nitrogen injection". Villahermosa, Mexico, 1996.
3. Belhaj H., Abu Khalifesh H., Javid K. North Africa Technical Conference & Exhibition. "Potential of nitrogen gas miscible injection in South East Assets, Abu Dhabi". Cairo, Egypt, 2013.
4. Clancy J.P., Philcox J.E., Watt J., Gilchrist R.E. 36th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society. "Cases and economics for improved oil and gas recovery using nitrogen". Edmonton, Canada, 1985.
5. Huang W.W., Bellamy R.B., Ohnimus S.W. International Meeting of Petroleum Engineers. "A study of nitrogen injection for increased recovery from a rich condensate gas/volatile oil reservoir". Beijing, China, 1986.
6. Linderman J., Al-Jenaibi F., Ghorri S., Putney K., Lawrence J., Gallet M., Hohensee K. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. "Substituting nitrogen for hydrocarbon gas in a gas cycling project". Abu Dhabi, UAE, 2008.
7. Mayne C.J., Pendleton R.W. International Meeting of Petroleum Engineers. "Fordoche: an enhanced oil recovery project utilizing high-pressure methane and nitrogen injection". Beijing, China, 1986.
8. Sanger P.J., Bjornstad H.K., Hagoort J. SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition. "Nitrogen injection into stratified gas-condensate reservoirs". New Orleans, LA, USA, 1994.
9. Tiwari S., Kumar S. SPE Middle East Oil Show. "Nitrogen injection for simultaneous exploitation of gas cap". Bahrain, 2001.

Рецензенты:

Грачев С.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Сохошко С.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Моделирование и управление процессами нефтегазодобычи», Институт геологии и нефтегазодобычи, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.