

УДК 622.276.43

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-47-56

Научная статья

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ CO₂ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

С.В. АРЕФЬЕВ¹, А.Ю. БРУСЛОВ²,
А.В. ДЕНИСОВ²

¹ПАО «ЛУКОЙЛ», МОСКВА,

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

²РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Исследование посвящено технологии повышения нефтеотдачи пластов на основе внутрипластовой генерации двуокиси углерода, полученного в качестве продукта стехиометрической реакции газовыделяющего и газообразующего реагентов. Рассмотрены два направления совершенствования: обеспечение более равномерной генерации двуокиси углерода и повышение безопасности работ при закачке реагентов. Оба направления требуют существенного увеличения объемов закачки буферной воды, разделяющей растворы карбоната натрия и соляной кислоты, которые реагируют между собой при прямом контакте. Буферная вода при закачке в больших объемах, при смешении с растворами этих реагентов, существенно снижает концентрации, заданные на этапе приготовления растворов. Это также снижает концентрацию двуокиси углерода в водном растворе. В конечном итоге, снижаются концентрации реагентов и двуокиси углерода, требуемые для эффективной внутрипластовой генерации и распределения CO₂. Для предотвращения такого падения концентраций необходимо, на этапе приготовления объемов реагентов, корректировать, увеличивать их концентрации так, чтобы учитывать смешение с буферной водой и обеспечить концентрации, необходимые для стехиометрии в пластовых условиях. Такого увеличения концентраций достигают также и за счет уменьшения объемов растворов реагентов. В работе даны количественные оценки увеличения объемов буферной воды, влияния этого увеличения на снижение исходных концентраций реагентов и концентрацию двуокиси углерода в водных растворах. Предложены рабочие формулы для расчетов объемов буферной воды, скорректированных повышенных концентраций и уменьшенных объемов растворов реагентов на этапе их приготовления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: повышение нефтеотдачи, технология, внутрипластовой генерации двуокиси углерода, химические реагенты, пластовые условия

Original article

IMPROVEMENT OF IN-SITU CO₂ GENERATION TECHNOLOGY WITH COMPENSATION OF CHEMICALS CONCENTRATION TECHNOLOGICAL LOSSES

S.V. AREFIEV¹,
A.YU. BRUSLOV², A.V. DENISOV²

¹PAO «LUKOIL», MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

²RUSSIAN STATE GEOLOGICAL EXPLORATION
UNIVERSITY AFTER SERGO ORDZHONIKIDZE,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The paper is about the enhanced oil recovery technology, based on in-situ carbon dioxide generation, after stoichiometric reaction between gas releasing chemical agent and gas producing one. Two ways of technology improvement are considered: for more uniform in-situ CO₂ generation and for more safety when chemicals injection. Both ways require sufficient increase of buffer water, which divides reactive chemicals. Larger buffer water volumes, when being mixed with chemicals water solutions, sufficiently drop down chemical concentration. It also decreases CO₂ concentration in water solution. Finally, chemicals and CO₂ concentrations, for in-situ generation, decrease. To prevent such decrease, it is necessary to adjust, increase chemicals concentration, when preparing chemical water solution, so to consider further dilution in buffer water and to ensure required stoichiometric concentration in reservoir conditions. Increase of chemicals concentration can be also from decrease of chemicals solutions volumes. Quantitative estimates are given for increase of buffer water volumes, for impact of such increase on decrease of initial chemicals concentrations and decrease of CO₂ concentration, in water solutions, as well.

Working formulas are provided for calculations on buffer water volumes, adjusted, increased concentrations and decrease volumes of chemicals water solutions, at their preparation stage.

KEY WORDS: enhancement of oil recovery, technology, in-situ carbon dioxide generation, formation conditions, chemical reagents

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние проблемы низких значений коэффициента нефтеотдачи «зрелых» месторождений, увеличение доли трудноизвлекаемых запасов в активах нефтегазодобывающих предприятий подтверждает актуальность задачи селекции и выбора эффективных технологий повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти, в том числе, с использованием двуокиси углерода [1–16]. Технология внутрипластовой генерации двуокиси углерода с применением газовыделяющего и газообразующего агентов [10, 14] включает поочередную закачку порций газовыделяющего водного карбоната натрия и газообразующего водного раствора соляной кислоты в нагнетательные скважины, с закачкой разделяющих порций буферной воды. Порции буферной воды предназначены для исключения смешения перечисленных реагентов в нагнетательных скважинах и наземных коммуникациях. На практике объем закачиваемых порций буферной воды, как правило, не превышает двух-трех кубометров. Суммарные объемы порций реагентов достигают сотен кубометров. Число порций реагентов равного объема – в основном две.

Буферная вода, попадая в пласт и размещаясь между порциями реагентов, разбавляет эти порции и приводит к снижению концентраций реагентов и количеств генерируемой двуокиси углерода на единицу объема закаченных реагентов. Тем не менее расчеты количеств, концентраций, приготовление и закачку реагентов до последнего времени вели без учета их разбавления в порциях буферной воды. Это было связано с тем, что общее число закачиваемых порций реагентов в основном не превышало двух и объемы закачиваемых порций буферной воды были несопоставимо малы по отношению к общим объемам порций реагентов.

Технология внутрипластовой генерации двуокиси углерода, с применением газовыделяющего и газообразующего агентов (реагентов), может быть усовершенствована. Одним из направлений совершенствования может быть обеспечение большего, более равномерного охвата зоны смешения реагентов генерируемой двуокисью углерода. Более равномерный охват сможет обеспечить лучшее распределение двуокиси углерода в жидком продукте реакции (водном растворе хлорида натрия) и исключить возможные спонтанные выбросы и потери свободной фазы двуокиси углерода в зоне реакции. Для обеспечения более равномерного охвата наиболее доступным решением представляется дробление порций реагентов на более мелкие. В этом случае создается не одна две обширных зоны смешения и реакций, генерации двуокиси углерода, а большее число более мелких зон. Такое увеличение числа зон смешения потребует увеличения числа порций реагентов и, соответственно, увеличения числа разделяющих порций буферной воды. Например, при

С.В. АРЕФЬЕВ,
А.Ю. БРУСЛОВ, А.В. ДЕНИСОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ CO_2 С
КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

общем числе порций реагентов четыре, понадобится не одна, а три разделяющие порции буферной воды. При общем числе порций реагентов шесть или восемь понадобится соответственно закачка уже пяти или восьми порций буферной воды. При общем числе 12 порций реагентов понадобится закачка 11 порций разделяющей буферной воды.

Смешение реагентов, при их прямом контакте в поверхностных условиях, сопровождается интенсивным пенообразованием с участием углекислого газа. Прямые контакты водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты в закрытых коммуникациях будут сопровождаться повышением давления в зонах реакции, потерями и выбросами углекислого газа, представляющими опасность для здоровья работающего персонала.

С учетом максимального соблюдения требований промышленной безопасности, охраны здоровья и окружающей среды, необходимо предотвращать и исключать риски локального повышения давления и выбросов углекислого газа во всех местах, кроме прискважинных частей пласта, куда осуществляется закачка реагентов, предусмотренных технологией внутрипластовой генерации CO_2 . Кроме того, возможные выбросы двуокиси углерода в наземных коммуникациях и/или стволе скважин приведут к потерям двуокиси углерода, предназначенной для генерации в пластовых условиях.

С учетом этого, для безопасной и полноценной реализации технологии внутрипластовой генерации CO_2 , объем каждой порции буферной воды должен включать суммарный объем коммуникаций по приготовлению и закачке реагентов, начиная от емкостей с реагентами, продолжая насосным оборудованием, запорно-регулирующей арматурой и заканчивая соединяющими трубопроводами и трубами в нагнетательных скважинах, от устья и до интервала закачки реагентов в пласт. В этом случае объемы каждой порции буферной воды, в зависимости от глубин скважин, схем расстановки оборудования и коммуникаций для закачки реагентов, будут значительно превышать дватри кубометра, в том числе превышать объем в 10 м^3 .

С учетом всего этого, оптимизация технологии внутрипластовой генерации двуокиси углерода, с увеличением числа порций реагентов и повышением безопасности их закачки, потребует большего числа порций буферной воды и объемов каждой порции буферной воды. В таком случае общий объем буферной воды будет многократно превышать практикуемые объемы и составлять существенную величину от общего объема порций реагентов.

Концентрации приготовленных на поверхности реагентов, за счет разбавления в больших объемах разделяющей буферной воды, будут снижаться. В пластовых условиях смешения концентрации разбавленных растворов реагентов могут стать существенно меньше

тех, что предусмотрены технологией внутривластовой генерации двуокиси углерода.

С учетом этого, при приготовлении растворов реагентов их концентрации нужно увеличивать по отношению к расчетным для реакции, таким образом, чтобы, с учетом падения концентраций при разбавлении в буферной воде, концентрации в пластовых условиях соответствовали расчетным стехиометрическим для реакции.

В случае, если общий объем порций буферной воде существенен, от 10% и более от общего объема порций реагентов корректировка в сторону уменьшения нужна и для объемов реагентов при их приготовлении. За счет добавления буферной воды, общий объем реагентов и буферной воды будет больше общего расчетного объема реагентов для реакции. Поэтому общий объем растворов реагентов в условиях приготовления нужно уменьшать на величину общего объема буферной воды.

Более подробно вопросы оценки влияния объемов буферной воды на снижение концентраций приготовленных растворов реагентов, за счет разбавления буферной водой, а также вопросы коррекции концентраций и объемов растворов реагентов при их приготовлении, с учетом разбавления приготовленных растворов буферной водой, рассмотрены ниже.

Рассмотрены различные варианты закачки порций реагентов и буферной воды, при разном числе циклов закачки порций реагентов равного объема. Одноцикловая закачка включает один цикл последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты, при равенстве объемов порций реагентов. Двухцикловая закачка включает два цикла последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты, при равенстве объемов порций реагентов и общем их объеме, равном общему объему при одноцикловой закачке. При двухцикловой закачке общее количество чередующихся порций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты составляет четыре (два раза по две), а общее количество разделяющих порций буферной воды составляет три. Трехцикловая закачка включает три цикла последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты при равенстве объемов порций реагентов и общем их объеме, равном общему объему при одноцикловой закачке. При трехцикловой закачке общее количество чередующихся порций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты составляет шесть (три раза по две), а общее количество разделяющих порций буферной воды составляет пять. Четырехцикловая закачка включает че-

тыре цикла последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты, при равенстве объемов порций реагентов и общем их объеме, равном общему объему при одноцикловой закачке. При четырехцикловой закачке общее количество чередующихся порций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты составляет восемь (четыре раза по две), а общее количество разделяющих порций буферной воды составляет девять.

При контакте водные растворы карбоната натрия и соляной кислоты активно вступают в реакцию с выделением двуокиси углерода, образованием хлорида натрия и воды. Хорошо известная реакция и стехиометрические соотношения компонентов – на примере карбоната натрия Na₂CO₃ с молекулярной массой 106, соляной кислоты HCl с молекулярной массой 35,5 – при таком контакте представлены ниже.



Продуктами реакции здесь являются хлорид натрия NaCl с молекулярной массой 58,5, двуокись углерода CO₂ с молекулярной массой 44 и вода.

При полном расходовании на реакцию соотношение количеств реагентов и продуктов реакции будет равно соотношению их молекулярных масс с учетом уравнивающих коэффициентов в формуле реакции, то есть будет стехиометрическим соотношением. Здесь из 106 т Na₂CO₃ и 2×35,5=73 т HCl получится 44 т CO₂, 2×58,5=117 т хлорида натрия и 18 т воды. Если эти количества привести к 1 т Na₂CO₃, то из 1 т Na₂CO₃ и 2×35,5/106=73/106=0,689 т HCl получится 44/106=0,415 т CO₂, 2×58,5/106=1,104 т хлорида натрия и 18/106=0,170 т воды. В реакции на 44 т двуокиси углерода приходится 106 т карбоната натрия и 73 т соляной кислоты. На одну тонну двуокиси углерода будет приходится соответственно 106/44=2,41 т карбоната натрия и 73/44=1,66 т соляной кислоты.

Для максимально безопасной закачки реагентов в скважину общий объем буферной воды V_{вб} будет определяться внутренним объемом V_{ку} линий закачки до устья скважины (от емкости приготовления до насоса, далее от насоса до устья скважины) и внутренним объемом V_{тс} труб скважины, от устья скважины до интервала закачки химреагентов и на длине h_{тс} труб закачки с их внутренним диаметром D_{тв}. Это условие можно выразить в виде:

$$V_{вб} = V_{ку} + V_{тс} = V_{ку} + \frac{\pi \times (D_{тв}^2) \times h_{тс}}{4} \quad (2)$$

Например, в случае закачки химреагентов в НКТ диаметром 89 мм, внутренним диаметром 73 мм на длине труб 3400 м, внутренним объемом V_{тс} труб НКТ в 14,2 м³ и суммарным объемом линий устьевых

коммуникаций $V_{ку}$ в $2,3 \text{ м}^3$, объем одной порции буферной воды составит $16,5 \text{ м}^3$.

Если в расчетах требуемых количеств и концентраций реагентов (растворов водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты) объемы, количества буферной воды не учитывать, то общее количество растворов, с добавкой буферной воды, будет больше расчетного для раствора минерализованной воды, насыщенной CO_2 , на величину объема буферной воды. При этом конечные концентрации реагентов, за счет разбавления в буферной воде, будут меньше расчетных.

При фактическом снижении концентрации реагентов, за счет их разбавления в буферной воде, концентрация генерируемой двуокиси углерода в водном растворе также снижается. Это уменьшает способность водного раствора с CO_2 вытеснять нефть.

В общем случае, для оценки относительного снижения $\Delta C_{рc}^*$ массовой концентрации реагента в водном растворе, при абсолютном снижении $\Delta C_{рc}$ от расчетной $C_{р}$ для реакции до $C_{рр}$ после разбавления объема $V_{р}$ реагента, приготовленного для реакции, объемом $V_{вб}$ буферной воды можно использовать формулу в объемных величинах:

$$\Delta C_{рc}^* = \frac{\Delta C_{рc}}{C_{р}} = \frac{C_{р} - C_{рр}}{C_{р}} \approx 1 - \frac{V_{р}}{V_{р} + V_{вб}} \quad (3)$$

Например, в случае одноциклового последовательной закачки одной 250 м^3 порции водного раствора карбоната натрия Na_2CO_3 , одной 250 м^3 порции соляной кислоты HCl , общем объеме химреагентов в 500 м^3 для Na_2CO_3 с начальной стехиометрической концентрацией $12,4\%$ и условной плотностью 1 т/м^3 , его стехиометрическая масса составит $250 \times 0,124 = 31 \text{ т}$. При одноциклового закачке применяют только одну порцию разделяющей буферной воды. При объеме одной порции буферной воды в $16,5 \text{ м}^3$ этот объем составит $0,033$, или $3,3\%$ от общего объема закачиваемых реагентов в 500 м^3 .

При объеме одной порции буферной пресной воды в $16,5 \text{ м}^3$ масса карбоната натрия в 31 т растворится не в 250 м^3 а в $250 + 16,5 = 266,5 \text{ м}^3$ раствора. Конечная концентрация Na_2CO_3 с учетом разбавления в одном объеме порции буферной воды будет $31/266,5 = 0,116 = 11,6\%$. Снижение концентрации относительно стехиометрической будет $12,4 - 11,6 = 0,8\%$. Это снижение относительно начальной концентрации составит $0,8/12,4 = 0,065 = 6,5\%$.

Для двухциклового закачки, с двумя циклами чередующейся закачки четырех порций реагентов по 125 м^3 , раствор Na_2CO_3 будет разбавляться уже в трех объемах порций буферной воды с общим объемом $3 \times 16,5 = 49,5 \text{ м}^3$, или $49,5 \text{ т}$. Объем буферной воды составит уже $0,099$, или $9,9\%$ от общего объема

С.В. АРЕФЬЕВ,
А.Ю. БРУСЛОВ, А.В. ДЕНИСОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ CO_2 С
КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

закачиваемых реагентов. В этом случае конечная концентрация в разбавленном растворе Na_2CO_3 будет $31/(250+49,5) = 31/299,5 = 0,104$, или $10,4\%$. Снижение концентрации относительно расчетной стехиометрической будет $12,4\% - 10,4\% = 2,0\%$. Это снижение относительно начального составит уже $2,0/12,4 = 0,161 = 16,1\%$. Такое снижение выше порогового в 10% , которое считается нижним порогом существенного. Это требует коррекции в расчетах начальной стехиометрической концентрации карбоната натрия в водном растворе.

Для трехциклового закачки с шестью порциями реагентов по $83,3 \text{ м}^3$, где приготовленный на поверхности раствор Na_2CO_3 , закачанный в виде трех порций, будет разбавляться уже в пяти объемах буферной воды с массой $5 \times 16,5 = 82,5 \text{ т}$. Объем буферной воды составит уже $0,165$, или $16,5\%$ от общего объема закачиваемых реагентов. В этом случае общий конечный объем водного раствора карбоната натрия составит $250 + 82,5 = 332,5 \text{ т}$, конечная концентрация карбоната натрия будет $31/332,5 = 0,093 = 9,3\%$. Потери концентрации на разбавление составят уже $12,4 - 9,3 = 3,1\%$. Относительные потери составят $3,1/12,4 = 25\%$.

При четырехциклового закачки с восьмью порциями реагентов по $62,5 \text{ м}^3$, разбавлении четырех порций раствора Na_2CO_3 в семи порциях буферной воды в количестве по $16,5 \text{ м}^3$, или $16,5 \text{ т}$ каждая, общее количество буферной воды составит $7 \times 16,5 = 115,5 \text{ м}^3$ или тонн при условной плотности раствора в 1 т/м^3 . Объем буферной воды составит $0,231$, или $23,1\%$ от общего объема реагентов. В этом случае общий конечный объем водного раствора карбоната натрия составит $250 + 115,5 = 365,5 \text{ т}$, конечная концентрация карбоната натрия будет $31/365,5 = 0,085 = 8,5\%$.

Снижение концентрации за счет разбавления в буферной воде будет $12,4 - 8,5 = 3,9\%$. Это снижение относительно начальной концентрации составит $3,9/12,4 = 0,315 = 31,5\%$.

Аналогичные данные получены по снижению расчетной стехиометрической $8,8\%$ концентрации для водного раствора соляной кислоты объемом 250 м^3 и стехиометрической массой соляной кислоты в $21,5 \text{ т}$. Для одноциклового закачки реагентов концентрация соляной кислоты в разбавленном растворе составляет $8,1\%$ при снижении $0,7$ относительно $8,8\%$ без учета разбавления и относительном снижении $0,7/8,8 = 0,0795$, или $7,95\%$. Для двухциклового закачки концентрация соляной кислоты в разбавленном растворе составляет $7,2\%$ при снижении $1,6$ относительно $8,8\%$ без учета разбавления и относительном снижении $1,6/8,8 = 0,1818$ или $18,2\%$. Для трехциклового закачки реагентов концентрация соляной кислоты в разбавленном растворе составляет $6,5\%$ при снижении $2,3$ относительно $8,8\%$ без учета разбавления и относительном снижении $2,3/8,8 = 0,1818$, или $26,1\%$. Для четырехциклового закачки реагентов концентра-

ция соляной кислоты в разбавленном растворе составляет 5,9% при снижении 2,9 относительно 8,8% без учета разбавления и относительном снижении $2,9/8,8 = 0,3295$, или 33,0%.

Снижение концентраций реагентов приводит и к общему снижению концентрации CO₂, генерируемой и распределенной в продукте реакции, водном растворе хлорида натрия (NaCl). Для рассматриваемого примера в пластовых условиях 1 м³ раствора NaCl полностью насыщается CO₂ в объеме 13 нм³. 500 м³ раствора NaCl вместит $500 \times 13 = 6500$ нм³ двуокиси углерода.

Плотность двуокиси углерода при нормальных условиях составляет 1,977 кг/м³. Тогда масса CO₂ для объема 6500 нм³ составит $6500 \times 1,977 = 12850,1$ кг = 12,85 т. Без учета незначительного количества воды как продукта реакции реагентов и без учета добавления буферной воды к раствору хлорида натрия, это количество должно распределиться в объеме 500 м³ и массой 500 т (при допущении о плотности раствора в 1 т/м³). Общее количество раствора NaCl с растворенным CO₂ составит $500 + 12,85 = 512,85$ т. В этом случае концентрация CO₂ в растворе составит $12,85/512,85 = 0,025 = 2,5\%$ мас.

При одноцикловогой закачке реагентов, с учетом разбавления в объеме одной порции буферной воды 16,5 м³ и массой 16,5 т, это количество распределится в $512,85 + 1 \times 16,5 = 512,85 + 16,5 = 529,35$ т. Концентрация CO₂ в разбавленном растворе NaCl составит $12,85/529,35 = 0,0242 = 2,4\%$. Снижение концентрации CO₂ за счет разбавления будет $2,5 - 2,4 = 0,1\%$. Снижение относительно начальной расчетной концентрации будет $0,1/2,5 = 0,04 = 4\%$.

При двухцикловогой закачке реагентов, и разбавлении в трех буферных объемах в количестве $3 \times 16,5 = 49,5$ м³, или 49,5 т, общем количестве раствора $512,85 + 49,5 = 562,35$ т, итоговая концентрация CO₂ будет $12,85/562,35 = 0,0228 = 2,3\%$. Снижение концентрации CO₂ за счет разбавления будет $2,5 - 2,3 = 0,2\%$. Снижение относительно начальной расчетной концентрации будет $0,2/2,5 = 0,08 = 8\%$.

При трехцикловогой закачке реагентов и разбавлении в пяти объемах буферной воды двуокись углерода в количестве 12,85 т распределится в массе разбавленного раствора $512,85 + 5 \times 16,5 = 512,85 + 82,5 = 595,35$ т. Концентрация CO₂ в разбавленном растворе составит $12,85/595,35 = 0,022 = 2,2\%$. Снижение концентрации от разбавления будет $2,5 - 2,2 = 0,3\%$. Снижение относительно исходно расчетной величины концентрации будет $0,3/2,5 = 0,12 = 12\%$.

При четырехцикловогой закачке реагентов и разбавлении в семи объемах буферной воды двуокись углерода в количестве 12,85 т распределится в массе разбавленного раствора $512,85 + 7 \times 16,5 = 512,85 + 115,5 = 628,35$ т. Концентрация CO₂ в разбавленном растворе составит $12,85/628,35 = 0,0204 = 2,0\%$. Снижение концен-

трации от разбавления будет $2,5 - 2,0 = 0,5\%$. Снижение относительно исходной расчетной величины концентрации будет $0,5/2,5 = 0,20 = 20\%$.

Сводные данные по снижению концентраций реагентов и двуокиси углерода от разбавления буферной водой, для общего объема порций закачиваемых реагентов в 500 м³, и объеме каждого в 250 м³, представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Как видно из табл. 1 и графиков, разбавление буферной водой реагентов и раствора хлорида натрия с двуокисью углерода приводит к ощутимому, 7–32% снижению концентраций относительно расчетных для реакции. Поэтому реагенты перед закачкой нужно готовить с учетом снижения концентраций в связи с разбавлением буферной водой.

С учетом разбавления буферной водой, количества, концентрации закачиваемых водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты нужно корректировать. Буферная вода будет разбавлять как сами порции водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты, так и сформированную систему из водного раствора хлорида натрия, насыщенного двуокисью углерода.

В общем случае, для расчета скорректированных объемов V_{рк} реагентов на этапе их приготовления, при известных общем объеме V_{ро} реагентов и объеме буферной воды V_{вб} в пластовых условиях, можно пользоваться выражением:

$$V_{\text{рок}} = V_{\text{ро}} - V_{\text{вб}}. \quad (4)$$

Для расчета скорректированных равных объемов V_{рк} реагентов, при известных общем объеме V_{ро} реагентов для реакции и объема V_{вб} буферной воды, можно пользоваться выражением:

$$V_{\text{рк}} = \frac{V_{\text{рок}}}{2} = \frac{V_{\text{ро}} - V_{\text{вб}}}{2}. \quad (5)$$

Оценку снижения ΔV_{рк} скорректированных объемов реагентов V_{рк} на этапе приготовления, относительно расчетных равных объемов V_р для реакции можно вести из выражения

$$\Delta V_{\text{рк}} = V_{\text{р}} - V_{\text{рк}} = \frac{V_{\text{ро}}}{2} - \frac{V_{\text{ро}} - V_{\text{вб}}}{2} = \frac{V_{\text{вб}}}{2}. \quad (6)$$

Оценку относительного снижения ΔV_{рк}* скорректированных объемов реагентов V_{рк} на этапе приготовления, относительно расчетных объемов V_р для реакции, можно вести из выражения:

$$\Delta V_{\text{рк}} * = \frac{\Delta V_{\text{рк}}}{V}. \quad (7)$$

Оценивать скорректированную S_{рк} массовую концентрацию реагента на этапе приготовления, с учетом материального баланса, известных расчетной S_р массовой концентрации реагента для реакции, скор-

ТАБЛИЦА 1.

Снижение концентраций реагентов и растворенной двуокиси углерода при разбавлении буферной водой

№	Технология закачки	Снижение концентраций в растворах за счет разбавления буферной водой					
		Водный раствор Na ₂ CO ₃		Водный раствор HCl		CO ₂ в водном растворе хлорида натрия	
		Концентрация, % мас.	Относительное снижение, %	Концентрация, % мас.	Относительное снижение, %	Концентрация, % мас.	Относительное снижение, %
1	1-цикловая, без учета разбавления в буферной воде	12,4	0	8,8	0	2,5	0
2	1-цикловая, с учетом разбавления, 1 порция буферного объема воды	11,6	6,5	8,1	8,0	2,4	4
3	2-цикловая, с учетом разбавления, 3 порции буферных объемов воды	10,4	16,1	7,2	18,2	2,3	8
4	3-цикловая, с учетом разбавления, 5 порций буферных объемов воды	9,3	25,0	6,5	26,1	2,2	12
5	4-цикловая, с учетом разбавления, 7 порций буферных объемов воды	8,5	31,5	5,9	33,0	2,0	20

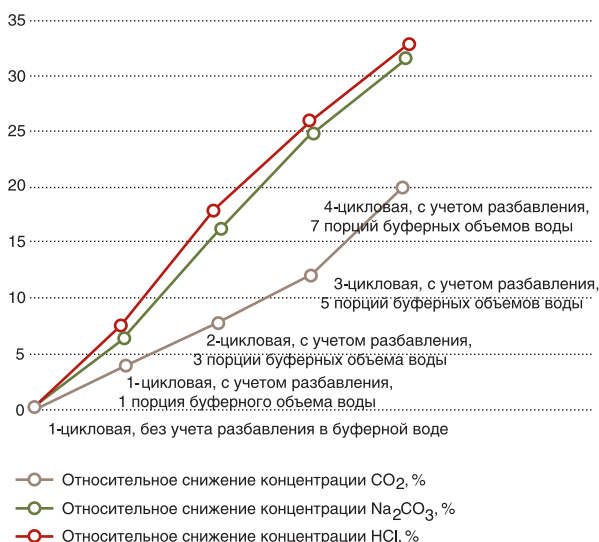


РИС. 1.

Снижение концентраций реагентов в растворах за счет разбавления буферной водой

ректированного объема каждого реагента $V_{рк}$ как половины объема $V_{рок}$ при общем объеме системы $V_{ро}$ и объеме буферной воды $V_{вб}$, можно из выражения:

$$C_{рк} \approx C_{р} \times \frac{V_{р}}{V_{рк}} \approx 2 C_{р} \times \frac{V_{р}}{V_{ро} - V_{вб}}. \quad (8)$$

Оценивать абсолютное увеличение $\Delta C_{рк}$ скорректированной концентрации $C_{рк}$ реагентов на этапе приготовления, относительно расчетной концентрации $C_{р}$ для реакции в пластовых условиях можно по формуле:

$$\Delta C_{рк} = C_{рк} - C_{р} = C_{р} \times \frac{V_{р}}{V_{рк}} - 1. \quad (9)$$

Оценивать относительное увеличение $\Delta C_{рк}^*$ скорректированной концентрации $C_{рк}$ реагентов на этапе приготовления, относительно расчетной концентрации $C_{р}$ для реакции в пластовых условиях можно по формуле:

$$\Delta C_{рк}^* = \frac{\Delta C_{рк}}{C_{р}} = \frac{C_{рк}}{C_{р}} \times \left(\frac{V_{р}}{V_{рк}} - 1 \right) = \frac{V_{р}}{V_{рк}} - 1. \quad (10)$$

В случае одноциклового закачки, из рассмотренного выше примера, общий объем системы из реагентов и буферной воды должен составить 500 м³. С учетом объема одной порции буферной воды в 16,5 м³, на общий объем для приготовления порций реагентов будет приходиться 500 – 16,5 = 483,5 м³. Относительное уменьшение объема реагентов для приготовления в относительных единицах составит 16,5/500 = 0,033 = 3,3%.

Для реагентов (водный раствор Na₂CO₃ и водный раствор HCl) в равных объемах и стехиометрических количествах общий объем каждого реагента – это половина объема для смешения. Поэтому объем общей порции каждого реагента для приготовления составляет 483,5/2 = 241,8 м³. При условной плотности растворов в 1 т/м³ массы этих порций также составляют 241,8 т по каждому реагенту.

Для системы объемом в 500 м³, сгенерированной равными порциями реагирующих водных растворов карбоната натрия Na₂CO₃ с концентрацией 12,4% и соляной кислоты HCl с концентрацией 8,8%, понадобится 31 т Na₂CO₃ и 21,5 т HCl. С учетом снижения концентрации за счет разбавления в одной порции буферной воды, 31 т Na₂CO₃ должна раствориться во время приготовления раствора на поверхности не в 250 м³, а в 241,8 м³, или 241,8 т раствора. В этом случае массовая концентрация карбоната натрия долж-

на быть $31/241,8=0,128=12,8\%$. Аналогично, 21,5 т соляной кислоты нужно растворить в 241,8 м³, или 241,8 т раствора. Для этого массовая концентрация HCl должна быть $21,5/241,8=0,089=8,9\%$. Сравнение таких концентраций реагентов с теми, что не учитывали потери концентраций на разбавление в буферной воде (соответственно 12,4% для Na₂CO₃ и 8,8% для HCl), показывает, что откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $12,8-12,4=0,4\%$ с относительным значением этого превышения в $0,4/12,4=0,032=3,2\%$. Аналогично, откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $8,9-8,8=0,1\%$ с относительным значением этого превышения в $0,1/8,8=0,008=1,0\%$.

Для двухциклового закачки понадобится три порции буферной воды объема $3 \times 16,5=49,5$ м³. С учетом общего объема системы из реагентов и буферной воды в 500 м³ в пластовых условиях, общий объем для приготовления реагентов будет $500-49,5=450,5$ м³ и с массой, при условной плотности растворов в 1 т/м³, в 450,5 т. Относительное уменьшение общего объема для приготовления реагентов, с учетом дополнительных 49,5 м³ буферной пресной воды в пластовых условиях, составит $49,5/500=0,099=9,9\%$. Общий объем каждого реагента (раствора Na₂CO₃ и раствора HCl) для смешения будет составлять $450,5/2=225,3$ м³, или 225,3 т. В 225,3 т раствора Na₂CO₃ понадобится растворить 31 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $31/225,3=0,138=13,8\%$. Здесь откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $13,8-12,4=1,4\%$ с относительным значением этого превышения в $1,4/12,4=0,113=11,3\%$. Аналогично, в 225,3 т раствора HCl понадобится растворить 21,5 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $21,5/225,3=0,0954=9,5\%$. Откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $9,5-8,8=0,7\%$ с относительным значением этого превышения в $0,7/8,8=0,0795=8,0\%$.

Для трехциклового закачки понадобится 5 объемов буферной воды объема $5 \times 16,5=82,5$ м³. С учетом общего объема системы из реагентов и буферной воды в 500 м³ в пластовых условиях, общий объем для приготовления реагентов будет $500-82,5=417,5$ м³ с массой, при условной плотности растворов в 1 т/м³, в 417,5 т. Относительное уменьшение общего объема для приготовления реагентов, с учетом разбавления в 82,5 м³ буферной воды, составит $82,5/500=0,165=16,5\%$. Общий объем порций каждого реагента водного раствора

Na₂CO₃ и водного раствора HCl), для приготовления будет составлять $417,5/2=208,8$ м³ с массой 208,8 т. В 208,8 т раствора Na₂CO₃ понадобится растворить 31 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $31/208,8=0,148=14,8\%$. Здесь откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $14,8-12,4=2,4\%$ с относительным значением этого превышения в $2,4/12,4=0,194=19,4,0\%$. Аналогично в 208,8 т раствора HCl понадобится растворить 21,5 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $21,5/208,8=0,103=10,3\%$. Откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $10,3-8,8=1,5\%$ с относительным значением этого превышения в $1,5/8,8=0,171=17,1\%$.

Для четырехциклового закачки понадобится семь объемов буферной воды общего объема $7 \times 16,5=115,5$ м³. С учетом общего объема системы из реагентов и буферной воды в 500 м³ в пластовых условиях, общий объем для приготовления реагентов будет $500-115,5=384,5$ м³ с массой, при условной плотности растворов в 1 т/м³ в 384,5 т. Относительное уменьшение общего объема для приготовления реагентов, с учетом разбавления в 82,5 м³ буферной воды, составит $115,5/500=0,231=23,1\%$. Общий объем порций каждого реагента (раствора Na₂CO₃ и раствора HCl) для приготовления будет $384,5/2=192,3$ м³, или 192,3 т. В 192,3 т раствора Na₂CO₃ понадобится растворить 31 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $31/192,3=0,161=16,1\%$. Здесь откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $16,1-12,4=3,7\%$ с относительным значением этого превышения в $3,7/12,4=0,298=29,8\%$. Аналогично в 192,3 т раствора HCl понадобится растворить 21,5 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $21,5/192,3=0,112=11,2\%$. Откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $11,2-8,8=2,4\%$ с относительным значением этого превышения в $2,4/8,8=0,273=27,3\%$.

Полученные результаты оценочных расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Как видно из табл. 2, коррекция объемов и концентраций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты может достигать 3–23% в сторону уменьшения для объемов и 7–30% в сторону увеличения для концентраций.

Таким образом, с целью сокращения потерь количеств, концентраций закачиваемых реагентов и генерируемой в пласте двуокиси углерода, необхо-

ТАБЛИЦА. 2.

Откорректированные объемы и концентрации реагентов на этапе приготовления

№	Технология закачки	Откорректированные значения количеств и концентраций реагентов (с учетом участия буферной воды в формировании газонасыщенной оторочки и разбавления растворов реагентов, приготовленных на поверхности)							
		Раствор Na ₂ CO ₃				Раствор HCl			
		Объем для приготовления, м ³		Концентрация для приготовления, % мас		Объем для приготовления, м ³		Концентрация для приготовления, % мас	
		Откорректированная величина	Относительное уменьшение за счет коррекции, %	Откорректированная величина	Относительное увеличение за счет коррекции, %	Откорректированная величина	Относительное уменьшение за счет коррекции, %	Откорректированная величина	Относительное увеличение за счет коррекции, %
1	1-цикловая, без учета буферных объемов	250	0	12,4	0	250	0	8,8	0
2	1-цикловая, с учетом разбавления, 1 порция буферных объемов воды	241,8	3,3	12,8	3,2	241,8	3,3	8,9	1,0
3	2-цикловая, с учетом разбавления, 3 порции буферных объема воды	225,3	9,9	13,8	11,3	225,3	9,9	9,5	8,0
4	3-цикловая, с учетом разбавления, 5 порций буферных объемов воды	208,8	16,5	14,8	19,4	208,8	16,5	10,3	17,1
5	4-цикловая, с учетом разбавления, 7 порций буферных объемов воды	192,3	23,1	16,1	29,8	192,3	23,1	11,2	27,3

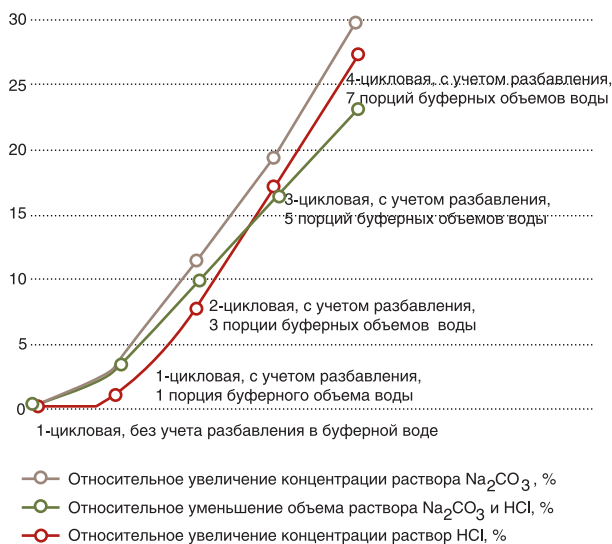


РИС. 2.

Относительные изменения объемов и концентраций при их коррекции на этапе приготовления реагентов

дима коррекция: объемов реагентов, предназначенных для внутривластовой генерации двуокиси углерода, – в сторону уменьшения, а расчетные концентрации реагентов – в сторону увеличения. Кор-

рекция должна количественно учитывать увеличение объемов растворов, снижение концентраций реагентов и генерируемой двуокиси углерода за счет разбавления в буферной воде.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оптимизации технологии внутривластовой генерации CO₂, с применением газовыделяющего и газообразующего реагентов, для более равномерного смешения химреагентов в пласте число порций закачиваемых реагентов, при сохранении общего объема порций, целесообразно увеличивать с двух до шести, восьми и более.

Большее число закачиваемых порций реагентов требует закачки большего числа порций и объемов буферной воды, разделяющей порции реагентов.

Совершенствование технологии внутривластовой генерации CO₂, с применением газовыделяющего и газообразующего реагентов, для максимального соблюдения норм промышленной безопасности, охраны здоровья и окружающей среды, требует увеличивать объемы порций буферной воды до максимальных величин.

Увеличение числа и объемов порций буферной воды, разбавление в них растворов карбоната натрия и соляной кислоты, потери исходных концентраций реагентов и генерируемой двуокиси углерода в связи

с таким разбавлением необходимо корректировать на этапе приготовления водных растворов реагентов, путем увеличения исходных концентраций и уменьшения объемов относительно требуемых для внутрипластовой генерации двуокиси углерода.

Предложена оценочная формула для определения объема одной порции буферной воды, достаточного для максимального соблюдения требований промышленной безопасности, охраны здоровья и окружающей среды. Такой объем может значительно превышать объем порций буферной воды, реализуемых на практике.

Показано, что объемы буферной воды могут достигать от нескольких до десятков процентов от объемов реагентов, а разбавление буферной водой растворов реагентов и раствора хлорида натрия с двуокисью углерода приводит к осязаемому, 7–32% снижению концентраций относительно расчетных для реакции по внутрипластовой генерации CO₂. Поэтому растворы реагентов перед закачкой нужно готовить с учетом снижения концентраций в связи с дополнительным разбавлением буферной водой.

Предложена формула для оценок снижения расчетных концентраций водных растворов реагентов, необходимых для внутрипластовой генерации двуокиси углерода, за счет дополнительного разбавления растворов в буферной воде.

Предложены формулы для коррекции объемов и концентраций реагентов на этапе их приготовления, относительно объемов и концентраций, требуемых для генерации двуокиси углерода в пластовых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балаян Г.Г., Дмитриевский А.Н., Комков Н.И., Бруслов А.Ю. Разработка моделей перспективных технологий нефтеизвлечения углеводородов / Организация и управление наукой в условиях интенсификации. М.: АН СССР, ИЭП НТП. 1989. С. 37–59.
2. Брезицкий С.В., Джафаров И.С., Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х. Способ разработки нефтяной залежи. Патент на изобретение RU 2142557 С1, 10.12.1999. Заявка № 99113100/03 от 29.06.1999.
3. Бруслов А.Ю. Разработка метода определения фазовых подвижностей и степени извлечения нефтей при вытеснении их из пластов оторочками жидкой двуокиси углерода. Дис. на соискание уч-ой ст. к.т.н. М.: МИНГ им. И.М. Губкина. 1985. 132 с.
4. Мандрик И.Э., Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х. Научно-методические и технологические основы оптимизации процесса повышения нефтеотдачи пластов. М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство». 2010. 228 с.
5. Шахвердиев А.Х. Еще раз о нефтеотдаче // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. С. 44–48.
6. Шахвердиев А.Х. Некоторые концептуальные аспекты системной оптимизации разработки нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2017. № 2. С. 58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-58-63
7. Шахвердиев А.Х. Системная оптимизация процесса разработки нефтяных месторождений. М.: Недра. 2004. 452 с.
8. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбцкая А.П. Моделирование залежей нефти с позиции системной оптимизации процессов // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 19–23.
9. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбцкая А.П., Галушко В.В. Способ определения местоположения застойных и слабодренлируемых зон нефтяной залежи. Патент на изобретение RU 2105136 С1, 20.02.1998. Заявка № 97114425/03 от 03.09.1997.
10. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2244110 С1. Опубликовано: 2005.01.10.
11. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М. Синергетические эффекты при системном воздействии на залежь термо-реохимическими методами // Нефтяное хозяйство. 2002. № 11. С. 61–65.
12. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М., Мандрик И.Э., Бахтияров С.И. Интегративная эффективность воздействия на пласт при внутрипластовой генерации газа // Нефтяное хозяйство. 2006. № 11. С. 76–80.
13. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Курбанов Р.А., Матвеев К.А. Способ разработки нефтяной залежи. Патент на изобретение RU 2123586 С1, 20.12.1998. Заявка № 97109102/03 от 16.06.1997.
14. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Чукчев О.А., Галеев Ф.Х. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2125154 С1. Опубликовано: 1999.01.20.
15. GUMERSKY Kh.Kh., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.Kh., MAMEDOV Yu.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery / Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France, 2000. P. 499–504.
16. SHAKHVERDIEV A.Kh., SHESTOPALOV Yu.V. Qualitative analysis of quadratic polynomial dynamical systems associated with the modeling and monitoring of oil fields // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. Vol. 40. N 10. P. 1695–1710. DOI: 10.1134/S1995080219100226

REFERENCES

1. BALAYAN G.G., DMITRIEVSKY A.N., KOMKOV N.I., BRUSLOV A.Yu. Development of models of promising

- technologies for oil recovery of hydrocarbons. In the book: Organization and management of science in conditions of intensification, USSR Academy of Sciences, IEP NTP. M. 1989:37–59. (In Russian).
2. BREZITSKY S.V., JAFAROV I.S., PANAKHOV G.M., SHAKHVERDIEV A.KH. Method for developing an oil deposit. Patent for invention RU 2142557 C1, 12.10.1999. Application N 99113100/03 dated June 29, 1999. (In Russian).
 3. BRUSLOV A.YU. Development of a method for determining phase mobility and the degree of oil recovery when they are displaced from layers by slugs of liquid carbon dioxide. dis. ... Ph.D. Moscow: MING im. THEM. Gubkina. 1985. 132. (In Russian).
 4. MANDRIK I.E., PANAKHOV G.M., SHAKHVERDIEV A.KH. Scientific, methodological and technological basis for optimizing the process of enhanced oil recovery. Moscow: Neftyanoye khozyaystvo. 2010:228.
 5. SHAKHVERDIEV A.KH. Once again about oil recovery. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014;1:44–48. (In Russian).
 6. SHAKHVERDIEV A.KH. Some conceptual aspects of system optimization of oil field development. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2017;2:58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-58-63 (In Russian).
 7. SHAKHVERDIEV A.KH. System optimization of the oil field development process. Moscow: Nedra. 2004:452. (In Russian).
 8. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P. Modeling of oil deposits from the perspective of system optimization of processes. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2000;12:19–23. (In Russian).
 9. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P., GALUSHKO V.V. A method for determining the location of stagnant and poorly drained zones of an oil deposit. Patent for invention RU 2105136 C1, 02/20/1998. Application N 97114425/03 dated 09/03/1997. (In Russian).
 10. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M. Method for developing oil deposits. Patent RU 2244110 C1. Published: 2005.01.10. (In Russian).
 11. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Synergetic effects under systemic influence on a deposit using thermo-rheochemical methods. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2002;11:61–65. (In Russian).
 12. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., MANDRIK I.E., BAKHTIYAROV S.I. Integrative efficiency of impact on the formation during in-situ gas generation. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2006;11:76–80. (In Russian).
 13. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., KURBANOV R.A., MATVEEV K.L. Method for developing an oil deposit. Patent for invention RU 2123586 C1, 12/20/1998. Application N 97109102/03 dated June 16, 1997. (In Russian).
 14. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., CHUKCHEEV O.A., GALEEV F.KH. Method for developing an oil deposit. Patent RU 2125154 C1. Published: 1999.01.20. (In Russian).
 15. GUMERSKY KH.KH., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery. Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France, 2000:499–504.
 16. SHAKHVERDIEV A.KH., SHESTOPALOV YU.V. Qualitative analysis of quadratic polynomial dynamical systems associated with the modeling and monitoring of oil fields. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019;40;(10):1695–1710. DOI: 10.1134/S1995080219100226.

С.В. АРЕФЬЕВ,
А.Ю. БРУСЛОВ, А.В. ДЕНИСОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ СО₂ С
КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

Арефьев Сергей Валерьевич,

к.г.-м.н., начальник Управления разработки нефтяных и газовых месторождений Западно-Сибирского и Пермского регионов ПАО «Лукойл»

✉ 101 000, г. Москва, Сретенский бульвар, 11,
101000, Moscow, Sretensky Boulevard, 11,
тел: +7 (495) 627-44-44, e-mail: lukoil@lukoil.com

Бруслов Андрей Юрьевич,

доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

✉ 117997, г. Москва ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117997, Moscow, Miklukho-Maklaya Str, 23
тел: +79057573208, e-mail: bruslovay@mgri.ru

Денисов Алексей Владимирович,

преподаватель кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117997, Moscow, Miklukho-Maklaya Str, 23
тел: +7 (916) 801-95-64, e-mail: denisovav@mgri.ru