

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАЗГАЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНО
НАСЫЩЕННЫХ ВОД В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ПЛАСТОВОМ ДАВЛЕНИИ
НИЖЕ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ**

Рахбари Н.Ю.

ОАО «Центральная геофизическая экспедиция», Москва, Россия, e-mail: ona1983@mail.ru

В статье рассмотрены результаты экспериментального моделирования сегрегации газа из подземных вод при снижении давления ниже давления насыщения, а также теоретические и методические вопросы новой технологии оценки объемов защемленного, водорастворенного и остаточного природного газа. Опыты проводились на моделях, имитирующих фильтрационно-емкостные характеристики центральной и бортовой частей месторождения Медвежье. Предложенная модель и технология с успехом была применена на ряде истощенных газовых месторождений Западной Сибири.

Ключевые слова: дегазация, подошвенные воды, водорастворенный газ, минерализация, газонасыщенность, восполнение запасов.

**GAS SEGREGATION EXPERIMENTAL MODEL OF EXTREMELY SATURATED
WATERS IN THE POROUS ENVIRONMENT UNDER PRESSURE BELOW
PRESSURE OF SATURATION**

Rakhbari N.U.

Central Geophysical Expedition, Moscow, Russia, e-mail: [Geologist, ona1983@mail.ru](mailto:ona1983@mail.ru)

Results of experimental modeling of gas segregation from underground waters under decrease pressure lower saturation pressure and also theoretical and methodical problems of new estimation technology of the jammed, residual gases, water segregation gas values are consider here. Experiences were made on the models simulating filtration-capacitor properties of the central and onboard parts of Medvej'e field. This technology was successfully used in several exhausted natural gas field of West Siberia.

Key words: degassing, underlying waters, water solution gas, mineralization, gas saturation, filling up reserves.

Цель исследования. Целью данной работы является изучение процессов разгазирования подземных вод в пористой среде при снижении давления ниже давления насыщения. Этот вопрос имеет чрезвычайно важное значение для газопромысловой практики. Многие годы не стихает дискуссия о том, являются ли газы, выделившиеся из вод, окружающих месторождения природного газа, мощным источником восполнения дренированных запасов. Такие выводы во многом базируются на том, что ресурсы водорастворенных газов многократно превышают ресурсы всех свободных УВ-газов в осадочном чехле. Ю.С. Шилов, В.И. Ларин [2; 5–7] считают, что при длительной разработке газовых месторождений за счет создания мощной депрессионной зоны водорастворенные газы переходят в свободное состояние, подтягиваются к ГВК и

восполняют дренированные запасы газа в самом месторождении. По их подсчетам, на месторождении Медвежьем запасы газа к 1995 году за счет разгазирования подземных вод увеличились на 200 млрд м³, а к концу эксплуатации месторождения объем этих газов составит около 700 млрд м³ [7 и др.]. Ю.Н. Васильев, П.А. Гереш, Н.Г. Степанов высказывают иную точку зрения. По их мнению, водорастворенные газы восполняют запасы газовых месторождений в очень небольшом объеме, но при этом сами дегазационные процессы способствуют заводнению продуктивных пластов [1; 3].

Принципиальным для решения вопроса о роли водорастворенных газов в восполнении дренированных запасов газа на месторождениях с длительной историей эксплуатации является истинная оценка миграционной подвижности газов, выделяющихся из подошвенных вод. В данной статье излагаются результаты экспериментов, позволяющих оценить условия, при которых происходит дегазация предельно насыщенных вод как в однородной, так и в неоднородной литологических средах.

Методы исследования и материалы. Основной метод исследования – экспериментальное моделирование, осуществляемое на специально созданной установке. Благодаря ее конструктивным решениям существует возможность моделировать и измерять параметры процесса дегазации предельно насыщенных вод в пористой среде как в условиях принудительных гидродинамических воздействий, так и вне их влияния. В качестве изучаемых сред применены: а) насыпная песчано-глинистая модель; б) воды гидрокарбонатно-натриевого и хлоридно-кальциевого составов различной минерализации; в) углекислый газ.

В первой серии экспериментов исследовались однородные модели, отличающиеся по фильтрационно-емкостным свойствам. Каждая модель формировалась как искусственно насыпная¹ (утрамбованная) с различным соотношением алевролитовых и песчаных фракций (карбонатные разности не исследовались). В конечном счете пористость и проницаемость моделей составила соответственно 0,275 и $880 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ (модель **A**), 0,310 и $620 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ (модель **B**), 0,335 и $450 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ (модель **C**).

Это согласуется с данными З.Д. Ханнанова [4], по оценке которого среднее значение открытой пористости на Медвежьем (а также на Уренгойском) месторождении составляет 28-30%, а средневзвешенное по мощности значение проницаемости по Ныдинской площади $440 \times 10^{-15} \text{ м}^2$.

¹ Использование насыпных моделей с достаточно высокой проницаемостью – вынужденная мера, так как работа с моделями, имеющими низкую проницаемость, существенно увеличивает время эксперимента, а это, в свою очередь, приводит к повышению погрешностей моделирования (за счет нестабильности температурного режима в лабораторном помещении, различных физических, в том числе и вибрационных помех).

Для каждой модели (*A*, *B* и *C*) давление задавалось единообразно: на входе модели – 0,3 МПа, для трех серий перепад давления принудительно устанавливался 0,004, 0,006 и 0,008 МПа, соответственно, давление на выходе зависело как от значений заданных перепадов, так и от высоты модели (1,5 м).

Для второй серии экспериментов модельное воссоздание литологической неоднородности произведено посредством следующего методического приема. Модель набивалась теми же литологическими смесями, как и в случае с однородной моделью, но через каждые 12–13 см модели она перекладывалась искусственными полукругами из латексного непроницаемого материала толщиной 40 мм (по 10 полукруглых прослоев на каждую насыпную модель). Проницаемость не определялась, но вполне очевидна равнозначность условий снижения величины этого параметра для всех опытов, что позволяет их сравнивать между собой и с аналогичными опытами, выполненными для однородных моделей. Все эксперименты производились только для одного значения градиента давлений – 0,008.

Результаты физических экспериментов.

Результаты экспериментов с литологически однородными моделями отражены на рисунках 1–3.

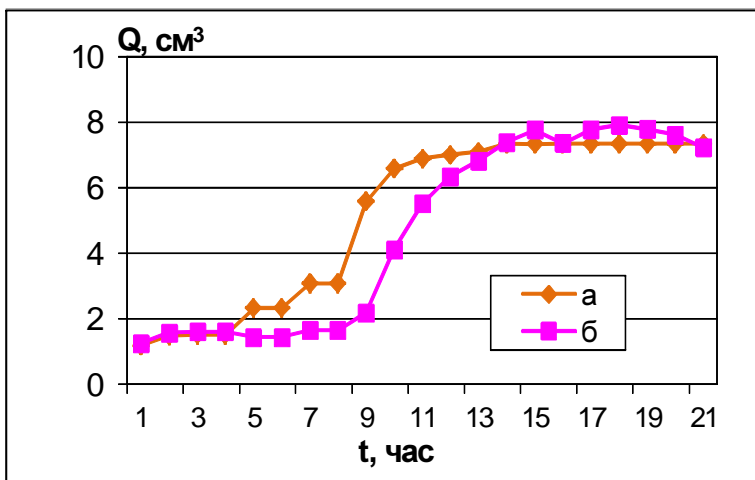


Рис. 1. Модель *C* (проницаемость $450 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Зависимость объема газа, накопленного в ловушке, от времени при моделировании дегазации вод в условиях различных перепадов давлений (а – 0,004 МПа; б – 0,006 МПа; в – 0,008 МПа)

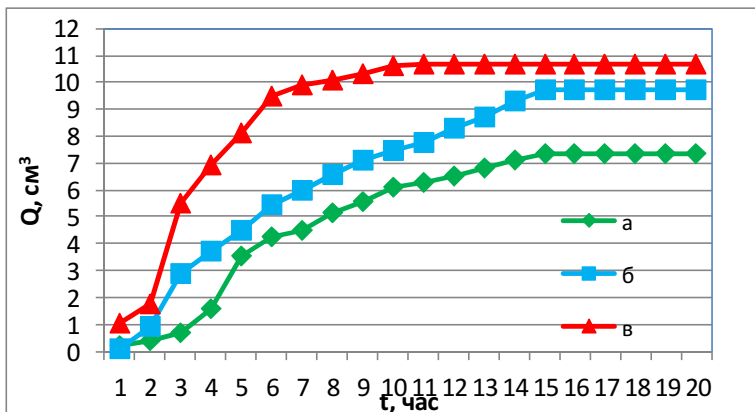


Рис. 2. Модель *B* (проницаемость $620 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Зависимость объема газа, накопленного в ловушке, от времени при моделировании дегазации вод в условиях различных перепадов давлений (а – 0,004 МПа; б – 0,006 МПа; в – 0,008 МПа)

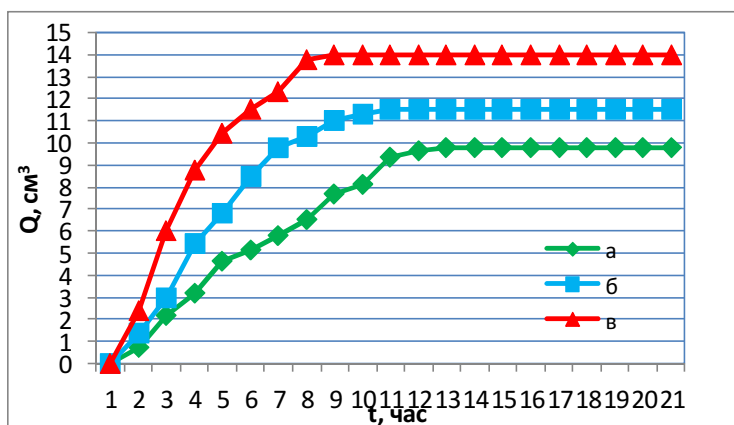


Рис. 3. Модель А (проницаемость $880 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Зависимость объема газа, накопленного в ловушке, от времени при моделировании дегазации вод в условиях различных перепадов давлений (а – 0,004 МПа; б – 0,006 МПа; в – 0,008 МПа)

Выше отражены результаты разгазирования

моделей, которые были реализованы в условиях, имитирующих гидродинамическую активную систему. Однако важно понимать, будет ли выделяться газ из перенасыщенных вод при отсутствии реального движения вод. Поэтому для того, чтобы оценить (не)способность газовых микропузырьков к продвижению в предельно газонасыщенной среде без сопутствующего продвижения воды, был поставлен специальный опыт. Результаты этого эксперимента иллюстрирует рисунок. 4.

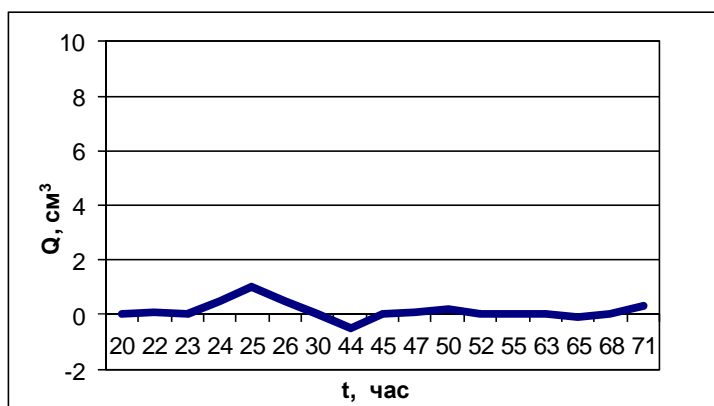


Рис. 4. Зависимость объема газа, накопленного в ловушке, от времени при моделировании дегазации вод в статических условиях

Результаты двух экспериментов с неоднородными моделями проницаемостью, равной соответственно $620 \cdot 10^{-15}$

м^2 и $880 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ отражены в таблице 1 (в сравнении с однородными), а модели с проницаемостью $450 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ – на рисунке 5.

Таблица 1 – Параметры процесса дегазации подошвенных вод при снижении давления ниже давления насыщения (неоднородные литологические модели)

Проницаемость $620 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$		Проницаемость $880 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$	
Q(t), %		Q(t), %	
Однород. среда	Неоднород. среда	Однород. среда	Неоднород. среда
6,33	1,72	0,00	0,00
10,93	5,90	14,74	2,46
33,78	7,37	36,86	17,38
-	-	54,05	30,41
42,69	10,69	63,88	40,54

49,75	15,17	70,64	63,76
-	-	75,55	65,42
58,35	34,40	84,77	70,45
60,81	41,09	85,69	75,37
62,04	51,60	85,69	81,08
63,27	57,00	85,69	79,24
65,11	62,53	85,69	83,35
65,72	74,94	85,69	78,62
65,72	74,26	85,69	79,73
65,72	74,94	85,69	89,13
65,72	71,50	85,69	91,58
65,72	74,94	85,69	100,00
65,72	78,93	85,69	90,91
65,72	74,94	85,69	97,48
65,72	74,94	85,69	96,62

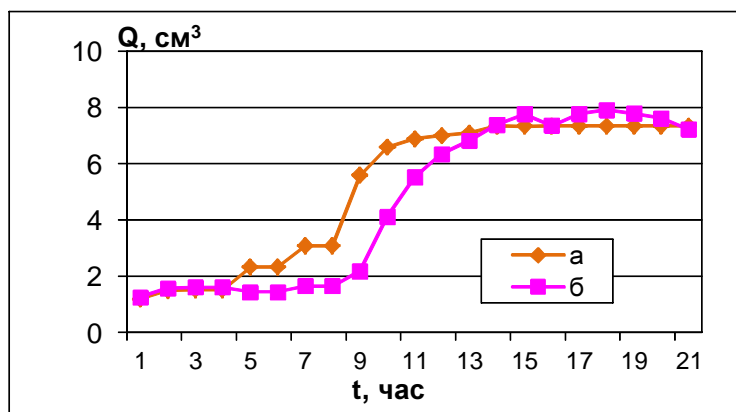


Рис. 5. Сравнение хода дегазации вод при снижении давления ниже давления насыщения при проницаемости $450 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ для однородной (а) и неоднородной моделей (б)

На рис. 5. показано, что при сравнительно невысокой проницаемости пород (450×10^{-15}

м^2) внедрение в однородную модель непроницаемых пропластков в целом слабо меняет характер дегазационных процессов (расхождения не превышают 5–7%). Однако отмечаются две характерные детали: а) запаздывание начала процесса разгазирования (т.е. удлинение срока формирования предельной газонасыщенности пласта); б) пульсационный выход газа, освободившегося из водорастворенного состояния. Надо отметить, что наблюдение за процессом продолжалось 36 часов (с перерывами), но полная его стабилизация так и не наступила.

Таковы результаты экспериментов, их интерпретация дана ниже.

Интерпретация полученных результатов. Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что механизм дегазации пластовых вод начинает работать при снижении пластового давления ниже давления насыщения. Образующиеся пузырьки газа не могут сразу покинуть водонасыщенную среду, так как на них влияют силы электростатического притяжения. Чем меньше пузырек, тем в большей степени он находится под действием

этих сил. По мере накопления мелкие пузырьки сливаются, увеличиваясь в общем объеме, повышается их способность к всплыванию за счет преодоления капиллярных сил. Тогда свободные пузырьки газа покидают места первичного отделения от воды и собираются в кровельной части пласта, постепенно оттесняя воду вниз. С уменьшением общего соотношения *вода/газ* становится возможным продвижение через эту зону новых порций газа, поступающих из более нижних слоев водонапорной системы, подстилающей месторождение. Скорость преодоления порога неподвижности выделившегося из воды газа, в свою очередь, зависит от конкретной геолого-гидрогеологической ситуации, а также от состава газа (газовой смеси).

Как следует из результатов экспериментов, количество газа, которое покидает водонасыщенную породу, прямо зависит от градиента давления. Это с очевидностью демонстрируют результаты всех трех экспериментов, выполненных с однородными моделями (рис. 1–3)

Так, при снижении давления ниже давления насыщения происходит процесс разгазирования вод, имеющий три характерных периода:

- первый, в течение которого видимых изменений в системе не наблюдается, и за это время накапливаются газы в верхней части модели (под ГВК – в реальных условиях), формируется переходная зона;
- второй, в течение которого происходит активный прорыв газа, причем при меньших градиентах давления этот период более растянут, что вполне естественно;
- третий, четвертый – периоды стабилизации процесса.

Для каждого эксперимента эти периоды имеют собственные временные интервалы, которые (как следует из сути экспериментов) определяются градиентом давления.

По мере повышения градиента давления увеличивается объем газа, способного к самостоятельному истечению, но в целом соотношение объема свободного (освободившегося) газа к объему защемленного в водонасыщенной части модели остается весьма незначительным – от 2,8 до 4,0%.

Эксперименты, проведенные в статической среде (рис. 4), говорят о том, что количество газа, выделившегося из модели, осталось практически постоянным и отличается от начального значения на 0,08% (на протяжении 94 часов). Это свидетельствует о том, что без внешнего энергетического воздействия на пласт вертикальная фильтрация газовых пузырей при газонасыщенности пласта, равной 0,30, практически отсутствует.

Обобщая результаты моделирования по однородным коллекторам, можно сделать заключение о том, что при снижении давления ниже давления насыщения основной (до

90% и выше) объем выделившегося из водорастворенного состояния газа пополняет объемы заземленного газа (в коллекторах с высокой проницаемостью – не более 10–12%). Продвижение газа, выделившегося из водорастворенного состояния, возможно либо при активном гидродинамическом воздействии на пласт, либо на заключительных этапах разработки за счет увеличения перепада давлений.

Что касается экспериментов, проведенных с неоднородной моделью, то следует отметить, что при сравнительно невысокой проницаемости пород ($450 \times 10^{-15} \text{ м}^2$) внедрение в однородную модель непроницаемых пропластков в целом слабо меняет характер дегазационных процессов (расхождения не превышают 5–7%).

По моделям с большей проницаемостью (графики в данной статье не приводятся) фиксируется следующее: в средней части процесса наступает существенное отставание темпа дегазации неоднородной модели по сравнению с однородной. Но важно отметить, что на заключительном этапе количество газа, которое покидает водонасыщенную модель, становится выше. И, наконец, проявляется пульсационный характер подобных выбросов. Здесь также стабилизация процесса наступает с большим отставанием (время завершения процесса увеличивается примерно на 20%).

Стало быть, в тех участках геологического разреза, где четко проявляется литологическая неоднородность (выраженная слоистостью) на заключительных этапах разработки месторождения, следует ожидать наибольшего выхода газа из водорастворенного состояния, по сравнению с однородными литологическими разрезами.

Для месторождения Медвежьего было оценено количество выделившихся газов из вод, внедрившихся в залежь, за весь период разработки. Учитывая результаты экспериментов, приняты такие значения газонасыщенности пласта, которые были получены для однородных моделей (что соответствует центральной части месторождения 45–57%) и неоднородных моделей (что соответствует бортовым частям месторождения – 55–72%). Результаты подсчетов частично отражены в таблице 2.

Таблица 2 – Вычисленные объемы заземленного, остаточного, выделившегося из водорастворенного состояния газов и объемов вод, внедрившихся в залежь по месторождению Медвежьему в период 2002–2006 гг.

Годы	2002	2003	2004	2005	2006
$Q_{\text{защ}}$, млрд м^3	65,9	63,9	61,3	58,6	58,8
$Q_{\text{ост}}$, млрд м^3	318,9	284,9	259,5	236,7	212,1
$Q_{\text{вг}}$, млрд м^3	9,3	9,9	10,5	11,0	12,2
$W_{\text{в}}$, млрд м^3	3,8	4,0	4,1	4,3	4,6

По этим данным видно, что доля ВРГ в составе свободного газа достаточно скромная, но нарастает с годами. Также увеличивается его доля по отношению к объему заземленного газа. Это значит, что со временем, благодаря, главным образом,

техногенной геодинамике, доля этого газа в составе свободного будет нарастать, особенно в центральных частях месторождения.

Выводы.

- Масштабы выхода водорастворенного газа оказались существенно меньшими по сравнению с предшествующими оценками [6; 7]; более достоверна оценка, предложенная в работах [1 и др.]. Роль водорастворенного газа в восполнении дренированных запасов на месторождениях со слоистыми коллекторами ограничена, но нарастает на заключительных этапах эксплуатации месторождений.

- Литологическая неоднородность среды приводит не к уменьшению объемов выделившихся газов, а к сдвигу по времени процесса разгазирования вод (в соответствии с изменением пластового давления), усиливает пульсационный характер этого процесса.

- Водорастворенный газ даже в однородных высокопроницаемых коллекторах *без дополнительной технической стимуляции* не обладает достаточной подвижностью, чтобы восполнять дренируемые запасы в промышленно значимых количествах.

Список литературы

1. Васильев Ю.Н., Гереш П.А., Пасько Д.А. Методы прогнозирования обводнения газовых залежей в условиях функционирования АСУ разрабатываемых месторождений // ИРЦ ГАЗПРОМ Обз. Инф. – 1994. – 41 с.
2. Ларин В.И., Филиппов В.П. Геология нефти и газа. – М. : ГАНГ, 1997. – 176 с.
3. Степанов Н.Г., Дубина Н.И., Васильев Ю.Н. Влияние растворенного в пластовых водах газа на обводнение газовых залежей. – М. : Недра, 1999. – 124 с.
4. Ханнанов З.Д. Геолого-промысловые особенности строения сеноманской продуктивной толщи Медвежьего и Уренгойского месторождений в связи с вводом их в разработку : автореф. дис. ... к. г.-м. н : 04.00.17. – М., 1972. – 30 с.
5. Шилов Ю.С. Ресурсы водорастворенных газов России. – М., 1995. – 48 с.
6. Шилов Ю.С. Гидрогеологические изменения в пластовой системе в ходе отработки газовых залежей на примере месторождения Западной Сибири // Поиски и разведка газовых месторождений. – М. : Недра, 1975. – С. 208–216.
7. Шилов Ю.С. Гидрогеологические методы разведки и подсчета углеводородов // МИНГЕО СССР, ИПК. – М., 1991. – С. 208–217.

Рецензенты:

Абукова Л.А., д.г.-м.н., профессор кафедры «Моделирование залежей углеводородов», заведующая лабораторией нефтегазовой гидрогеологии ИПНГ РАН, г. Москва.

Сианисян Э.С., д.г.-м.н., профессор, зав. кафедрой геологии нефти и газа Южного федерального университета, г. Ростов-на Дону.

Работа получена 12.09.2011