



УДК 622.24

## ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ГАЗА НА АКТИВНЫЙ ОБЪЕМ ГАЗА В ПХГ – ЗЕЛЕНАЯ СВИТА

### EFFECT OF GAS SOLUBILITY IN WATER TOWARD ACTIVE GAS VOLUME IN UNDERGROUND GAS STORAGE – ZELENAYA SVITA

**Васильев Владимир Андреевич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры разработки и эксплуатации  
нефтяных и газовых месторождений,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
vvasilev@ncfu.ru

**Прачев Юрий Николаевич**

кандидат педагогических наук,  
доцент кафедры разработки и эксплуатации  
нефтяных и газовых месторождений,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
iprachev@ncfu.ru

**Дитрих Анастасия Владимировна**

старший преподаватель  
кафедры разработки и эксплуатации  
нефтяных и газовых месторождений,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
azdorenko@ncfu.ru

**Шестерень Алена Олеговна**

старший преподаватель  
кафедры разработки и эксплуатации  
нефтяных и газовых месторождений,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
ashesteren@ncfu.ru

**Николайченко Александр Сергеевич**

старший преподаватель  
кафедры разработки и эксплуатации  
нефтяных и газовых месторождений,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
anikolaichenko@ncfu.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные причины  
пластовых потерь газа в подземных хранилищах газа. Пред-  
ставлены расчет и оценка объемов уносимого газа по данным  
за 27 лет эксплуатации ПХГ – Зеленая свита.

**Ключевые слова:** потери газа, растворимость газа, диффу-  
зия, подземное хранилище газа (ПХГ).

**Vasiliev Vladimir Andreevich**

Candidate of Technical Sciences, Ph.D.,  
Associate Professor of Exploitation of Oil and  
Gas Fields Sub-Department,  
North Caucasus Federal University  
vvasilev@ncfu.ru

**Prachev Iurii Nikolaevich**

Candidate of Pedagogical Sciences,  
Associate Professor of Exploitation of Oil and  
Gas Fields Sub-Department,  
North Caucasus Federal University  
iprachev@ncfu.ru

**Ditrikh Anastasiia Vladimirovna**

Senior Lecturer of Exploitation of Oil and  
Gas Fields Sub-Department,  
North Caucasus Federal University  
azdorenko@ncfu.ru

**Shesteren Alena Olegovna**

Senior Lecturer of Exploitation of Oil and  
Gas Fields Sub-Department,  
North Caucasus Federal University  
ashesteren@ncfu.ru

**Nikolaychenko Alexander Sergeevich**

Senior Lecturer of Exploitation of Oil and  
Gas Fields Sub-Department,  
North Caucasus Federal University  
anikolaichenko@ncfu.ru

**Annotation.** This article is devoted major  
reasons of gas loss in the layer of the under-  
ground gas storages. It contains computing  
and gas volume loss appraisal according to  
the data of production activity for 27 years  
UGS – Zelenaya Svita.

**Keywords:** gas loss, gas solubility, diffusion,  
underground gas storage (UGS).

Энерго- и ресурсосбережение в настоящее время является актуальной темой. В связи с постоянным ростом цены на газ, повысилось внимание к оценке потерь газа как пластовых, так и в промышленном оборудовании на поверхности. Пластовые потери газа могут быть обусловлены разными причинами: негерметичностью покрышки, утечками за замок структуры, растворением и уносом газа пластовой водой при условиях, способствующих этому. Такие условия имеются на ПХГ – Зеленая свита, которое подстилается подошвенной водой. Поток воды движется с юга-запада на северо-восток со скоростью, по разным оценкам, от миллиметров до десятков м / год.

Газ, успевший раствориться в некотором объеме воды к моменту ухода этого объема из ПХГ, уносится за пределы ПХГ и теряется. Представляет научный интерес оценить возможные масштабы этого явления для ПХГ – Зеленая свита.



По своей физической сущности движение растворенного газа в пористой среде сходно с движением в ней меченых частиц, которое описывается теорией процесса перемешивания однородной жидкости, движущейся в пористой среде [1].

Перемешиваться могут лишь взаиморастворимые жидкости. Взаиморастворимые жидкости смешиваются одна с другой и образуют смеси с физическими характеристиками функциями их концентраций. Наиболее простым для исследования является перемешивание таких жидкостей, которые в любой концентрации в смеси обладают одинаковыми свойствами. Например, это перемешивание однородной жидкости, проследить за которым возможно, добавив в поток динамически нейтральный индикатор (меченые частицы). Растворение газа в воде также не влияет существенно на ее свойства, что и дает возможность изучать движение растворенного газа в воде, используя теорию процесса перемешивания однородной жидкости.

При прохождении последовательно какого-то сечения в пористой среде установившимся потоком двух смешивающихся жидкостей, приведенных первоначально в соприкосновение, изменение концентрации второй жидкости в первой в этом сечении определяется:

- средней скоростью движения потока (конвективный перенос), которая равна:  $u = v / m$  ( $v$  – скорость фильтрации,  $m$  – пористость);
- молекулярной диффузией;
- конвективной диффузией.

Рассмотрим каждый из факторов отдельно, считая для определенности, что происходит распространение краски в одномерном плоскопараллельном потоке. В отсутствие второго и третьего факторов окрашенная жидкость будет распространяться в виде ступеньки со скоростью  $v / m$ , т.е. со средней скоростью  $u$ .

Второй фактор – молекулярная диффузия, вызывающая молекулярное перемешивание, вызванное различием содержания краски в двух соседних сечениях (закон Фика).

Если учитывать перемешивание, то краска уже не будет распространяться в виде ступеньки – фронт будет размываться.

Опыты показали, что перемешивание однородной жидкости хорошо описывается уравнением диффузии с конвективным членом (3), но в то же время найденный в опытах коэффициент диффузии оказался гораздо большим коэффициента молекулярной диффузии и существенно зависит от скорости т.е., что некоторый процесс, возможно чисто механической природы, определяет перемешивание жидкостей. Этот процесс был назван конвективной диффузией частиц одной жидкости в другой при движении их в пористой среде. Коэффициент конвективной диффузии был обозначен  $D$ . Объяснение тому, что  $D = D(v) \geq D_0$ , следующее.

Жидкие частицы движутся в пористой среде по сложной системе микропотоков. В результате хаотичного характера внутренней геометрии порового пространства компоненты фактических (локальных) скоростей движения этих частиц могут принимать самые разные значения, но так, чтобы средняя их (по массе движущихся частиц через сечение породы плоскостью) величина равнялась как раз скорости  $u$ . Поэтому, если в момент времени  $t = 0$  покрасить жидкие частицы, находящиеся на границе пористой среды, то они не будут двигаться в среде с одинаковой скоростью: те из них, на микролинии тока которых значения локальных скоростей больше, уйдут вперед, другие отстанут, что и приведет к размытию первоначально ступенчатого фронта концентрации, размытию более интенсивному, чем размытие вследствие молекулярной диффузии.

Для применения теории перемешивания однородной жидкости, движущейся в пористой среде, к задаче перемещения растворенного газа при циклической эксплуатации ПХГ большое значение имеют результаты обработки [1] опытных данных Коха и Слобода, которые наблюдали за прослойкой одной жидкости в массе другой жидкости при их совместном движении сквозь пористую среду. В этих экспериментах использовались жидкости одной вязкости, но различного химического состава, что и позволяло следить за процессом их перемешивания.

Совпадение опытных данных с теоретическим решением оказалось достаточно высоким при принятом коэффициенте диффузии  $D_{cp} = 1,92 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ . Оказалось, что определенные экспериментальным путем значения коэффициента диффузии  $D$  в 1000 раз больше значения коэффициента молекулярной диффузии  $D_0$ . Если изобразить графически то, что рисунок будет симметричен относительно вертикальной оси, т.е. распределение концентрации в тылу прослойки является зеркальным отображением распределения концентрации на ее фронте. А это значит, что распределение концентрации не зависит от направления движения.

Применительно к ПХГ – Зеленая свита с подошвенной водой, это означает, что фронтное распределение концентрации растворенного газа в периоде закачки, сразу же становится тыловым распределением в периоде отбора, а роль прослойки выполняет соприкасающийся с зеркалом воды газ. Предполагается, что оно (зеркало) совпадает с положением скачка насыщенности газом при вытеснении воды газом (закачка) и при вытеснении газа водой (отбор).



При определении коэффициента диффузии (продольной) воспользуемся экспериментальной установленной зависимостью безразмерного коэффициента продольной диффузии  $D / D_0$  от числа Пекле:

$$Pe = \frac{vl}{D_0}, \text{ где } l - \text{характерный размер, в качестве которого принимался средний диаметр зерен [2].}$$

Вода с растворенным в ней газом, вытесняемая газом (в закачке), или вытесняющая газ (в отборе), имеет те же физические свойства, что и дегазированная вода, т.е. тот же коэффициент молекулярной диффузии.

Колебание подошвенного ГВК за период отбора или закачки равно приблизительно 2 м, т.е. среднее значение  $u$  равно  $0,13 \cdot 10^{-4}$  см / с.

Для ПХГ – Зеленая свита  $l = 0,1$  мм = 0,01 см,  $m = 0,25$  и

$$Pe = \frac{mul}{D_0} = \frac{0,25 \cdot 0,13 \cdot 10^{-4} \cdot 0,01}{10^{-5}} = 0,0033, \tag{1}$$

то есть  $Pe \approx 0,003$  и этому значению числа Пекле, соответствует значение  $D / D_0 \approx 1$  [1], которое не зависит от скорости и перемещения ГВК.

Учитывая выше приведенное значение  $D_0$  получаем  $D = 10^{-9}$  м<sup>2</sup> / с

Рассмотрим, как будет происходить растворение газа в воде сначала в периоде закачки. Так как растворение газа будет совмещаться с перемещением ГВК (подошвенной воды), то контакт газ-вода с максимальной концентрацией растворенного газа  $C_0$  будет играть роль вытесняющей жидкости (с максимальной концентрацией растворенного газа).

Распределение концентрации растворенного газа от контакта газ-вода вглубь описывается формулой:

$$C(x,t) \approx C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Kt}} \right), \tag{2}$$

где  $K = D_0 / m$ ,  $x$  – отсчитывается от контакта газ-вода.

Из формулы (2) следует, что зона, в которой концентрация изменяется от начальной  $C_0$  до практически нулевой –  $0,005 C_0$ , расширяется по закону:

$$x = 4\sqrt{Kt}. \tag{3}$$

Учитывая, что определяющим для интенсивности конвективной диффузии является не направление движения жидкости, а скорость движения, можем заключить, что это тем более верно для молекулярной диффузии ( $D = D_0$ ).

Зная расход уносимого растворенного газа, можно вычислить потери газа за цикл эксплуатации. Эти потери прямо пропорциональны скорости движения подошвенной воды, о значениях которой в литературе приводятся сильно различающиеся данные.

По данным источника [4] в пределах Северо-Ставропольской площади падение напоров в северном направлении составляет приблизительно 10 м, т.е.  $1 \cdot 10^5$  Па на 6 км. Тогда действительная скорость движения воды будет составлять  $V_b \approx 2$  мм / год.

Объем уносимого за год (за цикл эксплуатации) газа (4) при следующих исходных данных:

- действительная скорость движения воды –  $V_b = 5 \cdot 10^{-3}$  м / сут;
- ширина потока подошвенной в пределах ПХГ –  $L = 3000$  м;
- водонасыщенность –  $S_b = 0,7$ ;
- пористость  $\tau = 0,25$ ;
- концентрация растворенного газа на контакте газ-вода при пластовых давлениях и температуре  $C_0 = 1,27$  м<sup>3</sup> / м<sup>3</sup>;
- время эксплуатации – 27 лет (27 циклов эксплуатации);
- $x_0$  – расстояние, на которое концентрация растворенного газа практически равна нулю.

$$Q_{y.p.g.} = 365 \cdot V_b \cdot L \cdot S_b \cdot m \cdot \int_0^{x_0} C(x,t) dx. \tag{4}$$

Произведя расчеты по (4) потери за 27-ой цикл составили 2,6 м<sup>3</sup>.

По другим сведениям падение напоров составляет приблизительно 10 м на 1000 м, что дает значение  $V_b$  в шесть раз больше и, соответственно, потери за 27-ой цикл  $2,6 \times 6 = 15,6$  м<sup>3</sup>, что практически означает их отсутствие.

Таким образом потери газа за счет уноса его в растворенном состоянии за XVII цикл эксплуатации получились пренебрежимо малыми. Еще меньше они за прошедшие циклы эксплуатации хранилища.



Вместе с тем надо отметить, что они получились по расчету такими малыми потому, что скорость воды была вычислена по данным работы [4], а не измерена непосредственно, например, с помощью индикаторов.

Поэтому нами для вычисления скорости движения подошвенной воды использовались также результаты трассерных исследований М.С. Лебедева, проведенных в работе [4]. В конце периода закачки в скв. № 367 был закачан под ГВК, во II пласт, трассер синего цвета, который был обнаружен в пробах флюидов, отобранных из скважин №№ 299, 300 и 284, отстоящих от скв. № 367 соответственно на 900, 750 и 1500 м. Первые порции трассера были отобраны из скважин №№ 299, 300 и 284 через 102, 106 и 134 сут., соответственно, что дает действительные скорости движения воды 8,8; 7,1; и 11,2 м / сут. Поэтому можно принять среднее значение скорости движения воды по данным М.С. Лебедева равным 10 м / сут. (3650 м / год). При такой скорости движения подошвенной воды потери газа составляют за 27 цикл эксплуатации около 5 млн м<sup>3</sup> / год. Будучи соотнесены к активному объему газа, равному  $\approx 3,5$  млрд м<sup>3</sup>, эти потери составляют 0,14 %. Поэтому можно сделать вывод о том, что потерь газа вследствие его растворения и уноса подошвенной водой – нет.

#### Литература:

1. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости / А. Бан [и др.]. – М. : Гостоптехиздат, 1962.
2. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. – М. : Недра, 1972. – С. 288.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М. : изд-во «Высшая школа», 1967.
4. Совершенствование методики оценки емкостно-фильтрационных свойств коллекторов подземных хранилищ газа: на примере Северо-Ставропольского подземного хранилища газа / Лебедев Михаил Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук. – Ставрополь, 2006. – 164 с.

#### References:

1. Influence of properties of rocks on the movement of fluid in them / A. Ban [et al.]. – M. : Gostoptekhizdat, 1962.
2. Barenblatt G.I., Yentov V.M., Ryzhik V.M. Theory of non-stationary fluid and gas filtration. – M. : Nedra, 1972. – P. 288.
3. Lykov A.V. Heat Transfer Theory. – M. : Higher School Publisher, 1967.
4. Perfection of the evaluation procedure of the capacity and filtration properties of reservoirs of underground gas storages: by the example of the North Stavropol underground gas storage / Doctor of Geological and Mineralogical Sciences M.S. Lebedev. – Stavropol, 2006. – 164 p.