

А. Е. ТОЛЕУХАНОВ¹, М. Б. ПАНФИЛОВ², А. КАЛТАЕВ¹

(¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан,

²Университет Лотарингии, г. Нанси)

**ДВУХФАЗНАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ
СОСТАВА УГЛЕВОДОРОДНОЙ СМЕСИ ПРИ ХРАНЕНИИ
В ПОДЗЕМНОМ ВОДОНОСНОМ РЕЗЕРВУАРЕ**

Аннотация. В работе исследован процесс образования метана при подземном хранении водорода с учетом взаимодействия бактерий, влияющих на состояние начальной смеси. Получена двухфазная модель хранения водорода с биотической реакцией, связанной с динамической системой уравнений популяций в водоносном резервуаре.

Ключевые слова: пористая среда, водород, бактерия, нейстон, хемотаксис, динамика популяций, осцилляция.

Кілт сөздер: кеуек орта, сутегі, бактерия, нейстон, хемотаксис, популяция динамикасы, осцилляция.

Keywords: porous media, hydrogen, bacteria, neuston, chemotaxis, population dynamics, oscillations.

ВВЕДЕНИЕ. Проблема подземного хранения водорода (ПХВ). На сегодняшний день одной из острых проблем современной мировой энергетики является накопление и аккумуляция полученного избыточного большого объема энергии. Одним из наиболее перспективных решений проблемы аккумуляции большого объема энергии считается так называемая водородная энергетика, в которой в качестве подходящих материалов для аккумуляции больших объемов энергии используется водород. Главным достоинством водорода как топлива является то, что его удельная теплота сгорания втрое выше, чем у нефти, а при сгорании образуется экологически абсолютно безопасная вода.

Таким образом, избыток энергии из ТЭС, ГЭС, АЭС можно использовать для получения водорода из воды. На сегодняшний день производство водорода и его распределение уже не представляют серьезных технических проблем. Однако при производстве водорода в большом объеме возникает проблема необходимости хранения больших объемов водорода. Одним из самых эффективных и недорогих способов хранения большого объема водорода является его закачка в геологические формации, такие как водоносные пласты, истощенные газовые месторождения или соляные каверны

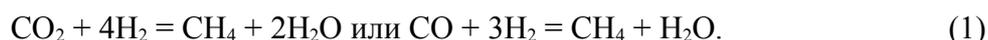
[1]. Несколько подземных хранилищ водорода имеется в Великобритании, в США, в России, в Германии, в Чехии и во Франции.

Весьма необычное поведение водорода при подземном хранении было обнаружено по данным наблюдений за составом смеси, добываемой из ПХВ (в ходе цикла «добыча», последующего за закачкой). Эти наблюдения выявили существование сильных осцилляций состава добываемого газа во времени и по пространству [2-3]. В частности, на хранилище Lobodice (Чехия) было обнаружено снижение во времени концентрации закачиваемых газов H_2 и CO_2 , но значительное увеличение концентрации CH_4 [2].

Исходная закачиваемая смесь содержала 55% H_2 , 20% $CO_2 + CO$ и 20% CH_4 . После нескольких месяцев закачки, хранения и начала цикла извлечения добываемый газ содержал 37% H_2 , 12% $CO_2 + CO$ и 40% CH_4 . Таким образом, речь идет не о долях процентов и случайных ошибках измерений, а об удвоении количества CH_4 в пласте и уменьшении в 2 раза количества $CO_2 + CO$. Характерный период изменения состава хранимого газа составил от 5 до 7 месяцев. Одновременно было обнаружено избыточное уменьшение давления в пласте на 15% по сравнению с расчетами материального баланса. Одной из возможных интерпретаций этого – утечка газа – была в итоге отвергнута.

Последующий изотопный анализ продукции из скважин [3] показал, что изотопный состав части добываемого CH_4 отличен от закачиваемого CH_4 . Речь идет, таким образом, о внутри-пластовых генераторах CH_4 . Дальнейшие наблюдения выявили еще более нетривиальные процессы в ПХВ, такие как образование чередующихся в пространстве зон, предпочтительно насыщенных H_2 или CH_4 . Назовем этот эффект естественной внутривластовой сепарацией химических компонентов.

В работах Smigai и Vuzek [2, 3] сделана попытка объяснить причины изменения качественного состава закачиваемой смеси. В них предложено, что образование метана в пласте протекает по следующим реакциям:



В ходе этих реакций наблюдается сокращение количества CO_2 и H_2 и одновременное увеличение количества CH_4 . Подобная реакция между H_2 и CO_2 может происходить в условиях ПХВ, для столь существенного изменения начального состава смеси требуются годы. Изменение концентрации смеси можно объяснить влиянием метаногенных бактерий, которые участвуют в реакции (1) и являются ее катализатором. Присутствие метаногенных бактерий в пластовой воде ПХВ Lobodice было подтверждено измерениями [2, 3].

Механизм воздействия бактерий представляет собой процесс метаболизма, при котором бактерии поглощают углерод из CO_2 и электроны H_2 в качестве энергии. В результате многостадийных процессов окисления CO_2 в теле бактерии происходит образование метана, который в итоге и «выдыхается» [4].

Таким образом, процесс ПХВ представляет собой естественный химический реактор, поглощающий CO_2 и частично H_2 и удваивающий массу CH_4 . Ясно, что данная проблема имеет промышленное значение, затрагивая как энергетику, так и экологию. Экономическая эффективность такого процесса можно оценить только после проведения

физического и математического моделирования всех возможных вариантов поведения ПХВ. Разработка таких моделей является основной целью данной работы.

Первая попытка исследования образования метана при подземном хранении водорода проведена в работе [5], в которой бактерия рассматривалась как однородная среда в однофазной газовой среде без учета присутствия воды. В качестве модели рассмотрена модель Моно роста популяции, но в результате исследований были обнаружены лишь мелкие быстро затухающие флуктуации концентраций метана в пласте, которые не объяснили многообразия наблюдаемых явлений.

В работе [6] рассматривается модель Тюринга, учитывающая существование различных структур колоний бактерий в зависимости от их численности.

В настоящей работе развивается новая математическая двухфазная модель многокомпонентных потоков с биотической реакцией, связанная с динамической системой уравнений популяций. Двухфазность течения приводит к дополнительной нелинейности, которая приводит к появлению нового нелинейного поведения популяции, что в свою очередь порождает необходимость рассмотрения новой формы бактерий, существующих в нейстон.

1. Модель хемотаксиса и нейстона в двухфазной жидкости. Рассматривается водоносный пласт, который содержит воду и хранимый газ, а также начальные популяции бактерий. В подземный водоносный пласт закачивается смесь H_2 в избытке с небольшим содержанием CO_2 , т.е. закачиваемый газ – двухкомпонентный, а газ в пласте состоит из трех компонентов H_2 , CO_2 и CH_4 . Кроме того, как было замечено в работах [2, 3], в результате хранения водорода в пласте происходит образование метана. Метаногенные бактерии детектирует питательные вещества, содержащиеся в газе, и двигаются к направлению газового контакта с водой, тем самым являясь катализатором процесса образования метана. В настоящей работе проведено исследование образования метана при подземном хранении водорода с учетом воздействия бактерий и нейстона.

Нейстон. Особенность движения бактерий в двухфазной жидкости состоит в том, что раздел области между водой и газом становится лучшим местом для жизни бактерий. **Нейстон** – это тонкий слой бактерий, живущих в воде одновременно использующих питательные вещества из газового контакта CO_2 и H_2 (рисунок 1).

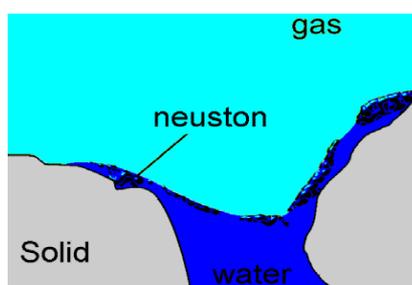


Рисунок 1 – Нейстон

Газовая фаза содержит слаборастворимые в воде питательные вещества. Бактерии, живущие в воде, перемещаются к питательным веществам, тем самым образуя на поверхности раздела тонкий слой – нейстон. Движение бактерий, живущих в воде, определяется хемотаксисом. **Хемотаксис** – это внутренний химический механизм, благодаря которому бактерии обладают способностью детектировать наличие питательных веществ на расстоянии и двигаться в этом направлении.

Математическая модель хемотаксиса в двухфазной жидкости. Поток бактерий q_{ch} осуществляется в направлении увеличения концентраций питательных веществ, в связи с чем закон для потока бактерии, вызванного хемотаксисом в двухфазной жидкости, представлен в виде

$$q_{ch} = -D_{ch}(C) \cdot S \cdot n \cdot gradC \quad (2)$$

где $D_{ch}(C)$ – коэффициент хемотаксиса, который имеет размерность $\left[\frac{M^2}{c}\right]$, S – насыщенность воды, C – общая молярная доля питательных веществ, n – безразмерное количество бактерий в единица объема среды.

В начальном состоянии бактерии живут в воде, все питательные вещества присутствуют в газе и медленно диффундируют в воду. Следующие особенности присущи этой системе:

1. Движение потока бактерий вызывается градиентом от общей молярной концентрации питательных веществ C , $q_{ch} \sim -gradC$.
2. Поток бактерий пропорционально к числу бактерий, $q_{ch} \sim n$.
3. Поток бактерии прямо пропорционально к насыщенности воды, $q_{ch} \sim S$.
4. $D_{ch}(C)$ – коэффициент хемотаксиса должен быть убывающей функцией от C .

2. Общая модель динамики популяции. Рассмотрим следующую физическую двухфазную модель (газ и вода): в подземный водоносный пласт, содержащий воду и газ, закачивается двухкомпонентная смесь H_2 с небольшим содержанием CO_2 . Газовая фаза в пласте состоит из трех химических компонентов: H_2 , CO_2 и CH_4 , а жидкая фаза состоит из воды с низкими концентрациями CO_2 , H_2 и CH_4 .

Далее рассмотрим только цикл закачки как наименее тривиальное. Присутствующие в пласте мета-ногенные бактерии выступают в роли активатора химической реакции между H_2 - (1) и CO_2 - (2) с образованием небольшого количества H_2O - (4) и CH_4 - (3). В модели рассматривается два вида бактерий:

- 1) бактерии, присутствующие в воде как планктоны или биофильмы, которые прикреплены к стенам пор и покрыты водой;
- 2) бактерии, присутствующие в нейстоне;

Бактерии, живущие в воде, используют в качестве питательных веществ растворенные H_2 и CO_2 в воде. Вода является биологически необходимой средой обитания для бактерий, живущих в нейстоне и использующих в качестве питательных веществ CO_2 , H_2 из газовой фазы.

Пусть $n_w(x,t)$ и $n_{ns}(x,t)$ – число бактерий, находящихся в воде и в нейстоне в единице объема пористой среды. Принимая во внимание вышеупомянутые предположения, можно сформулировать следующие уравнения динамики популяции:

$$\frac{\partial n_{ns}(1-S)}{\partial t} = \eta_{ns}(1-S) \frac{c_g^{(2)} n_{ns}}{t_{e,ns}} - (1-S) \frac{n_{ns}}{t_d} + \text{div}(D_b(1-S) \text{grad} n_{ns}); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_w S}{\partial t} = & \eta_w S \frac{c_w^{(1)} c_w^{(2)} (n_w)^2}{t_{e,w}} - S \frac{n_w}{t_d} + \text{div}(D_b S \text{grad} n_w) \\ & - \text{div}(D_{ch}(C^{(1)}) S n_w \text{grad} C^{(1)}) \end{aligned}; \quad (4)$$

где S – насыщенность воды, $t_{e,w}$ и $t_{e,ns}$ – характерные скорости роста популяции при малом количестве питательных веществ, t_d – характерное время вымирания, η – коэффициент пропорциональности между скоростью роста и поедания, D_b – коэффициент диффузии бактерий, $D_{ch}(C)$ – коэффициент хемотаксиса бактерий, $c_i^{(k)}$ – молярная доля химических компонентов k в фазе i , $C^{(k)}$ – общая молярная доля химических компонентов k в обе фазе.

Зависимость между $c_i^{(k)}$ и $C^{(k)}$ определяется в следующем виде:

$$C^{(k)} = \frac{\rho_w c_w^{(k)} S + \rho_g c_g^{(k)} (1-S)}{\rho_w S + \rho_g (1-S)}, \quad (5)$$

где ρ_i – молярная плотность в фазе i .

3. Уравнения баланса для химических компонентов. Исследование изменения состава водно-газовой смеси нескольких компонент приводит к рассмотрению системы уравнений аналогичного числа уравнений переноса. В случае неизменяемой реакции ситуация упрощается, так как кинетика реакции зависит только от реагентов и не зависит от реакции продуктов. Это достаточно, чтобы сформулировать уравнения переноса только для H_2 и CO_2 . Скорость реакции полностью контролируется бактериями и определяется скоростями поедания бактерии $\Phi_w S + \Phi_{ns}(1-S)$. В соответствии с формулой химической реакции (1) один моль потребляемых питательных веществ содержит 1/5 часть CO_2 и 4/5 часть H_2 . В результате модель переноса для CO_2 и H_2 имеет следующий вид:

$$k = 1, 2, 3:$$

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g c_g^{(k)} (1-S) + \rho_w c_w^{(k)} S) + \text{div}(\rho_g c_g^{(k)} V_g^{(k)} + \rho_w c_w^{(k)} V_w^{(k)}) = \frac{1}{\Omega} G^{inj} c^{(k),inj} - \frac{\phi \gamma^{(k)} (1-\theta) c_g^{(2)} n}{t_{e,ns} (1+a_{ns} c_g^{(2)})} - \frac{\phi \gamma^{(k)} c_w^{(1)} c_w^{(2)} \theta^2 S n^2}{t_{e,w} \left(S^2 + \frac{\theta^2 n^2}{n_{wm}^2} \right) (1+a_{w1} c_w^{(1)}) (1+a_{w2} c_w^{(2)})} ; \quad (6a)$$

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g (1-S) + \rho_w S) + \text{div}(\rho_g V_g + \rho_w V_w) = \frac{1}{\Omega} G^{inj} ; \quad (6b)$$

$$V_g = -\lambda_g (\text{grad} P_g - \rho_g^m g), \quad V_w = -\lambda_w (\text{grad} P_w - \rho_w^m g), \quad \lambda_i = \frac{K k_i(S)}{\mu_i} ; \quad (6c)$$

$$V_i^{(k)} = V_i + V_{iD}^{(k)} ; \quad V_{iD}^{(k)} = -\frac{\phi D_i^{(k)} S_i}{c_i^{(k)}} \text{grad} c_i^{(k)}, \quad i = g, w \quad (6d)$$

$$P_w = P_g - P_c(S) ; \quad (6e)$$

$$c_g^{(3)} = 1 - c_g^{(1)} - c_g^{(2)} \quad (6f)$$

$$c_w^{(k)} = H^{(k)}(P_w) \cdot c_g^{(k)} \quad (6g)$$

где S – насыщенность воды, P – давление, ρ – молярная плотность, μ – динамическая вязкость, K – абсолютная проницаемость, ϕ – пористость, $k_k(S)$ – фазовая проницаемость, ρ^m – массовая плотность, $H^{(k)}(P_w)$ – коэффициент Генри, g – ускорение силы тяжести, $P_c(S)$ – капиллярное давление, G^{inj} – молярная скорость закачиваемого газа, Ω – общий объем хранилища, V_i – скорость Дарси, $V_i^{(k)}$ – скорость переноса компоненты k в фазе i , $V_{iD}^{(k)}$ – скорость диффузии компоненты k в фазе i , $c^{(k),inj}$ – концентрация компоненты k в закачиваемом газе, $\gamma^{(k)} = \begin{cases} 4/5, k=1 \\ 1/5, k=2 \end{cases}$.

4. Обобщенная модель Тюринга. В общем случае для подземного хранилища водорода, насыщенного водой, обобщением уравнений (4) и (6) получены дифференциальные уравнения для динамики метаногенных бактерий. Полученная модель принимает вид обобщенной модели Тюринга, в которой присутствует конвективный член $\text{div}(\rho_w c_w^{(k)} V_w^{(k)})$ и хемотаксис $-\text{div}(D_{ch}(C^{(1)}) S n_w \text{grad} C^{(1)})$ в отличие от оригинальной модели Тюринга:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_w^{(H_2)}}{\partial t} = q_1 - \alpha_1 c_w^{(H_2)} c_w^{(CO_2)} N^2 + \varepsilon_1 \cdot \Delta_{x,y} \cdot c_w^{(H_2)} \\ \frac{\partial c_w^{(CO_2)}}{\partial t} = q_2 - \alpha_2 c_w^{(H_2)} c_w^{(CO_2)} N^2 + \varepsilon_2 \cdot \Delta_{x,y} \cdot c_w^{(CO_2)} \\ \frac{\partial N}{\partial t} = -\beta \cdot N + \alpha_3 \cdot c_w^{(H_2)} c_w^{(CO_2)} N^2 + D_b \cdot \Delta_{x,y} \cdot N - D_{ch} \cdot \nabla_{x,y} \cdot (\exp(-\lambda_{ch} c_w^{(H_2)}) \cdot N \cdot \nabla_{x,y} \cdot c_w^{(H_2)}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{где } \rho_k = (\rho_g(1-S) + \rho_w H^{(k)} S), q_k = \frac{G^{inj} c^{(k),inj}}{\Omega \phi \rho_k}, \varepsilon_k = \frac{\rho_g D_g^{(k)} \phi(1-S) + \rho_w D_w^{(k)} H^{(k)}(1-S)}{\rho_k},$$

$$\alpha_1 = \frac{4 \cdot H^{(1)} \cdot H^{(2)} \cdot S}{5 \cdot t_{e,w} \rho_1}, \alpha_2 = \frac{H^{(1)} \cdot H^{(2)} \cdot S}{5 \cdot t_{e,w} \rho_2}, \alpha_3 = \frac{\eta_w H^{(1)} \cdot H^{(2)} \cdot S}{t_{e,w}}, \beta = \frac{1}{t_d}$$

Рассматривается асимптотическая модель в виду того, что водород менее растворим в воде по сравнению с углекислым газом

$$\begin{cases} \frac{\partial c_w^{(H_2)}}{\partial t} = q - \alpha_1 c_w^{(H_2)} \cdot N^2 + \varepsilon_1 \cdot \Delta_{x,y} \cdot c_w^{(H_2)} \\ \frac{\partial N}{\partial t} = -\beta \cdot N + \alpha_3 \cdot c_w^{(H_2)} \cdot N^2 + D_b \cdot \Delta_{x,y} \cdot N - D_{ch} \cdot \nabla_{x,y} \cdot (\exp(-\lambda_{ch} c_w^{(H_2)}) \cdot N \cdot \nabla_{x,y} \cdot c_w^{(H_2)}) \end{cases} \quad (8)$$

с начальным и граничным условием:

$$N|_{t=0} = 1, c_w^{(H_2)}|_{t=0} = 1, \frac{\partial c_w^{(H_2)}}{\partial \nu}|_{\partial \Omega} = 0, \frac{\partial N}{\partial \nu}|_{\partial \Omega} = 0. \quad (9)$$

Полученная модель (8) и (9) имеет предельный цикл, если пренебречь диффузионным членом и хемотаксисом. В [7] был получен критерий существования предельного цикла для случая $\alpha_1 = \alpha_3 = \beta = 1$:

$$0,90032 < q < 1,0. \quad (10)$$

Предложенная модель (8)–(9) учитывает хемотаксис и диффузию бактерий и газа в пространст-ве и позволяет исследовать изменение концентрации водорода при подземном хранении водорода.

Дебит q в уравнении (8) подразумевает закачку водорода H_2 в пласт. Возмущение передается через малую окрестность начала координат. На границе поддерживается условие непроницае-мости. В начальный момент времени колония бактерий распределена непрерывно во всем пласте, концентрация водорода H_2 постоянна.

В таблице 1 приведены данные, используемые в расчетах.

На рисунке 2 представлены результаты численного расчета эволюции концентрации водорода без учета хемотаксиса с расчетными данными из таблицы 1. Это означает, что развивается доста-точно регулярное кольцевые волны с избытком и недостатком водорода в пространстве, которые чередуются между собой.

a

b

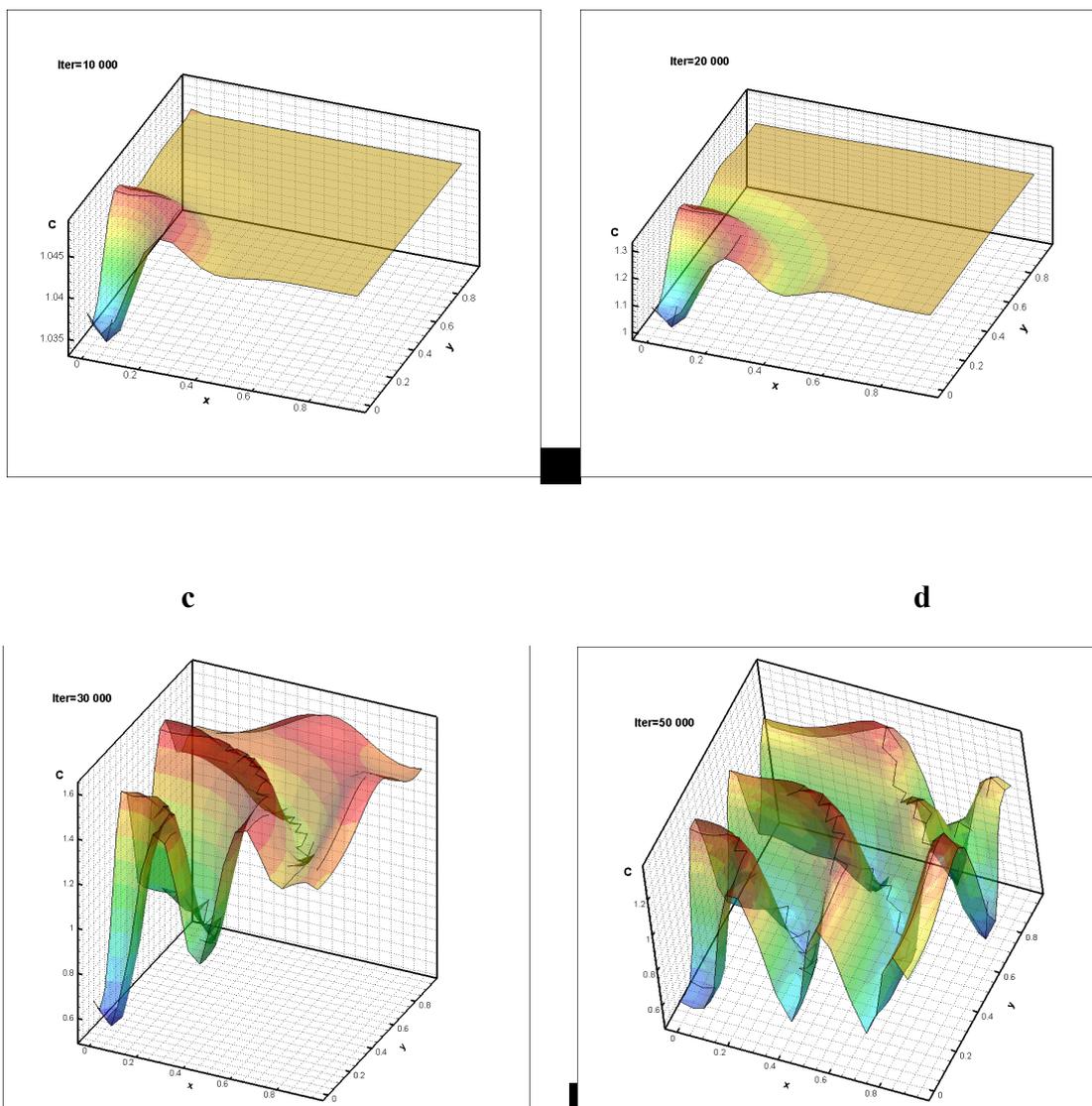


Рисунок 2 – Изменения концентрации водорода
в пространстве при $Time = 0 \dots 200$ с учетом диффузий

На рисунке 3 а, b, c, d представлены изменения количества бактерий в пространстве для следующих итераций 10 000, 20 000, 30 000, 50 000. Результаты расчетов показывают на развитие достаточно регулярных кольцевых волн аналогично концентрациям водорода в пространстве.

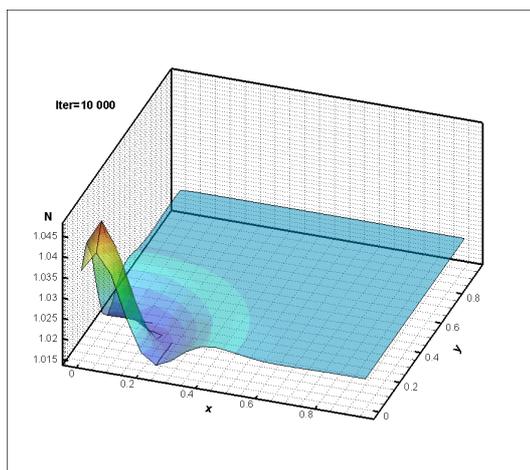
Таблица 1 – Расчетные данные

Сетка	20*20
Число итерации	50 000
Временной шаг	0,004

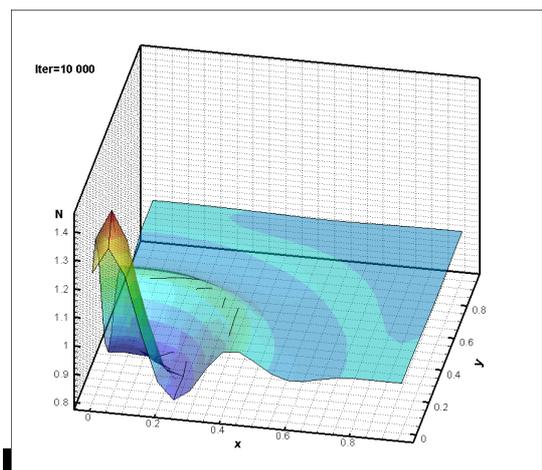
q (на скважине)	0.95+0,01
q (на остальных точках поддерживается дебит)	0.95
$D_w^{(H_2)}$	0.01
D_b	0.001
D_{ch}	0.001
α_1	1
α_3	1
β	1
λ_{ch}	1

Чередование колец с избытком и недостатком бактерий означает, что в областях с высокой концентрацией бактерий реакция (1) протекает быстрее, в результате чего метаногенные бактерии выделяют метан.

a



b



c

d

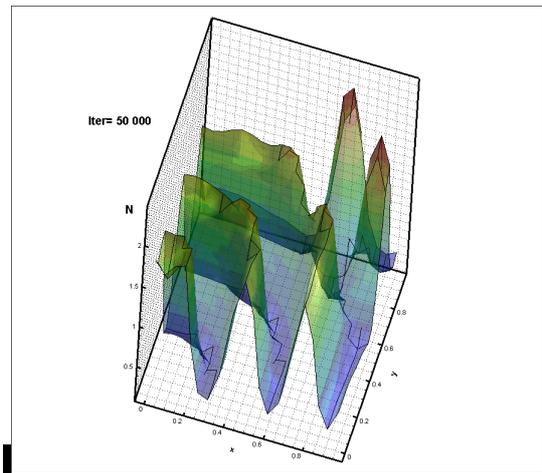
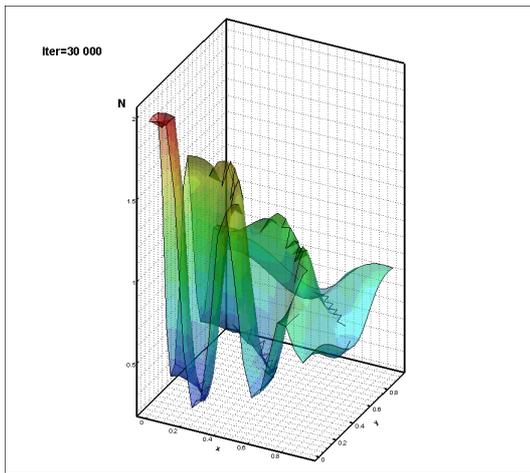
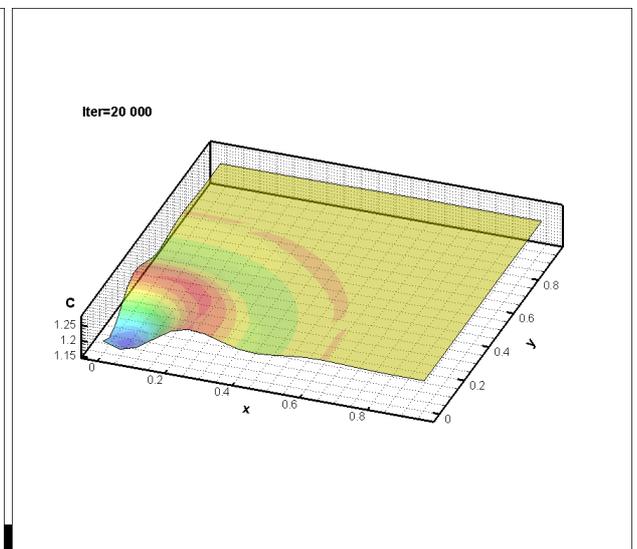
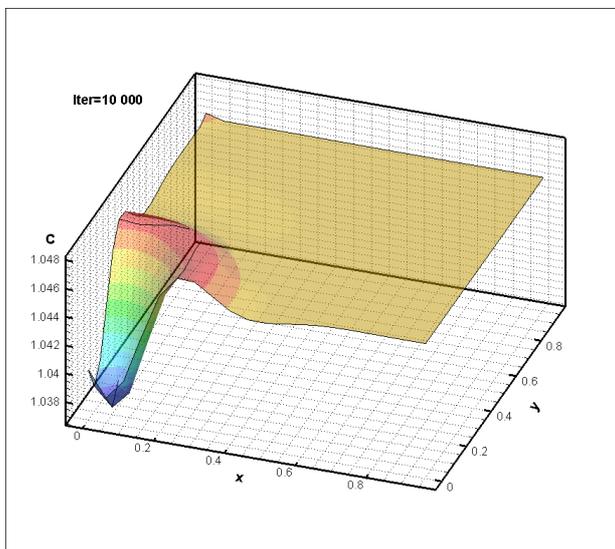


Рисунок 3 – Изменения количество бактерий в пространстве при $Time = 0 \dots 200$ с учетом диффузий

На рисунке 4, 5 представлены результаты расчета концентрации водорода и количества бактерий соответственно с учетом хемотаксиса при $Time = 0 \dots 200$. Результаты численного расчета показывают, что хемотаксис приводит к потере симметрии то система (8) и (9) сохраняют регулярные кольцевые волны и теряют симметрию.

a

b



c

d

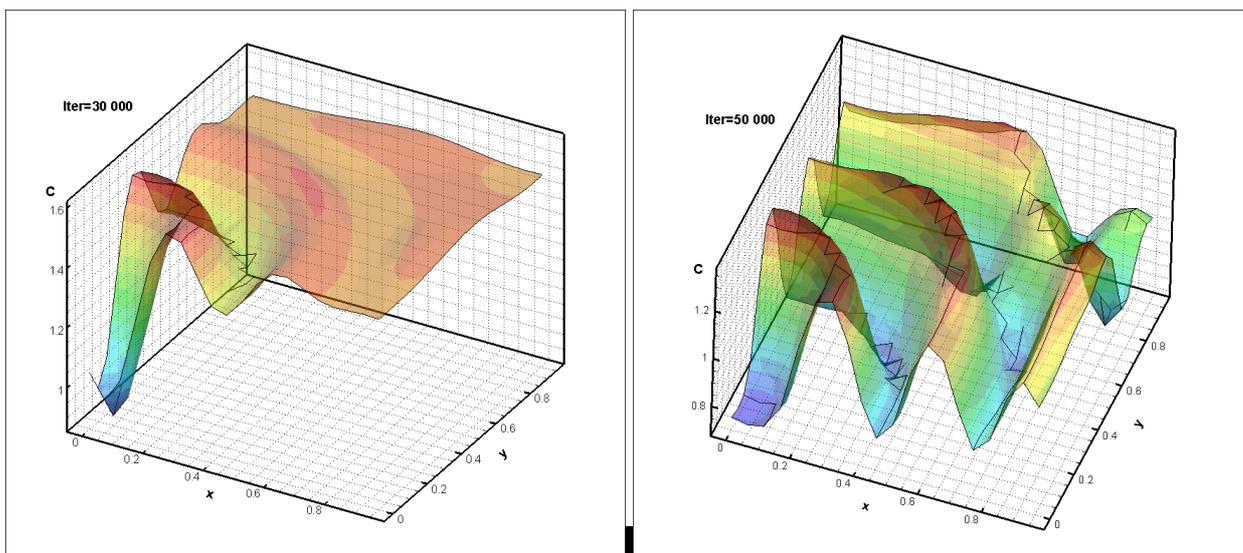


Рисунок 4 – Изменения концентрации водорода в пространстве
при $Time = 0 \dots 200$ с учетом диффузий и хемотаксиса

В настоящей работе была проведена попытка качественного анализа влияния метаногенных бактерий на динамику образования метана при подземном хранении водорода в водоносных пластах. Возникновение незатухающих осцилляций во времени, асимптотически стремящиеся к периодическим, означает, что в системе происходит самоорганизация новых структур в виде метана. Существенно, что эти структуры образуются лишь в достаточно узком диапазоне закачки H_2 согласно $0,90032 < q < 1,0$.

Следует отметить, что как в случае учета хемотаксиса, так и без его учета не наблюдалось затуханий колебаний в пространстве. В пределе получалась статическая замороженная картина пространственных волн.

a

b

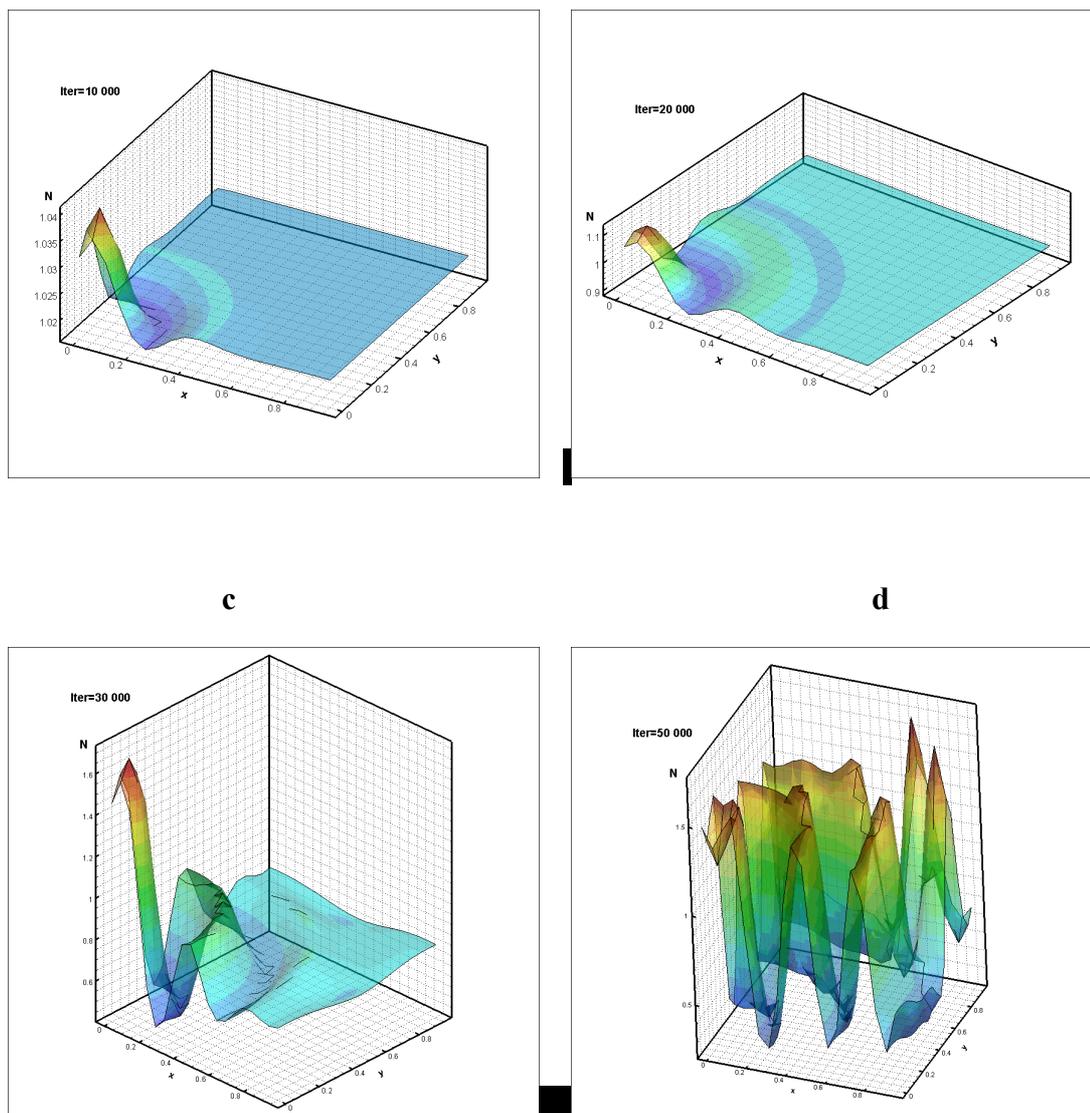


Рисунок 5 – Изменения количество бактерий

в пространстве при $Time = 0...200$ с учетом диффузий и хемотаксиса

Заключение. Уравнения (3), (4) и (6) представляют собой связанную систему, которая описывает двухфазное хранение водорода с биотической реакцией, связанной с динамической системой уравнений популяций в водоносном резервуаре. Поведение подземного хранилища водорода очень сложное и чувствительное к кинетическим параметрам. Полученная концептуальная физическая и математическая модель процесса могут быть использованы для управления ПХВ и анализа образования метана в водоносном пласте.

REFERENCES

1 Bulatov G.G. Underground storage of hydrogen. Ph.D. Thesis, Moscow Gubkin Oil and Gas University, 1979 (in Russ.).

2 Smigai, P, Greksak, M., Kozankova, J., Buzek, F., Onderka, V., Wolf, I.: Methanogenic bacteria as a key factor involved in changes of town gas in an underground reservoir. FEMS Microbiol. Ecol. 73, 1990: P 221–224.

3 Buzek, F., Onderka, V., Vancura, P., Wolf, I.: Carbon isotope study of methane production in a town gas storage reservoir. Fuel 73(5), 1994: 747–752.

4 Gusev, M.V., Mineeva, L.A. (eds.): Microbiology. Moscow Lomonosov University, Moscow (1992) (in Russ.)

5 Panfilov, M., Gravier, G., Fillacier, S.: Underground storage of H₂ and H₂–CO₂–CH₄ mixtures. In: Proc. ECMOR-X: 10th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, 4–7 September 2006 Amsterdam, the Netherlands, Ed. EAGE, 2006, paper A003.

6 Panfilov M. Underground storage of hydrogen: self-organisation and methane generation. Transport in Porous Media, 85, 2010: P 841 - 865.

7 Merkin, J.H, Needham, D.J, Scott, S.K.: On the creation, growth and extinction of oscillatory solutions for a simple pooled chemical reaction scheme. SIAM J. Appl. Math 47, 1040–1060 (1987)

Резюме

А. Е. Төлеуханов¹, М. Б. Панфилов², А. Қалтаев¹

(¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы,

²Лотарингия университеті, Нанси қ.)

ЖЕР АСТЫ СУЫ БАР РЕЗЕРВУАРДА СУТЕГІН САҚТАУ КЕЗІНДЕГІ КӨМІРСУ ҚОСПАСЫ ӨЗГЕРІСІНІҢ ЕКІ ФАЗАЛЫ ҮЛГІСІ

Бұл жұмыста сутегін жер астында суы бар резервуарда сақтау үдерісі қарастырылған. Онда бакте-риялардың бастапқы қоспаға әсері ескеріледі. Сонымен қатар жер асты суы бар резервуарда сутегін сақтау-дың бактериялардың динамикасын ескере отырып екі фазалы үлгісі алынған.

Тірек сөздер: кеуек орта, сутегі, бактерия, нейстон, хемотаксис, популяция динамикасы, осцилляция.

Summary

A. E. Toleukhanov¹, M. B. Panfilov², A. Kaltayev¹

¹Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Republic of Kazakhstan,

²Lorraine University, Nancy)

TWO-PHASE MODEL OF THE COMPOSITION

CHANGE OF HYDROCARBON MIXTURE IN UNDERGROUND HYDROGEN STORAGE

A hydrogen storage in aquifers or depleted gas reservoirs behaves as the natural chemical reactor due to high activity of the methanogenic bacteria which consume hydrogen as the source of energy. In the present paper we develop the new mathematical model of gas-water multicomponent flow with biotic reactions coupled with the system of equations of population dynamics.

Keywords: porous media, hydrogen, bacteria, neuston, chemotaxis, population dynamics, oscillations.

Поступила 15.10.2013г.