

УДК 532.546:519.63

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА В ПОРИСТОМ КОЛЛЕКТОРЕ

Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин, М. К. Хасанов\*

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, 625026 Тюмень, Россия

\* Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
453103 Стерлитамак, Россия

E-mails: musakaev68@yandex.ru, S.L.Borodin@yandex.ru, hasanovmk@mail.ru

Предложена математическая модель и исследованы особенности процесса образования газового гидрата при нагнетании природного газа с заданным составом в пористый коллектор, содержащий в исходном состоянии тот же газ и воду. Построены численные решения осесимметричной задачи, описывающие распределения основных параметров в пласте как с фронтальной поверхностью, так и с объемной областью фазовых переходов. Изучено влияние параметров закачиваемого газа и пористой среды на режим и скорость образования газогидрата.

**Ключевые слова:** пористая среда, фильтрация, газогидрат, фазовый переход, математическая модель.

DOI: 10.15372/PMTF20210406

**Введение.** В последнее время проводится большое количество исследований газовых гидратов, что обусловлено возможностью применения газогидратных процессов [1, 2], например, для хранения газа в газогидратном состоянии в пористых коллекторах. Использование этого способа позволяет хранить большое количество газа в малом объеме при относительно небольшом давлении, а также обеспечивать сохранность газа в течение необходимого промежутка времени и взрывобезопасность его хранения [3, 4].

Способ подземного хранения углекислого газа в газогидратном состоянии может быть применен при разработке мер по уменьшению негативного воздействия парниковых газов на окружающую среду [5, 6]. Также этот способ может быть использован при хранении природного газа [3, 7, 8].

Для обеспечения хранения газа в газогидратном состоянии в пористых коллекторах требуется проведение математического моделирования процесса образования газового гидрата в пористом коллекторе и соответствующих расчетов [9, 10]. Такое описание процесса предложено в ряде работ (см., например, [3, 8, 11–17]). В этих работах, в частности, приведены автомодельные [11, 13–17] и численные [3, 8, 12, 15] решения, описывающие

---

Вычислительные эксперименты и анализ результатов численного исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-29-10023), постановка задачи выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук.

распределения основных параметров в пласте. Показано, что в зависимости от исходного термодинамического состояния системы пористая среда — насыщающий флюид и скорости закачки газа в пористую среду возможно формирование трех зон: 1) ближней, примыкающей к границе зоны нагнетания газа (насыщена газом и его гидратом); 2) дальней невозмущенной зоны (поры пласта в этой зоне заполнены газом и водой или газом и льдом); 3) промежуточной зоны, в которой газ, вода (лед) и газогидрат находятся в состоянии фазового равновесия. В работе [17] доказаны необходимые условия существования решения, в котором область образования газогидрата в пористой среде имеет большую протяженность.

Данная работа посвящена численному исследованию процессов, происходящих в пласте, поры которого изначально заполнены водой и природным газом с заданным составом, при закачке в этот пласт такого же по составу газа с учетом образования газового гидрата. В отличие от моделей, представленных в других работах, построенная математическая модель учитывает фильтрацию воды, неидеальность газа, неизотермические эффекты при фильтрации газа и воды, а также многокомпонентность газа.

**Постановка задачи.** Исследуем процесс нагнетания природного газа с заданным составом в горизонтальный пласт постоянной толщины с непроницаемыми кровлей и подошвой. В исходном состоянии (до начала закачки газа в пласт в момент времени  $t = 0$ ) поры данного коллектора заполнены газом и водой, причем начальные давление  $p_0$  и температура  $T_0$  удовлетворяют термодинамическим условиям существования двухфазной смеси газа и воды. В некоторый момент времени  $t > 0$  через совершенную (вскрывающую пласт по всей его толщине) скважину осуществляется нагнетание газа с постоянными давлением  $p_w$  и температурой  $T_w$  (рис. 1). С учетом принятых предположений запишем следующие начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} t = 0, r_w \leq r \leq R: \quad p &= p_0, \quad T = T_0, \quad S_l = S_{l0}, \quad S_g = 1 - S_{l0}, \quad S_h = 0, \\ t > 0, r = r_w: \quad p &= p_w, \quad T = T_w, \quad S_g = 1, \\ t > 0, r = R: \quad v_g &= 0, \quad v_l = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $t$  — время;  $r$  — радиальная координата;  $r_w$  — радиус скважины;  $R$  — внешний радиус пласта;  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $S_g, S_l, S_h$  — газо-, водо- и гидратонасыщенность;  $S_{l0}$  — начальная водонасыщенность пласта;  $v_g, v_l$  — скорости газа и воды; нижние индексы  $h, l, g$  соответствуют параметрам гидрата, воды и газа.

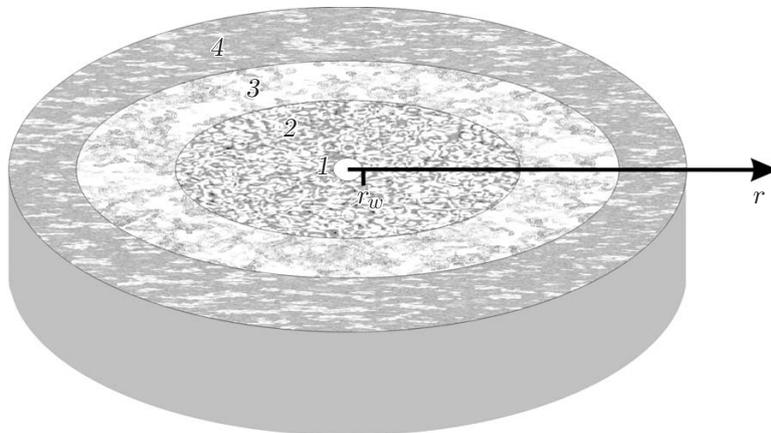


Рис. 1. Схема осесимметричной задачи:

1 — скважина, 2 — область, содержащая газ и гидрат, 3 — область, содержащая газ, воду и гидрат, 4 — область, содержащая газ и воду

Если термодинамические условия нагнетания газа допускают образование газового гидрата, то вблизи скважины возникает область, насыщенная газом и его гидратом. В этом случае, как отмечено выше, в пористой среде возможно формирование трех зон (см. рис. 1).

Примем следующие допущения: скелет пористой среды и газовый гидрат несжимаемы и неподвижны; процесс является однотемпературным, т. е. в некотором бесконечно малом объеме температуры пористой среды и насыщающих веществ (газа, воды и гидрата) одинаковы; массовая концентрация газа  $G$  в гидрате постоянна; фазовые переходы происходят в равновесном режиме [13, 18].

С учетом принятых допущений в осесимметричной постановке уравнения сохранения масс газа и воды, уравнения фильтрации газа и воды, уравнение баланса тепла можно записать в виде [9, 13, 18–20]

$$\begin{aligned} m \frac{\partial S_g \rho_g}{\partial t} + m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r S_g \rho_g v_g) &= -m G \rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \\ m \rho_l \left( \frac{\partial S_l}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r S_l v_l) \right) &= -m(1-G) \rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \\ m S_i v_i &= -\frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad i = g, l, \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + m \left( \frac{\partial (S_g + S_l) p}{\partial t} - \Lambda_1 \frac{\partial p}{\partial t} - \Lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} - \Lambda_3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + m \rho_h L_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (2) \\ \sum_{i=g,l,h} S_i &= 1, \quad \Lambda_1 = \sum_{i=g,l} S_i \rho_i c_i \varepsilon_i, \quad \Lambda_2 = \sum_{i=g,l} S_i \rho_i c_i v_i, \quad \Lambda_3 = \sum_{i=g,l} S_i \rho_i c_i v_i \varepsilon_i, \\ \rho c &= (1-m) \rho_{sk} c_{sk} + m \sum_{i=g,l,h} S_i \rho_i c_i, \quad \lambda = (1-m) \lambda_{sk} + m \sum_{i=g,l,h} S_i \lambda_i, \\ \varepsilon_g &= -\frac{1}{\rho_g c_g} \frac{T}{z_g} \left( \frac{\partial z_g}{\partial T} \right)_p, \quad \varepsilon_l = \frac{1}{\rho_l c_l}, \quad k_i = k_0 k_{ri}, \quad i = g, l, \end{aligned}$$

где  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $\lambda_i$  ( $i = g, l, h$ ) — истинная плотность, теплоемкость и теплопроводность  $i$ -й фазы;  $k_0$  — абсолютная проницаемость пласта;  $k_{ri}$  ( $i = g, l$ ) — относительная фазовая проницаемость  $i$ -й фазы;  $\mu_i$  ( $i = g, l$ ) — динамическая вязкость  $i$ -й фазы;  $\rho_{sk}$ ,  $c_{sk}$ ,  $\lambda_{sk}$  — плотность, теплоемкость и теплопроводность скелета пористой среды;  $\varepsilon_i$  ( $i = g, l$ ) — коэффициент Джоуля — Томсона (дифференциальный коэффициент дросселирования) для  $i$ -й фазы.

Для жидкости и газа примем следующие уравнения состояния [9, 21]:

$$\rho_l = \text{const}, \quad p = z_g \rho_g R_g T, \quad z_g = \left( 0,4 \lg \left( \frac{T}{T_c} \right) + 0,73 \right)^{p/p_c} + \frac{p}{10 p_c} \quad (3)$$

( $z_g$  — коэффициент сверхсжимаемости газа;  $T_c$ ,  $p_c$  — критические температура и давление газа;  $R_g$  — удельная газовая постоянная).

Для нахождения относительных фазовых проницаемостей газа  $k_{rg}$  и воды  $k_{rl}$  использовались эмпирические зависимости [8, 18]

$$\begin{aligned} k_{rg} &= \begin{cases} 0, & 0 \leq S_g \leq 0,1, \\ ((S_g - 0,1)/0,9)^{3,5} (4 - 3S_g), & 0,1 < S_g \leq 1,0, \end{cases} \\ k_{rl} &= \begin{cases} 0, & 0 \leq S_l \leq 0,2, \\ ((S_l - 0,2)/0,8)^{3,5}, & 0,2 < S_l \leq 1,0. \end{cases} \end{aligned}$$

На границах выделенных зон (см. рис. 1) принимается условие непрерывности температуры и давления. В области, где образуется газогидрат, эти параметры удовлетворяют условию фазового равновесия [13, 22]

$$T = T_{s0} + T_* \ln(p/p_{s0}), \quad (4)$$

где  $p_{s0}$  — равновесное давление, соответствующее температуре  $T_{s0}$ ;  $T_*$  — эмпирический параметр, зависящий от состава газового гидрата и фаз, на которые он разлагается.

**Результаты расчетов.** На основе системы уравнений (2)–(4) с учетом начального и граничных условий (1) проведены вычислительные эксперименты, в которых изучались особенности образования газовых гидратов при закачке газа в пласт, насыщенный в исходном состоянии газом и водой. При численной реализации математической модели использовалась приведенная в работе [20] методика, дополненная уравнением движения воды. Расчеты проводились при следующих значениях параметров [9, 23–26]:  $T_0 = 295$  К,  $T_w = 280$  К,  $p_0 = 10$  МПа,  $p_w = 15$  МПа,  $R = 500$  м,  $r_w = 0,1$  м,  $S_{l0} = 0,2$ ,  $k_0 = 10^{-15}$  м<sup>2</sup>,  $m = 0,2$ ,  $\rho_{sk} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_l = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_h = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{sk} = 1000$  Дж/(кг·К),  $c_l = 4200$  Дж/(кг·К),  $c_h = 2000$  Дж/(кг·К),  $\lambda_{sk} = 1,5$  Вт/(м·К),  $\lambda_l = 0,6$  Вт/(м·К),  $\lambda_h = 0,5$  Вт/(м·К),  $\mu_l = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $L_h = 5,1 \cdot 10^5$  Дж/кг.

В работе полагалось, что в пласт закачивается природный газ, имеющий следующий состав: CH<sub>4</sub> (90,74 %), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (3,41 %), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (2,18 %), *i*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (0,66 %), *n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (0,71 %), *i*-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> (0,33 %), *n*-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> (0,26 %), *i*-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> (0,09 %), C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> (0,20 %), N<sub>2</sub> (0,14 %), CO<sub>2</sub> (1,13 %) [9, 27]. В расчетах для газа приняты следующие значения параметров:  $\mu_g = 1,1 \cdot 10^{-5}$  Па·с,  $R_g = 450$  Дж/(кг·К),  $G = 0,13$ ,  $c_g = 2911$  Дж/(кг·К),  $\lambda_g = 0,03$  Вт/(м·К),  $p_{s0} = 3,2$  МПа,  $T_{s0} = 282,65$  К,  $T_* = 8,28$  К.

На рис. 2 приведены распределения давления, температуры и гидратонасыщенности при различных значениях давления нагнетания газа  $p_w$  через 30 сут после начала закачки газа в пласт. Видно, что при принятом в данной работе значении температуры закачиваемого газа (ниже равновесной температуры, соответствующей давлению  $p_w$ ) в пласте происходит гидратообразование. При этом кривая 1 соответствует фронтальной схеме образования газового гидрата (на некотором расстоянии от скважины гидратонасыщенность меняется скачкообразно), при больших значениях  $p_w$  (кривые 2, 3) формируется протяженная зона фазовых переходов, в которой газ, вода и газогидрат находятся в состоянии термодинамического равновесия. При этом с увеличением давления нагнетания длина зоны, в которой образуется газовый гидрат, увеличивается (рис. 3). Это обусловлено тем, что для образования газогидрата в протяженной зоне фазовых переходов давление должно быть больше равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта.

Следует отметить, что режим образования газогидрата как на фронте, так и в протяженной области пористой среды описан в работе [13], в которой в прямолинейно-параллельном приближении построены автомодельные решения задачи об образовании газогидрата, не учитывающие движение воды в пористой среде, неидеальность газа и баротермические эффекты при его фильтрации. В работе [20] проведено сравнение подхода, в котором учитывались неидеальность газа и неизотермические эффекты, возникающие при его фильтрации, с подходом, использованным в работе [13], результаты которого показали, что учет указанных факторов оказывает существенное влияние на характер распределения параметров в пористой среде.

Еще одним параметром, который можно варьировать в процессе нагнетания газа в пласт, является температура закачиваемого газа  $T_w$  (рис. 4). Из рис. 4 следует, что чем выше температура закачиваемого газа, тем меньшее количество гидрата образуется в пласте. При высокой температуре  $T_w$  (кривая 4) газогидрат в пористой среде не образуется. Также заметим, что с увеличением значения  $T_w$  меняется режим образования га-

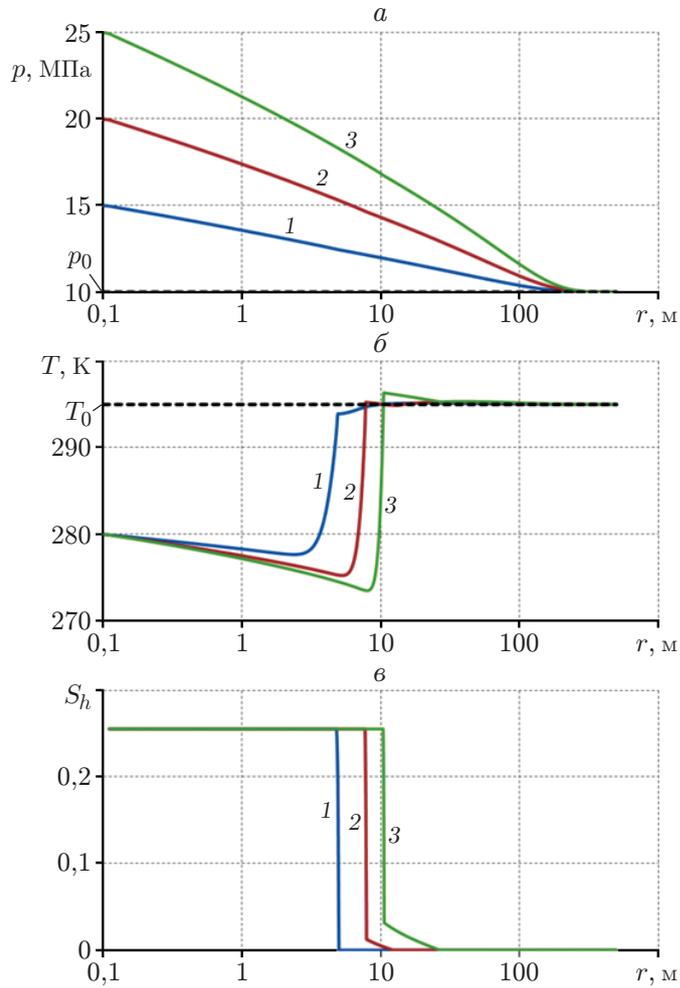


Рис. 2. Распределения давления (*a*), температуры (*б*) и гидратонасыщенности (*в*) по координате  $r$  при различных значениях давления закачки газа  $p_w$ : 1 —  $p_w = 15$  МПа, 2 —  $p_w = 20$  МПа, 3 —  $p_w = 25$  МПа

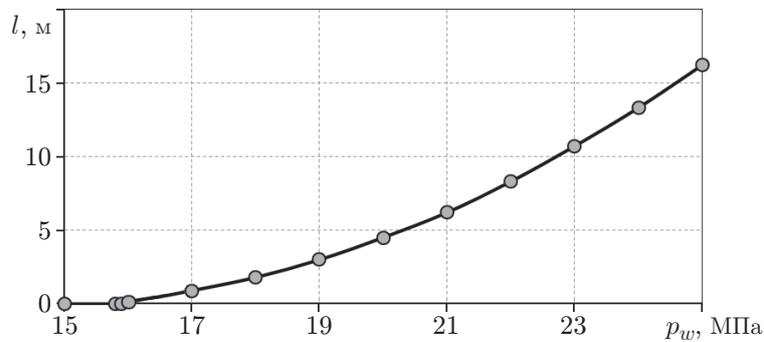


Рис. 3. Зависимость длины протяженной зоны, в которой образуется газовый гидрат,  $l$  от давления нагнетания газа  $p_w$

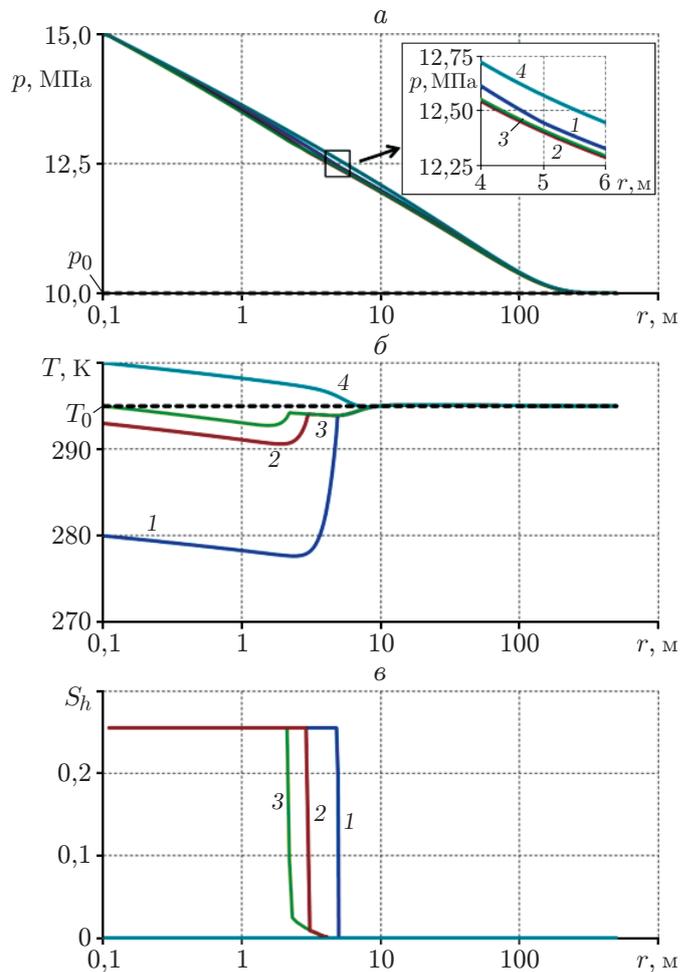


Рис. 4. Распределения давления (а), температуры (б) и гидратонасыщенности (в) по координате  $r$  при различных значениях температуры закачиваемого в пласт газа  $T_w$ :

1 —  $T_w = 280$  К, 2 —  $T_w = 293$  К, 3 —  $T_w = 295$  К, 4 —  $T_w = 300$  К

зогидрата: для принятых в данной работе значений параметров в интервале температур  $T = 280 \div 286$  К образование газогидрата происходит на фронтальной поверхности (рис. 4, 5), при больших значениях температуры  $T_w$  возникает протяженная зона фазовых переходов ( $T = 286 \div 297$  К). Из рис. 5 следует, что с увеличением  $T_w$  ( $T_w > 286$  К) длина зоны, в которой образуется газовый гидрат, увеличивается до некоторого значения, после чего начинает уменьшаться, а затем процесс гидратообразования в пористой среде прекращается.

Согласно рис. 4 зависимость давления в пласте от температуры закачки газа является немонотонной, что обусловлено влиянием температуры на плотность газа и на скорость процесса гидратообразования, сопровождающегося поглощением газа и воды и соответственно изменением давления в пласте. Поскольку, как отмечено выше, возможность образования газогидрата в протяженной зоне фазовых переходов зависит от соотношения между давлением в пласте и равновесным давлением, соответствующим исходной температуре пласта, зависимость длины протяженной зоны, в которой образуется газогидрат, от температуры закачки газа также имеет немонотонный характер (см. рис. 5).

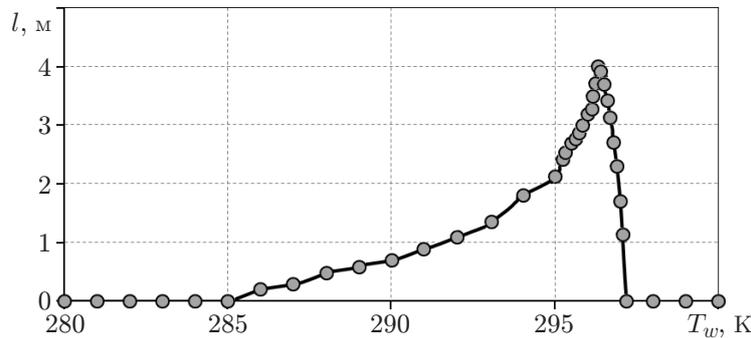


Рис. 5. Зависимость длины протяженной зоны, в которой образуется газовый гидрат,  $l$  от температуры нагнетания газа  $T_w$

В работе [13] показано, что при фильтрации идеального газа в отсутствие дросселирования и адиабатического расширения образование гидрата в протяженной зоне фазовых переходов всегда сопровождается нагревом пласта (при этом температура в данной области превышает исходную температуру пласта). Однако согласно рис. 4 при образовании гидрата в зоне фазовых переходов (кривая 4) температура в этой области меньше исходной температуры пласта. Таким образом, учет в моделях неидеальности газа и баротермического эффекта оказывает существенное влияние на результаты численного решения.

Влияние проницаемости пласта  $k_0$  на процесс формирования полей давления, температуры и гидратонасыщенности показано на рис. 6. Видно, что режим образования газогидрата на фронтальной поверхности характерен для пластов с меньшим значением  $k_0$ , поскольку уменьшение проницаемости пористой среды при фиксированном исходном давлении приводит к уменьшению коэффициента пьезопроводности пласта до значений, меньших значения температуропроводности, а согласно данным [17] в этом случае задача об образовании газогидрата в пористой среде имеет только решение, в котором поверхностью фазовых переходов является фронтальная поверхность.

Согласно данным, представленным на рис. 7, с увеличением проницаемости пласта длина зоны, в которой образуется гидрат, также увеличивается. Это обусловлено тем, что, во-первых, для образования газогидрата в протяженной зоне фазовых переходов давление в пласте должно быть больше равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта, во-вторых, с увеличением проницаемости пласта протяженность области, в которой давление удовлетворяет условиям образования гидрата, увеличивается.

На рис. 8 представлены распределения давления, температуры и гидратонасыщенности по координате  $r$  при различных значениях исходной водонасыщенности  $S_{l0}$  через 30 сут после начала закачки газа в пласт. Следует отметить, что большим значениям  $S_{l0}$  соответствует меньшая протяженность примыкающей к скважине зоны пласта, насыщенной газом и его гидратом. По-видимому, это обусловлено тем, что скорость движения границы области, в которой образуется газогидрат, зависит от количества отводимого тепла, выделившегося при гидратообразовании, а с увеличением водонасыщенности количество выделяющегося тепла также растет, что приводит к увеличению температуры пласта (см. рис. 8) и уменьшению скорости образования газогидрата.

Также согласно рис. 8 при относительно больших значениях исходной водонасыщенности величина гидратонасыщенности в первой зоне (где процесс гидратообразования уже закончился) существенно зависит от координаты. Это обусловлено тем, что величина гидратонасыщенности в точках первой зоны пласта определяется количеством воды, содержащейся в порах пласта до момента ее перехода в газогидратное состояние. При этом с увеличением водонасыщенности относительная фазовая проницаемость воды и соответ-

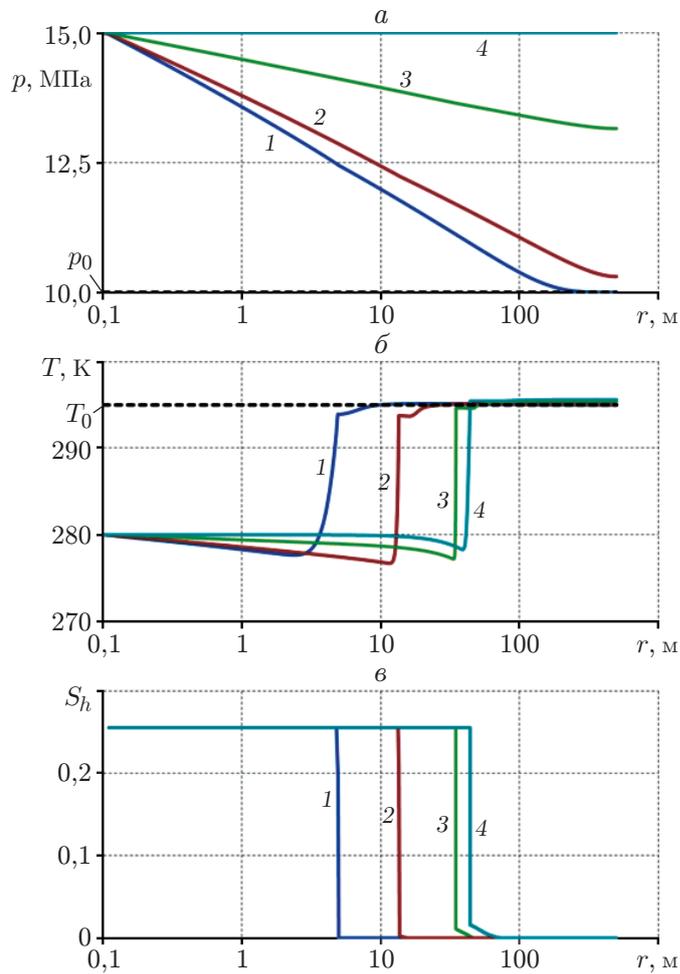


Рис. 6. Распределения давления (*a*), температуры (*б*) и гидратонасыщенности (*в*) по координате  $r$  через 30 сут после начала закачки газа в пласт при различных значениях проницаемости пласта  $k_0$ :

1 —  $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$ , 2 —  $k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2$ , 3 —  $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$ , 4 —  $k_0 = 10^{-12} \text{ м}^2$

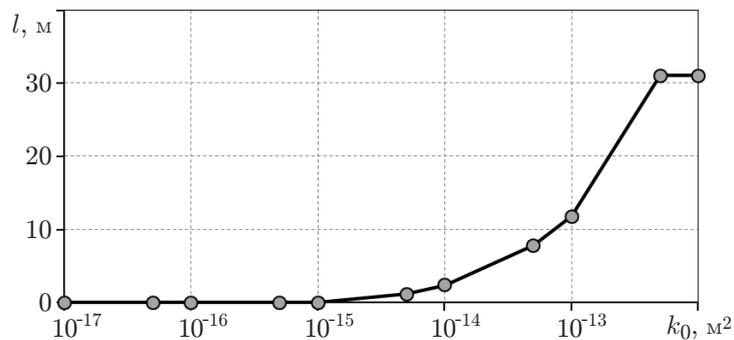


Рис. 7. Зависимость длины протяженной зоны, в которой образуется газовый гидрат,  $l$  от проницаемости пласта  $k_0$

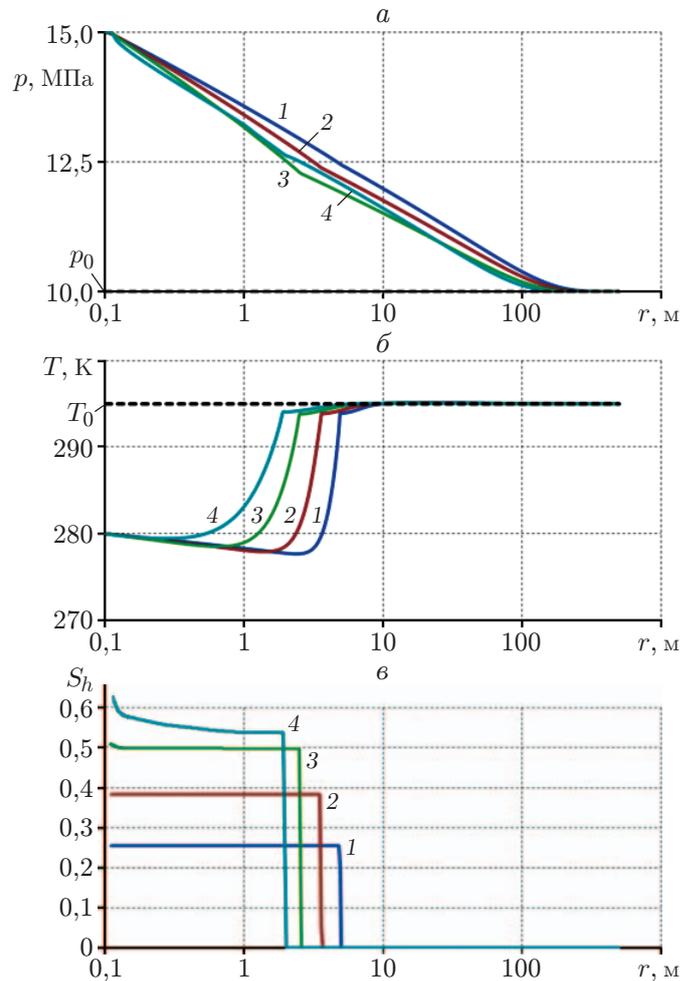


Рис. 8. Распределения давления (*a*), температуры (*б*) и гидратонасыщенности (*в*) по координате  $r$  при различных значениях исходной водонасыщенности  $S_{l0}$ :  
 1 —  $S_{l0} = 0,2$ , 2 —  $S_{l0} = 0,3$ , 3 —  $S_{l0} = 0,4$ , 4 —  $S_{l0} = 0,5$

ственно скорость ее фильтрации также возрастают. Поэтому закачка газа приводит к более существенному вытеснению воды из первой зоны пласта.

Следует отметить, что зависимость давления в пласте от величины исходной водонасыщенности имеет немонотонный характер (см. рис. 8). Это обусловлено достаточно сложным характером влияния водонасыщенности на давление. В частности, при относительно больших значениях водонасыщенности наличие фильтрации воды существенно влияет на давление в пласте, а зависимость относительной фазовой проницаемости воды и газа от водо- и газонасыщенности имеет достаточно сложный характер. Кроме того, скорость гидратообразования, сопровождающегося поглощением газа и воды (и соответственно изменением давления в пласте), также существенно зависит от водонасыщенности.

**Заклучение.** Предложена математическая модель, описывающая процесс закачки природного газа с заданным составом в пористую среду, заполненную в начальном состоянии газом и водой. В модели учтены основные особенности этого процесса: неизотермическое фильтрационное двухфазное течение, гидратообразование, реальные свойства газа, адиабатическое охлаждение, эффект Джоуля — Томсона. Показано, что учет фильтрации воды, неидеальности газа и баротермического эффекта оказывает существенное

влияние на характер процесса образования гидрата. В частности, установлено, что вследствие влияния указанных факторов зависимости давления в пласте и длины протяженной зоны, в которой образуется газогидрат, от температуры закачки имеют немонотонный характер. Кроме того, с увеличением исходной водонасыщенности зависимость давления в пласте от этой величины становится немонотонной, а зависимость гидратонасыщенности в первой зоне (где процесс гидратообразования закончился) от координаты  $r$  — более существенной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов Ф. А., Истомина В. А., Родионова Т. В.** Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // Рос. хим. журн. 2003. Т. 47, № 3. С. 5–18.
2. **Makogon Y. F.** Natural gas hydrates: A promising source of energy // J. Natur. Gas Sci. Engng. 2010. V. 2, N 1. P. 49–59. DOI: 10.1016/j.jngse.2009.12.004.
3. **Bondarev E. A., Rozhin I. I., Popov V. V., Argunova K. K.** Underground storage of natural gas in hydrate state: Primary injection stage // J. Engng Thermophys. 2018. V. 27, N 2. P. 221–232. DOI: 10.1134/S181023281802008X.
4. **Veluswamy H. P., Kumar A., Seo Y., et al.** A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates // Appl. Energy. 2018. V. 216. P. 262–285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.059.
5. **Дучков А. Д., Соколова Л. С., Аюнов Д. Е., Пермяков М. Е.** Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13, № 4. С. 62–68.
6. **Заводовский А. Г., Мадыгулов М. Ш., Решетников А. М.** Кинетика роста газогидрата фреона-12 при термоциклировании образца // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 5. С. 55–62. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(55-62).
7. **Казарян В. А.** Подземное хранение газов и жидкостей. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2006.
8. **Бондарев Э. А., Рожин И. И., Попов В. В., Аргунова К. К.** Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. 2015. Т. 19, № 4. С. 64–74.
9. **Шагапов В. Ш.** Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа / В. Ш. Шагапов, Н. Г. Мусакаев. М.: Наука, 2016.
10. **Цыпкин Г. Г.** Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009.
11. **Нурисламов О. Р., Шагапов В. Ш.** Нагнетание газа во влажную пористую среду с образованием газогидрата // Прикл. математика и механика. 2009. Т. 76, вып. 5. С. 809–823. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2009.11.011.
12. **Шагапов В. Ш., Хасанов М. К., Гималтдинов И. К., Столповский М. В.** Численное моделирование образования газогидрата в пористом пласте конечной протяженности при продувке его газом // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 4. С. 116–126.
13. **Shagapov V. Sh., Musakaev N. G., Khasanov M. K.** Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 84. P. 1030–1039. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.105.
14. **Хасанов М. К.** Исследование режимов образования газогидратов в пористой среде, частично насыщенной льдом // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 2. С. 255–266. DOI: 10.1134/S0869864315020109.

15. **Шагапов В. Ш., Чиглинцева А. С., Шепелькевич О. А.** Численное моделирование образования гидрата при нагнетании холодного газа в снежный массив // *Мат. моделирование*. 2019. Т. 31, № 1. С. 63–84. DOI: 10.1134/S0234087919010040.
16. **Musakaev N. G., Khasanov M. K.** Solution of the problem of natural gas storages creating in gas hydrate state in porous reservoirs // *Mathematics*. 2020. V. 8, N 1. 36. DOI: 10.3390/math8010036.
17. **Khasanov M. K., Musakaev N. G.** The conditions for the existence of an extended region of gas hydrate formation in a porous medium // *Lobachevskii J. Math.* 2020. V. 41, N 7. P. 1222–1227. DOI: 10.1134/S1995080220070203.
18. **Басниев К. С.** Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1993.
19. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
20. **Musakaev N. G., Borodin S. L., Gubaidullin A. A.** Methodology for the numerical study of the methane hydrate formation during gas injection into a porous medium // *Lobachevskii J. Math.* 2020. V. 41, N 7. P. 1272–1277. DOI: 10.1134/S199508022007032X.
21. **Гуревич Г. Р.** Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей / Г. Р. Гуревич, А. И. Брусиловский. М.: Недра, 1984.
22. **Бык С. Ш.** Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. М.: Химия, 1980.
23. **Истомин В. А.** Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. М.: Недра, 1992.
24. **Misyura S. Y., Donskoy I. G.** Dissociation kinetics of methane hydrate and CO<sub>2</sub> hydrate for different granular composition // *Fuel*. 2020. V. 262. 116614. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116614.
25. **Musakaev N. G., Borodin S. L.** To the question of the interpolation of the phase equilibrium curves for the hydrates of methane and carbon dioxide // *MATEC Web Conf.* 2017. V. 115. 05002. DOI: 10.1051/mateconf/201711505002.
26. **Meleshkin A. V., Bartashevich M. V., Glezer V. V.** Hydrate formation in water foam volume // *J. Engng Thermophys.* 2020. V. 29, N 2. P. 279–284. DOI: 10.1134/S1810232820020101.
27. **Shagapov V. Sh., Urazov R. R., Musakaev N. G.** Dynamics of formation and dissociation of gas hydrates in pipelines at the various modes of gas transportation // *Heat Mass Transfer*. 2012. V. 48, N 9. P. 1589–1600. DOI: 10.1007/s00231-012-1000-3.

*Поступила в редакцию 24/II 2021 г.,  
после доработки — 24/II 2021 г.  
Принята к публикации 29/III 2021 г.*

---