

УДК 532.685: 532.71

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ КРИОПЭГОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОД, НАСЫЩЕННЫХ РАСТВОРОМ СОЛИ

© 2024 г. М. М. Рамазанов^{1,2,*}, Н. С. Булгакова^{1,3,**}, академик РАН Л. И. Лобковский^{4,***}

Поступило 30.10.2023 г.

После доработки 30.10.2023 г.

Принято к публикации 12.02.2024 г.

На основе математической модели, учитывающей эффект осмоса, получен критерий образования криопэггов в промерзающих породах, насыщенных раствором соли. Показано, что указанный критерий существенно зависит от коэффициента осмоса. Исследованы свойства криопэга в зависимости от параметров задачи.

Ключевые слова: промерзание, засоленные породы, криопэги, осмос, математическая модель, моделирование

DOI: 10.31857/S2686740024020094, EDN: KNEIDT

Промерзание горных пород, насыщенных раствором солей, является сложным процессом, включающим различные механизмы переноса солей и влаги, а также развитие различных деформаций и напряжений в грунтовом скелете.

Согласно современным представлениям, в течение геологической истории толщи горных пород в прибрежной зоне Сибирского арктического шельфа подвергались периодическим процессам трансгрессии и регрессии моря, а также замерзания и оттаивания, в результате чего здесь сформировалась мерзлота с большим количеством линз и прослоев сильноминерализованных вод с отрицательной температурой,

называемых криопэгами [1, 2]. В то же время известно, что соленая морская вода и криопэги самым существенным образом способствуют разрушению и деградации вечной мерзлоты и, соответственно, интенсивному высвобождению метана в результате разложения метастабильных газогидратов, содержащихся в мерзлых породах в самоконсервированном виде [3–5]. Метан является мощным парниковым газом и влияет на глобальное потепление [6]. Поэтому исследования закономерностей образования криопэггов при промерзании пород, насыщенных раствором солей, весьма актуальны.

Моделирование процессов как замерзания, так и оттаивания пород и почв, насыщенных раствором солей, проводили многие авторы [7–9]. Существенным отличием предлагаемой нами модели является то, что в ней учитывается осмос, связанный с градиентом концентрации соли, который характерен для растворов и является мощным механизмом движения (миграции) растворов в слабопроницаемых пористых средах [10, 11]. Это, в частности, позволяет найти критерий образования криопэггов в промерзающих засоленных грунтовых средах, который существенно зависит от коэффициента осмотической фильтрации. Кроме того, как правило, аналогичные модели не учитывают

¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал Объединенного института высоких температур Российской академии наук, Махачкала, Россия

²Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

³Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: mukatay-ipg@mail.ru

**E-mail: ipgnatali@mail.ru

***E-mail: llobkovsky@ocean.ru

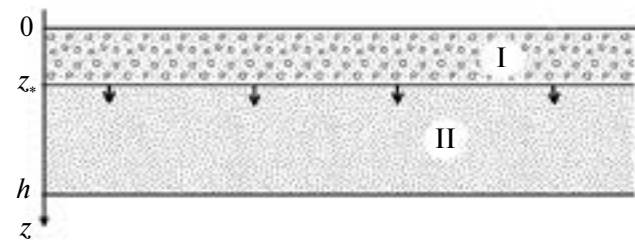


Рис. 1. Схема задачи: I — частично замороженная область пласта, насыщенная льдом и раствором соли, находящимися в термодинамическом равновесии; II — незамороженная область пласта, насыщенная раствором соли; $z = z_*(t)$ — фронт частичного замерзания раствора.

деформацию вмещающих пород, что не всегда оправдано, особенно при влиянии осмоса, который может создавать большие давления, способные разрушить пласт.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеется горизонтальный проницаемый грунтовый пласт, насыщенный раствором соли с постоянной концентрацией и с заданной температурой. В некоторый момент времени на верхней границе температура падает ниже температуры замерзания при данном локальном давлении и данной концентрации раствора. Тогда сверху вниз будет распространяться фронт частичного замерзания раствора (рис. 1).

Требуется сформулировать математическую модель рассматриваемого процесса и исследовать условия образования и свойства криопэггов.

Отметим, что, вообще говоря, над двумя слоями, показанными на рис. 1, будет присутствовать еще один полностью замерзший слой с подвижной границей. Однако можно показать, что если проницаемость не слишком мала, то граница этого слоя будет двигаться намного медленнее передней границы частичного замерзания, показанной на рис. 1. В этом случае указанный первый слой в первом приближении можно не учитывать. При необходимости учет этого слоя не составит принципиальных трудностей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Приведем систему уравнений в первом слое. Направим ось z вниз и выберем систему координат, как это показано на рис. 1.

Область I. Система в этой области находится в состоянии фазового равновесия, потому согласно уравнению состояния температура является функцией давления и концентрации соли. Обычно считается, что температура зависит от концентрации линейно. Другими словами, уравнение состояния можно записать в виде

$$p = P_w(T + \psi_0 c), \quad (1)$$

здесь $p = P_w(T)$ — известная функция, уравнение состояния для чистой жидкости.

Система уравнений в рассматриваемой области пласта запишется в виде

$$\begin{aligned} v = -\frac{k f_w(s)}{\eta} \left(\rho_w \frac{\partial \mu_1}{\partial c} c' + \frac{dP}{dT} (T' + \psi_0 c') - \rho_w g \right), \\ \frac{\partial}{\partial t} [m(s \rho_w + (1-s) \rho_i)] + (\rho_w v)' = 0, \\ (ms + \Gamma) \frac{\partial c}{\partial t} + v c' = (s D c')' - c_0 \frac{m \rho_i}{\rho_w} \frac{\partial s}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Gamma(K, c) = \frac{\partial a(K, c)}{\partial c}, \quad \lim_{Kc \rightarrow \infty} a(K, c) = a_\infty,$$

$$\bar{C}_m \frac{\partial T}{\partial t} + q m \rho_i \frac{\partial s}{\partial t} + \rho_w \bar{C}_w v T' = (\lambda_m T')',$$

$$\bar{C}_m = C_m - m s \beta_w T \frac{dP}{dT},$$

$$\rho_w \bar{C}_w = \rho_w C_w - \beta_w T \frac{dP}{dT},$$

$$C_m = m[s \rho_w C_w + (1-s) \rho_i C_i] + (1-m) C_s,$$

$$\lambda_m = m[s \lambda_w + (1-s) \lambda_i] + (1-m) \lambda_s,$$

где k — проницаемость; s — водонасыщенность; ρ_w, ρ_i — плотности воды и льда соответственно; v — поле скорости раствора; C_m — эффективная теплоемкость единицы объема насыщенной пористой среды; C_w, C_i, C_s — теплоемкости воды, льда и пород; T — температура; c — концентрация; c_0 — характерная концентрация; λ_m — эффективная теплопроводность насыщенной пористой среды; $\lambda_w, \lambda_i, \lambda_s$ — теплопроводности воды, льда и пород; μ_1 — химический потенциал

растворителя в растворе; η — вязкость раствора; D — коэффициент диффузии соли в растворе; q — удельная теплота плавления льда; a — концентрация соли в твердой фазе пористой среды; K — константа адсорбционного равновесия; β_w — коэффициент теплового расширения.

В дальнейшем в этой системе будем полагать коэффициенты $\partial \mu_1 / \partial c$, dP_w / dT постоянными величинами, при этом сами величины давления, температуры и концентрации связаны нелинейной зависимостью фазового равновесия (1). Кроме того, для простоты будем считать фазовую проницаемость раствора линейной, т.е. положим

$$f_w(s) = s.$$

В (2) учтена установившаяся адсорбция соли. Например, в случае изотермы Ленгмюра уравнение адсорбции имеет вид

$$a(K, c) = a_\infty \frac{Kc}{1 + Kc}, \quad (3)$$

где a_∞ — значение предельной адсорбции; c — равновесная концентрация адсорбента в растворе.

Отметим, что первый член в законе Дарси в (2), пропорциональный градиенту концентрации, есть осмотическая сила [10]. В (2) первое уравнение — это обобщенный закон Дарси, второе — уравнение баланса массы воды, третье и четвертое — уравнения баланса соли и энергии.

В дальнейшем будем полагать, что выполнено неравенство

$$\frac{\rho_w g}{\gamma dP / dT} \ll 1, \quad \gamma = \frac{T_0 - T^0}{h}, \quad (4)$$

где h — толщина слоя; T_0 — температура на нижней границе области II, T^0 — температура на границе $z = 0$. Неравенство (4) означает, что градиент температуры на линии насыщения, вызванный гидростатическим перепадом давления, который по оценкам составляет примерно один градус на сто метров, мал по сравнению с рассматриваемым градиентом температуры.

В соответствии с условием (4) в дальнейшем в первом уравнении системы (2) будем пренебрегать силой тяжести.

Систему уравнений в области II получим из системы (2), если положить водонасыщенность s равной единице и учесть, что давление уже не будет зависеть от температуры и концентрации, а будет независимой переменной.

Граничные условия. Считая для простоты нижний слой бесконечным, граничные условия, характеризующие сохранение потоков массы воды, соли и энергии, можно записать в виде

$$z = 0: \quad T_i = T_i^0, \quad s = s^0, \quad v = 0, \quad (5)$$

$$z = z_*:$$

$$\rho_w (v_- - m s_- \dot{z}_*) - \rho_i m (1 - s_-) \dot{z}_* = \rho_w (v_+ - m \dot{z}_*),$$

$$T_- = T_+ = T^*,$$

$$-\rho_i q m (1 - s_-) \dot{z}_* + \lambda_- T'_- = \lambda_+ T'_+,$$

$$c_- = c_+ = c^*,$$

$$(v_- - m s_- \dot{z}_*) c_* - s_- D c'_- = (v_+ - m \dot{z}_*) c_* - D c'_+, \quad (6)$$

$$v_+ = -\frac{k}{\eta} p'_+,$$

$$p_- = p_+ = p^* = P(T^*),$$

$$z \rightarrow \infty: \quad p \rightarrow p_0, \quad T \rightarrow T_0, \quad c \rightarrow c_0, \quad (7)$$

где T^0 — значение температуры на границе $z = 0$.

Здесь индексы определены следующим образом: индекс “+” характеризует указанную величину при приближении к той или иной границе снизу, индекс “−” — при приближении сверху, индекс “*” указывает на значение на границе $z = z_*$, верхний индекс “0” — на границе $z = 0$, нижний индекс “0” — на границе $z \rightarrow \infty$.

Отметим, что водонасыщенность на границе фазового перехода может терпеть разрыв. В дальнейшем давление будем отсчитывать от гидростатического, а температуру от T^0 .

Запишем задачу (2) в безразмерном виде. Для этого введем масштабы:

$$[z] = h, \quad [v] = -\frac{k}{\eta h} \frac{dP}{dT} (T_0 - T^0), \quad [t] = \frac{h}{[v]},$$

$$[T] = T_0 - T^0, \quad (8)$$

$$[p] = -\frac{dP}{dT} (T_0 - T^0), \quad [c] = c_0.$$

В безразмерном виде, сохраняя обозначения прежними, имеем в области I:

$$\begin{aligned}
v &= s[(\gamma_f + \psi_0)c' + T'], \\
\frac{1}{N_s} \frac{\partial s}{\partial t} - \frac{1}{N_p} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \psi_0 \frac{\partial c}{\partial t} \right) + v' &= 0, \\
\gamma_c \frac{\partial c}{\partial t} + v c' &= \frac{1}{Pe_c} c'' - \gamma_s \frac{\partial s}{\partial t}, \\
\gamma_T \frac{\partial T}{\partial t} + \gamma_q \frac{\partial s}{\partial t} + v T' &= \frac{1}{Pe_T} T'',
\end{aligned} \quad (9)$$

здесь Pe_T , Pe_c – числа Пекле по температуре и концентрации соответственно.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{N_s} &= m \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w} \right), \\
\frac{1}{N_p} &= \left[\left(s_0 + (1-s_0) \frac{\rho_i}{\rho_w} \right) \frac{\partial m}{\partial p} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{m}{\rho_w} \left(s_0 \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (1-s_0) \frac{\partial \rho_i}{\partial p} \right) \right] (T_0 - T^0) \left| \frac{dP}{dT} \right|, \\
\gamma_f &= \rho_w \left| \frac{\partial \mu_i}{\partial c} \right| c_0 \left[(T_0 - T^0) \left| \frac{dP}{dT} \right| \right]^{-1}, \\
\gamma_c &= ms_0 + \Gamma, \quad \gamma_s = m \frac{\rho_i}{\rho_w}, \\
\gamma_T &= \frac{C_m + ms\beta_w \bar{T} \left| \frac{dP}{dT} \right|}{\rho_w C_w + \beta_w \bar{T} \left| \frac{dP}{dT} \right|}, \\
\gamma_q &= \frac{qm\rho_i}{\left[\rho_w C_w + \beta_w \bar{T} \left| \frac{dP}{dT} \right| \right] (T_0 - T^0)}, \\
Pe_T &= \frac{[v]h \left[\rho_w C_w + \beta_w \bar{T} \left| \frac{dP}{dT} \right| \right]}{\lambda_m}, \\
Pe_c &= \frac{[v]h}{ms_0 D}, \quad [v] = -\frac{k}{\eta h} \frac{dP}{dT} (T_0 - T^0).
\end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения в области II получим, полагая в (9) водонасыщенность тождественно равной единице, а давление независимой величиной.

АВТОМОДЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решение будем искать в автомодельном виде, вводя новую координату ξ :

$$\begin{aligned}
v &= \frac{v(\xi)}{\sqrt{t}}, \quad T = T(\xi), \quad c = c(\xi), \\
p &= p(\xi), \quad \xi = \frac{z}{\sqrt{t}}.
\end{aligned} \quad (11)$$

Тогда будем иметь систему в частично замороженной области II:

$$\begin{aligned}
v &= s[(\gamma_f + \psi_0)c' + T'], \\
-\frac{\xi}{2N_s} s' + \frac{\xi}{2N_p} (T' + \psi_0 c') + v' &= 0, \\
-\left(\frac{\gamma_c \xi}{2} - v \right) c' &= \frac{1}{Pe_c} c'' + \frac{\gamma_s \xi}{2} s', \\
-\left(\frac{\gamma_T \xi}{2} - v \right) T' &= \frac{1}{Pe_T} T'' + \frac{\gamma_q \xi}{2} s'.
\end{aligned} \quad (12)$$

Полагая водонасыщенность s равной единице, получим уравнения во втором слое. В качестве граничных условий имеем равенства (5)–(7), записанные в автомодельных координатах.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ КРИОПЭГОВ

Под криопэггом будем понимать замкнутую область пласта, насыщенную высокоминерализованным раствором в условиях отрицательных температур. Полагаем, что поры на границе криопэга полностью заполнены льдом.

Для того чтобы криопэг мог образоваться, параметры рассматриваемого процесса промерзания должны удовлетворять некоторым критериям. В данном разделе выведены математические неравенства, соответствующие этим условиям. Физическая суть этих условий заключается в том, что если коэффициент осмоса слишком большой, то втягивание влаги, вызванное осмосом, из талой области в промерзающую будет превалировать над промерзанием, и криопэг образоваться не может. Напротив, если осмотический коэффициент равен нулю, то выталкивание раствора из промерзающей области, вызванное ростом равновесного давления при охлаждении и разностью плотностей воды и льда, будет доминирующим процессом, и криопэг в условиях рассматриваемой модели также не образуется.

В данном разделе полагаем, что водонасыщенность в начале координат, т.е. на охлаждаемой границе, равна нулю. В простейшем случае двумерной задачи для образования криопэга

необходимо, чтобы водонасыщенность обращалась в нуль, кроме начала координат, в еще одной точке промерзающей области $\xi_0 \leq \xi_*$, и в этой точке производная водонасыщенности должна быть отрицательной, т.е. должны выполняться условия:

$$\text{при } \xi = \xi_0 \leq \xi_* : \quad s = 0, \quad s' < 0. \quad (13)$$

Рассмотрим полное, включая скорость, уравнение для водонасыщенности, которое получается из системы (12) после исключения вторых производных по температуре и концентрации:

$$\begin{aligned}
\left[\frac{1}{N_s} - \frac{2v}{\xi s} + s \left(Pe_T \gamma_q + (\gamma_f + \psi_0) Pe_c \gamma_s \right) \right] s' + \\
+ s \left[Pe_T \left(\gamma_T - \frac{2v}{\xi} \right) T' + \right. \\
\left. + (\gamma_f + \psi_0) Pe_c \left(\gamma_c - \frac{2v}{\xi} \right) c' \right] = \\
= \frac{1}{N_p} (T' + \psi_0 c'), \\
v = s[(\gamma_f + \psi_0)c' + T'].
\end{aligned} \quad (14)$$

Положим в этом уравнении $s = 0$, тогда получим

$$\left[\frac{1}{N_s} - 2 \frac{(\gamma_f + \psi_0)c' + T'}{\xi} \right] s' = \frac{1}{N_p} (T' + \psi_0 c'). \quad (15)$$

Разлагая решение в ряд Фурье по степеням ξ , с учетом последних двух уравнений в (12) условия возникновения криопэга запишутся в виде

$$\begin{aligned}
s'(\xi_0) &= \frac{N_s T'_0}{N_p} \frac{\gamma_f + \psi_0}{1 + N_s [A - B] \xi_0 T'_0} - \left[A - \frac{\psi_0 B}{(\gamma_f + \psi_0)} \right] \frac{\xi_0^2}{2} < 0, \\
A &= \frac{Pe_T}{2} \left(\gamma_T + \frac{\gamma_f}{\gamma_f + \psi_0} \frac{N_s}{N_p} \gamma_q \right), \\
B &= \frac{Pe_c}{2} \left(\gamma_c - \gamma_f \frac{N_s}{N_p} \gamma_s \right), \\
s(\xi_0) &= 0.
\end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{Здесь } T'_0 = \left. \frac{dT}{d\xi} \right|_{\xi=0}.$$

Если такой точки ξ_0 в частично замороженной области, т.е. области $0 < \xi_0 \leq \xi_*$, нет, то криопэг отсутствует.

Рассмотрим случай малых коэффициентов осмоса, когда

$$\gamma_f \ll \psi_0. \quad (17)$$

Тогда из (16) приближенно получим

$$\begin{aligned}
Pe_T \gamma_T > Pe_c \gamma_c \left[1 - \frac{\gamma_f}{\psi_0} \left(1 - \frac{N_s \psi_0}{N_p \gamma_c} \gamma_s \right) - \right. \\
\left. - \frac{\gamma_f}{\psi_0} \frac{N_s}{N_p \gamma_T} \gamma_q \right], \quad \frac{\gamma_f}{\psi_0} \ll 1.
\end{aligned} \quad (18)$$

Значение ξ_0 находится из второго уравнения (16) или приближенно из уравнения

$$\begin{aligned}
\frac{\gamma_f}{\psi_0} - \left[\frac{Pe_T}{2} \left(\gamma_T + \frac{\gamma_f}{\psi_0} \frac{N_s}{N_p} \gamma_q \right) - \right. \\
\left. - \frac{Pe_c}{2} \left(\gamma_c \left(1 - \frac{\gamma_f}{\psi_0} \right) - \gamma_f \frac{N_s}{N_p} \gamma_s \right) \right] \frac{\xi_0^2}{6} = 0, \\
\frac{Pe_T}{2} \left(\gamma_T + \frac{\gamma_f}{\psi_0} \frac{N_s}{N_p} \gamma_q \right) - \\
- \frac{Pe_c}{2} \left(\gamma_c \left(1 - \frac{\gamma_f}{\psi_0} \right) - \gamma_f \frac{N_s}{N_p} \gamma_s \right) > 0.
\end{aligned} \quad (19)$$

Отсюда следует, что для наличия криопэга требуется, чтобы коэффициент осмоса был отличным от нуля. Кроме того, из (19) следует, что с ростом коэффициента осмоса величина ξ_0 растет и при некотором критическом значении γ_{fc} достигает границы фазового перехода ξ_* , при дальнейшем росте γ_f криопэг раскрывается и водонасыщенность рассматриваемой области на фазовой границе растет. Таким образом, с одной стороны, малые значения коэффициента осмоса необходимы для формирования криопэга, а с другой – при превышении этим коэффициентом критического значения закрытый криопэг не образуется.

Указанное критическое значение γ_{fc} находится из условия $\xi_0 = \xi_*$ или

$$s(\xi_*) = 0. \quad (20)$$

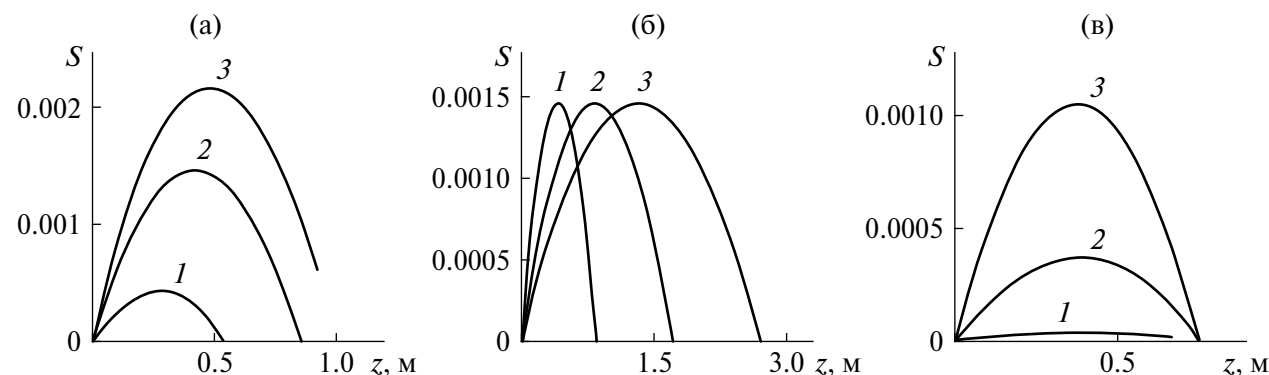


Рис. 2. Распределение водонасыщенности с глубиной при $Pe_c = 10$, $Pe_T = 0.1$, $c_0 = 1.7\%$, $T^0 = -2^\circ\text{C}$.

(а) $t = 1$ год, $\beta_p = 0.1$ при разных значениях коэффициента осмоса: $\gamma_f / \gamma_0 = 0.5; 1.3; 1.8$ (1–3);

(б) $\gamma_f / \gamma_0 = 1.3$, $\beta_p = 0.3$ для разных значений времени: $t = 1; 4; 10$ год (1–3);

(в) $t = 1$ год, $\gamma_f / \gamma_0 = 10$ при разных значениях сжимаемости пород: $\beta_p = 0.01, 0.1, 0.3$ (1–3).

Здесь $\gamma_0 = 10^{-3}$ — характерный для криопэга в данных условиях безразмерный осмотический коэффициент.

Приближенно γ_{fc} можно вычислить, полагая в (19) $\xi_0 = \xi_*$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной задаче о промерзании насыщенных пород имеются две силы: выталкивающая раствор в незамерзшую область и втягивающая. Выталкивающая сила связана с тем, что равновесное давление растет с уменьшением температуры, а также с разностью плотностей воды и льда, а втягивающая — вызвана осмотической силой. В зависимости от значений параметров превалирует та или иная сила. Основные свойства рассматриваемого процесса промерзания обусловлены главным образом конкуренцией этих сил.

Из представленных в предыдущем разделе результатов следует, что при определенных условиях промерзания пород насыщенных раствором солей в мерзлоте могут образоваться криопэги (замкнутые “карманы с рассолом”). Математический критерий образования криопэга в рамках рассматриваемой постановки задачи дает формулы (13)–(19).

Некоторые свойства, связанные с криопэгами, полученные на основе численного решения системы (12), иллюстрирует рис. 2. Как показывают расчеты, криопэги в рассматриваемых условиях образуются при наличии коэффициента осмоса γ_f , но он должен быть достаточно мал. Рисунок 2а показывает, что с увеличением

коэффициента осмоса криопэг растет и расширяется (кривая 2). При дальнейшем росте γ_f криопэг открывается (кривая 3). На рис. 2б показана эволюция криопэга во времени. Видно, что криопэг расширяется вместе с продвижением фронта промерзания. На рис. 2в показаны распределения водонасыщенности с глубиной через год после начала промерзания для различных сжимаемостей пород. Как и следовало ожидать, с ростом водоёмкости размер криопэга становится больше. Кроме того, заметим, что раствор внутри криопэга практически неподвижен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе предложенной математической модели проведены исследования процесса промерзания пород, насыщенных растворами солей с учетом осмотического эффекта. Введен математический критерий образования закрытых “карманов с рассолами” (криопэгов) в мерзлой зоне промерзающих пород. Показаны закономерности зависимости процесса образования криопэгов от коэффициента осмотической силы и других параметров задачи.

На основе численного исследования показано, что при больших значениях осмотического коэффициента в промерзающих грунтах поровый раствор втягивается в промерзающую область из талой области, а при малых, напротив, выталкивается. Выталкивающая сила связана

с тем, что равновесное давление растет с уменьшением температуры, а также с разностью плотностей воды и льда. Это вполне согласуется с результатами физических экспериментов, когда при промерзании глинистые грунты, где осмотические свойства сильно выражены, втягивают раствор, а пески, напротив, выталкивают [12, 13]. Сравнение результатов математических экспериментов с физическими показали не только качественное, но и очень хорошее количественное согласие во многом благодаря учету осмотического эффекта, без которого указанное согласие не достигается.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-67-00025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР / В кн.: Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М.: Наука, 1990. С. 3–9.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений центрального Ямала // Криосфера Земли. Новосибирск: ГЕО. 2002. Т. VI. № 3. С. 15–24.
- Shakhova N., Semiletov I., Dudarev O., Mazurov A.K., Charkin A., Salyuk A., Kosmach D., Karnaukh V., Chernykh D., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Ananiev R., Dmitrevsky N., Meluzov A., Tumskoy V., Koshurnikov A., Gunar A., Grigoriev M. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. V. 8. P. 15872. <https://doi.org/10.1038/ncomms15872>
- Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. Фронтальной режим тепломасспереноса в газогидратном пласте в условиях отрицательных температур // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 4. С. 75–89. <https://doi.org/10.31857/S056852810000562-9>
- Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin S., Shakhova N., Semiletov I. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling // Geosciences. 2019. V. 9 (4). P. 188:1–188:18. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040188>
- Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 190 с.
- Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
- Васильев В.И., Максимов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепломассоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. М.: Наука, Физматлит, 1996. 224 с.
- Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. Явление перегрева и образование двухфазной зоны при фазовых переходах в мерзлых грунтах // ДАН СССР. 1987. Т. 294. № 5. С. 1117–1121.
- Рамазанов М.М., Каракин А.В., Лобковский Л.И. Математическая модель движения растворов с учетом осмотического эффекта // ДАН. 2019. Т. 489. № 1. С. 75–79. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652489175-79>
- Рамазанов М.М., Булгакова Н.С., Лобковский Л.И. Осмотическая конвекция // ДАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 504. № 1. С. 47–52. <https://doi.org/10.31857/S2686740022020109>
- Chuvilin E.M., Ershov E.D., Naletova N.S. Mass transfer and structure formation in freezing saline soils // PERMAFROST – Proc. Seventh International Conference. Yellowknife (Canada), Collection Nordica No 55. 1998. P. 173–179.
- Chuvilin E.M. Migration of ions of chemical elements in freezing and frozen soils // Polar Record. 1999. V. 35 (192). P. 59–66. Printed in the UK. <https://doi.org/10.1017/S0032247400026346>

MATHEMATICAL CRITERION FOR THE FORMATION OF CRYOPAGS DURING THE FREEZING OF ROCKS SATURATED WITH SALT SOLUTION

M. M. Ramazanov^{a,b}, N. S. Bulgakova^{a,c}, Academician of the RAS L. I. Lobkovsky^d

^aInstitute for Geothermal Research and Renewable Energy – Branch of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

^bSadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^cDagestan State Institute of National Economy, Makhachkala, Russia

^dShirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Based on a mathematical model that takes into account the osmosis effect, a criterion for the formation of cryopegs in freezing rocks saturated with a salt solution is obtained. It is shown that this criterion significantly depends on the osmosis coefficient. The properties of the cryopeg are investigated depending on the parameters of the problem.

Keywords: freezing, saline rocks, cryopegs, osmosis, mathematical model, modeling