

УДК 532.685: 532.71

ОСМОТИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СОЛЕНОЙ ВОДЫ В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПОЛУПРОНИЦАЕМЫЕ ОБЛАСТИ, И ЕЕ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

© 2024 г. М. М. Рамазанов^{1,2,*}, академик РАН Л. И. Лобковский^{3,4,**},
Н. С. Булгакова^{1,5,***}, С. Р. Гаджимагомедова^{1,5,****}

Поступило 03.04.2024 г.

После доработки 03.04.2024 г.

Принято к публикации 11.06.2024 г.

Выполнено математическое моделирование и исследование процесса фильтрации соленой воды в осадочной толще с учетом явления осмоса. Показано, что осмотическое взаимодействие соленой и пресной воды в осадочной толще, содержащей прослойки и включения слабопроницаемых пород (глины, илы и т.д.), может привести к появлению зон больших аномалий давления и разрушению геосреды. Предложенный осмотический механизм разрушения геосреды объясняет образование покмарков и кратеров на поверхности пассивных участков коры, не испытывающих каких-либо движений и деформаций длительный период времени. Данный механизм является альтернативным по отношению к распространенной точке зрения о полигональной системе разломов тектонической природы, на основе которых объясняются покмарки на морском дне или кратеры в областях вечной мерзлоты на суше. Исследуемая математическая модель показала, что в рассматриваемых условиях возникает конвекция раствора с замкнутыми линиями тока наподобие гравитационной конвекции.

Ключевые слова: соленый раствор, осмос, обобщенная математическая модель, осмотическая конвекция, осадочная толща, полупроницаемые области, газогидраты, покмарки, кратеры, осмотическое разрушение геосреды

DOI: 10.31857/S2686740024040088, EDN: JOPYXD

Явление осмоса было открыто в 1748 г. французским естествоиспытателем Ж.А. Нолле. Осмос представляет собой одностороннюю диффузию растворителя через полупроницаемую

мембрану из разбавленного раствора в более концентрированный. Движущей силой осмоса является стремление уравнивать концентрацию солей по обе стороны мембраны. Давление, которое оказывает растворитель на мембрану, называется осмотическим. На основе осмотических явлений создаются новые материалы и технологии. Например, известная норвежская компания Statkraft нашла способ превратить осмотическое давление в электричество. Новая технология позволяет извлекать электроэнергию из естественной разницы содержания минеральных солей в пресной и морской воде, а не из кинетической энергии их движения.

Осмотический эффект может проявляться также в малопроницаемых пористых средах (глины, ил) [1–5]. В растворах движущей силой являются градиенты химических потенциалов растворителя и растворенных компонентов [6, 7].

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

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского

Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

⁵Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

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

**E-mail: llobkovsky@ocean.ru

***E-mail: ipgnatali@mail.ru

****E-mail: salikhat.g@gmail.com

В [8] установлено, что осмос может вызвать высокие давления в поровой воде. В работе [2] отмечается, что условия, необходимые для значительного осмотического давления, являются обычными в недрах и что большинство осадочных бассейнов имеют большие контрасты в концентрации растворенных веществ (часто >200 г/л [9, 10]). Аномальные давления в водоносных горизонтах, вызванные химическим осмосом, могут служить механизмом образования разломов [11]. Явление осмоса играет существенную роль при бурении и строительстве скважин. При бурении скважин, даже при очень маленькой проницаемости глинистой корки, в пласт может поступать значительное количество фильтрата бурового раствора вследствие осмотического втягивания, так как осмотическое давление может достигать неожиданно больших значений [12].

Как показано в [13], коэффициент осмоса некоторых природных пород и тампонажных материалов может в десятки, а то и в сотни раз превышать коэффициент фильтрации. Теоретическое объяснение явления химического и термического осмоса на основе неравновесной термодинамики приводится в [6, 7, 12, 14–17].

Для высокой эффективности мембранных свойств пород с высоким содержанием глины, например, сланцев, необходимы низкие пористости (0.05 или ниже) [2]. Эти низкие пористости сланцев, как правило, имеют место на глубинах 1–5 км. Обычно аномальные давления, возникающие в осадочных бассейнах на таких глубинах, объясняются природными и техногенными процессами, к которым, в частности, относятся диагенез, тектонические деформации, добыча нефти. Однако выясняется, что во многих случаях аномальное давление также может возникнуть вследствие осмотического эффекта из-за ранее существовавших химических разностей потенциалов в поровой воде.

В последнее время большой интерес вызывают процессы выбросов парниковых газов, в основном метана, через воронкообразные геоморфологические структуры на морском дне (покмарки), а также крупные кратеры на суше в районах вечной мерзлоты. Что касается крупных кратеров, обнаруженных в последние годы в Сибири на полуостровах Ямал и Таймыр, то их происхождение обычно связывают

со взрывными выбросами метана в атмосферу в результате возникновения аномально высокого давления, связанного с интенсивным притоком флюидов в определенные зоны осадочной толщи. Аналогичные представления о выбросах метана на морском дне в виде холодных сипов часто используются при объяснении природы покмарков. Однако выясняется, что покмарки не обязательно связаны с каналами разгрузки флюидов или газовых сипов, а могут представлять собой просто места нарушений осадочной толщи без каких-либо следов флюидных или газовых потоков. Такая ситуация, например, имеет место в области широкого распространения покмарков на Чукотском плато в Восточной Арктике [18, 19]. Рассматриваемая в работе модель осмотической фильтрации неоднородно соленой воды в осадочной толще, содержащей полупроницаемые области с одной стороны, показывает возможность появления предельно больших аномалий давления, которые могут приводить к разрушению слоистой геосреды, а с другой — демонстрирует картину течения солевого раствора с замкнутыми линиями тока как при гравитационной конвекции.

Для понимания процессов, связанных с осмотической фильтрацией неоднородно соленой воды в осадочной толще с полупроницаемыми включениями, можно выделить две базовые задачи. В первом случае полупроницаемые области осадочных пород содержат сильно концентрированный раствор соли по сравнению с окружающей средой. Вторая задача соответствует противоположному случаю, когда полупроницаемые области насыщены раствором с аномально низкой концентрацией соли. Первый случай с точки зрения приложения к криопэгам в упрощенном виде ранее был рассмотрен в работе [20]. В настоящей работе численно-аналитическим методом решены обе нелинейные задачи. Ранее задача об осмотической конвекции впервые была поставлена и решена авторами в аналитическом виде для случая малых градиентов концентрации соли в растворе [21].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ РАСТВОРОВ

Вывод математической модели фильтрации растворов с учетом осмоса и соответствующих граничных условий можно найти в [6]. Здесь

ограничимся ее формулировкой в простейшем случае.

Имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= -\frac{k}{\eta} \left(\rho \frac{\partial \mu_1}{\partial c} \nabla c + \rho \frac{\partial \mu_1}{\partial T} \nabla T + \nabla p - \rho \mathbf{g} \right), \\ \frac{\partial m \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial (mc + a)}{\partial t} + \gamma \mathbf{v} \nabla c &= \gamma D \Delta c, \\ \frac{\partial a}{\partial t} &= \varphi(a, c, T), \quad m = m(a), \\ C_m \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \nabla T &= \lambda \Delta T. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь первое уравнение – закон Дарси, второе – уравнение неразрывности, третье – уравнение баланса массы соли и четвертое – уравнение баланса энергии; c – концентрация соли; \mathbf{v} – поле скоростей; C_p – удельная теплоемкость раствора; C_m – эффективная теплоемкость единицы объема насыщенной пористой среды; D – коэффициент диффузии соли; k – проницаемость; m – пористость; p – давление; T – температура; μ_1 – химический потенциал растворителя; η – вязкость раствора; λ – эффективная теплопроводность насыщенной пористой среды; ρ – плотность раствора; a – концентрация соли в твердой фазе. Коэффициент γ принимает значения от нуля до единицы. Этот коэффициент характеризует степень влияния пористой среды на фильтрацию соли, т.е. степень проявления мембранного свойства. В случае если пористая среда обладает свойствами идеальной полупроницаемости, т.е. не пропускает молекулы соли, этот коэффициент равен нулю. Если молекулы соли наравне с молекулами растворителя свободно проходят поры, то $\gamma = 1$. В общем случае γ , как и проницаемость, может быть переменной величиной и даже тензором.

Следующие условия являются естественными на границе полупроницаемого включения [6]:

$$\begin{aligned} [\rho v_n] &= 0, \quad \left[\gamma \left(v_n c - D \frac{\partial c}{\partial n} \right) \right] = 0, \\ v_n &= -\beta \left(\rho \frac{\partial \mu_1}{\partial c} [c] + [p] \right), \quad \oint v_n ds = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} [T] &= 0, \quad \left[\rho v_n h - \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right] = 0, \\ \gamma &= \begin{cases} 0, & (x, z) \in \Omega, \\ 1, & (x, z) \notin \Omega, \end{cases} \end{aligned}$$

где β – коэффициент пропорциональности, который зависит от свойств среды, в частности, от ее проницаемости, и должен определяться эмпирическим путем; Ω – область, занимаемая полупроницаемым включением. Первые два равенства описывают условия сохранения потока массы раствора и соли, третье условие вытекает из первого уравнения системы (1), из которого следует, что скачок химического потенциала на границе сред приводит к конечной скорости течения раствора (осмотический эффект). Четвертое условие означает отсутствие источников массы и позволяет устранить произвол, возникающий при решении задачи в двухсвязной области. В случае наличия n включений в растворе такие условия должны выполняться для каждого из них. Наконец, последние два условия означают непрерывность температуры и потока энергии.

Таким образом, система уравнений (1) с условиями (2) на границах полупроницаемых включений, условиями на остальных границах, не обладающих свойствами полупроницаемости, и начальными условиями представляет собой замкнутую математическую модель для описания фильтрации растворов в рассматриваемой пористой среде с полупроницаемыми включениями. Рассмотрим осмотическую конвекцию на основе сформулированной математической модели.

2. ОСМОТИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ

2.1. Постановка задачи

Пусть в бесконечной вертикальной плоскости расположено полупроницаемое включение в виде круга произвольного радиуса (рис. 1). Вдали от включения невозмущенная концентрация убывает линейно с глубиной по закону $c_s = c_0 - \gamma_c z$ (ось z направлена вниз и отсчитывается от центра круга). Считаем, что температура среды также линейно убывает с глубиной таким образом, что плотность раствора с глубиной увеличивается незначительно, т.е. имеет

место устойчивая стратификация и не возникает естественная гравитационная конвекция. Далее, для простоты считаем процесс изотермическим, а плотность постоянной. Механическое равновесие в таких условиях невозможно и поэтому возникнет течение, вызванное осмосом. Необходимо найти стационарное решение задачи, описывающее данное течение.

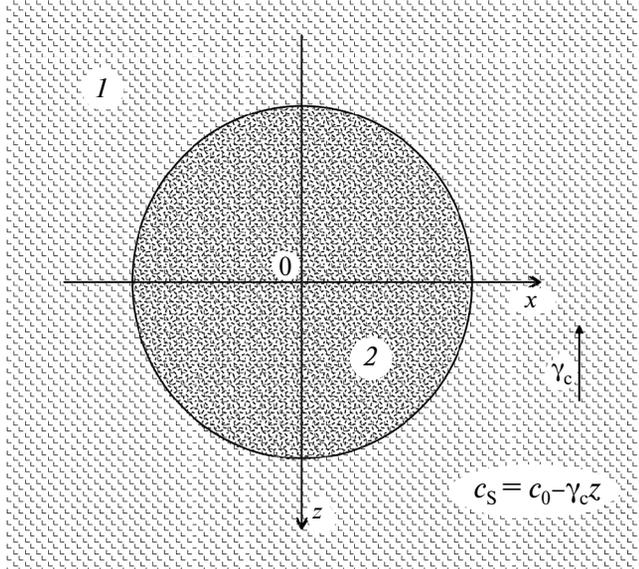


Рис. 1. Модель задачи: 1 – проницаемая пористая среда; 2 – полупроницаемое включение; γ_c – градиент концентрации соли; c_0 – невозмущенная концентрация на глубине центра включения.

Предполагаем, что концентрация соли внутри включения равна $C_0 = \text{const}$, а проницаемость вне включения не слишком мала. Тогда можно не учитывать градиент концентрации в уравнениях движения флюида в обеих средах и считать, что осмос проявляется за счет скачка концентрации соли на границе включения. Кроме того, пренебрегаем выпадением соли в осадок, т.е. адсорбцией. Будем отсчитывать давление от гидростатического, а концентрацию – от начального невозмущенного распределения. Тогда, согласно (1), с учетом сделанных предположений имеем следующие уравнения для области вне включения:

$$\Delta p_e = 0, \quad \mathbf{v}_e = -\frac{k_e}{\eta} \nabla p_e, \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_e \nabla (c_e + c_0 - \gamma_c z) = D_e \Delta c_e$$

и для области внутри круга (включения):

$$\Delta p_i = 0, \quad \mathbf{v}_i = -\frac{k_i}{\eta} \nabla p_i. \quad (4)$$

Граничные условия (2) в полярных координатах имеют вид

$$\begin{aligned} r = r_0: & -\frac{k_e}{\eta} \frac{\partial p_e}{\partial r} = -\frac{k_i}{\eta} \frac{\partial p_i}{\partial r}, \\ & -\frac{k_e}{\eta} \frac{\partial p_e}{\partial r} = -\beta \left[\rho \frac{\partial \mu_1}{\partial c} (c_0 - \gamma_c r_0 \cos \theta + c_e - C_0) + p_e - p_i \right], \\ & -\frac{k_e}{\eta} \frac{\partial p_e}{\partial r} (c_0 - \gamma_c r_0 \cos \theta + c_e) - D \left(-\gamma_c \cos \theta + \frac{\partial c_e}{\partial r} \right) = 0, \\ r \rightarrow \infty: & p_e \rightarrow 0, \quad c_e \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (5)$$

2.2. Безразмерное представление задачи

Запишем задачу в безразмерном виде, вводя масштабы

$$\begin{aligned} [x] = [z] = r_0, \quad [v] = \frac{D}{r_0}, \\ [p] = -\rho \frac{\partial \mu_1}{\partial c} \gamma_c r_0, \quad [c] = \gamma_c r_0, \\ \text{Ra}_o = -\frac{\rho k_e \gamma_c r_0}{\eta D} \frac{\partial \mu_1}{\partial c}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь Ra_o – осмотическое число Рэлея.

В безразмерном виде имеем следующие уравнения:

Вне включения

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_e}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_e}{\partial \theta^2} = 0, \\ v_{er} = -\text{Ra}_o \frac{\partial p_e}{\partial r}, \quad v_{e\theta} = -\text{Ra}_o \frac{1}{r} \frac{\partial p_e}{\partial \theta}, \\ v_{er} \left(\frac{\partial c_e}{\partial r} - \cos \theta \right) + v_{e\theta} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial c_e}{\partial \theta} + \sin \theta \right) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c_e}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c_e}{\partial \theta^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Внутри включения

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_i}{\partial \theta^2} = 0, \\ v_{ir} = -\text{Ra}_o \frac{k_i}{k_e} \frac{\partial p_i}{\partial r}, \quad v_{i\theta} = -\text{Ra}_o \frac{k_i}{k_e} \frac{1}{r} \frac{\partial p_i}{\partial \theta}. \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} r = 1: & -\frac{\partial p_e}{\partial r} = -\frac{k_i}{k_e} \frac{\partial p_i}{\partial r}, \\ & -\frac{\partial p_e}{\partial r} = -\frac{k_i \beta_0}{k_e} \left[\cos \theta - c_e - \sigma_0 + \Sigma_0 + p_e - p_i \right], \end{aligned}$$

$$\sigma_0 = \frac{c_0}{\gamma_c r_0}, \quad \Sigma_0 = \frac{C_0}{\gamma_c r_0}, \quad \beta_0 = \frac{\eta r_0}{k_i} \beta, \quad (9)$$

$$-Ra_o \frac{\partial p_e}{\partial r} (\sigma_0 - \cos \theta + c_e) - \left(-\cos \theta + \frac{\partial c_e}{\partial r} \right) = 0,$$

$$r \rightarrow \infty: \quad p_e \rightarrow 0, \quad c_e \rightarrow 0.$$

2.3. Решение задачи

Опуская для краткости громоздкий вывод решения, приведем сразу его окончательный вид:

$$\Psi_e = Ra_o \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{r^n} \sin n\theta, \quad v_{er} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_e}{\partial \theta}, \quad v_{e\theta} = -\frac{\partial \Psi_e}{\partial r},$$

$$\Psi_i = Ra_o \sum_{n=1}^{\infty} b_n r^n \sin n\theta, \quad v_{ir} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_e}{\partial \theta}, \quad v_{i\theta} = -\frac{\partial \Psi_e}{\partial r},$$

$$c_e = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\alpha_k \ln r + \beta_k}{r^k} \cos k\theta, \quad c_i = 0, \quad (10)$$

$$p_e = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{r^n} \cos n\theta, \quad p_i = \sum_{n=1}^{\infty} a_n r^n \cos n\theta - \sigma_0 + \Sigma_0,$$

$$a_n = -\frac{k_e}{k_i} b_n,$$

$$b_m = \frac{\beta_m - \delta_{m,1}}{1 + \frac{k_i}{k_e} + \frac{k_e m}{k_i \beta_0}}, \quad m = 1, 2, \dots$$

Здесь Ψ – функция тока; индексами e, i обозначены величины, относящиеся к областям вне и внутри полупроницаемого включения соответственно.

Постоянные коэффициенты $\alpha_k, \beta_k, k = 1, 2, \dots$, определяются нелинейными алгебраическими уравнениями

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{nb_n (\alpha_k - k\beta_k)}{k+n+1} cs(n, k, m) - \sum_{n=1}^{\infty} b_n cs(n, 1, m) - \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{nk b_n [\alpha_k + (k+n+1)\beta_k]}{(k+n+1)^2} sn(n, k, m) + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} b_n sn(n, 1, m) = -\frac{2\pi}{Ra_o} \frac{m\alpha_m}{m+1}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha_m = m\beta_m + \delta_{1m} + \frac{Ra_o}{\pi} \left[\pi\sigma_0 m b_m - \sum_{n=1}^{\infty} nb_n cs(n, 1, m) + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} nb_n \beta_k cs(n, k, m) \right], \end{aligned}$$

$$m = 1, 2, \dots$$

Здесь обозначено:

$$cs(n, k, m) = \int_0^{2\pi} \cos n\theta \cos k\theta \cos m\theta d\theta,$$

$$sn(n, k, m) = \int_0^{2\pi} \sin n\theta \sin k\theta \cos m\theta d\theta,$$

$$\delta_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{если } n = m, \\ 0, & \text{если } n \neq m. \end{cases}$$

2.4. Одночленное приближение

Приведем отдельно одночленное приближение в явном виде. Если в рядах (10)–(11) ограничиться только одним членом, получим следующее решение:

$$\Psi_e = Ra_o \frac{b_1}{r} \sin \theta, \quad v_{er} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_e}{\partial \theta}, \quad v_{e\theta} = -\frac{\partial \Psi_e}{\partial r},$$

$$\Psi_i = Ra_o b_1 r \sin \theta, \quad v_{ir} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_e}{\partial \theta}, \quad v_{i\theta} = -\frac{\partial \Psi_e}{\partial r},$$

$$c_e = \frac{\beta_1}{r} \cos \theta, \quad c_i = 0, \quad (12)$$

$$p_e = \frac{b_1}{r} \cos \theta, \quad p_i = a_1 r \cos \theta - \sigma_0 + \Sigma_0,$$

$$\alpha_1 = 0, \quad \beta_1 = \frac{2Ra_o \sigma_0}{1 + Ra_o \sigma_0 + \frac{k_e}{k_i} + \frac{k_e m}{k_i \beta_0}} - 1, \quad (13)$$

$$b_1 = -\frac{2}{1 + Ra_o \sigma_0 + \frac{k_e}{k_i} + \frac{k_e m}{k_i \beta_0}}, \quad a_1 = -\frac{k_e}{k_i} b_1.$$

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выражения (10)–(11), а в одночленном приближении (12)–(13), представляют собой искомого стационарное решение задачи в безразмерном виде. Масштабы величин даны в (6). В этих решениях концентрация соли и давление отсчитываются от невозмущенных начальных распределений. Соответственно для определения безотносительных (полных) значений этих величин необходимо к ним добавить их начальные невозмущенные значения.

Отметим, что одночленное решение (12)–(13) в точности совпадает с решением, полученным в [21] в первом приближении по градиенту концентрации γ_c . Это решение позволяет наглядно увидеть характер зависимости различных величин от параметров задачи, включая осмотическую силу.

Обратим внимание на важное свойство полученного решения. Из решения (10)–(11) или (12)–(13) не трудно заметить, что установившееся поле скоростей не зависит от концентрации соли внутри включения. Стационарное течение полностью определяется концентрацией раствора вне включения и его свойством полупроницаемости. Если градиент концентрации вне включения равен нулю или полупроницаемое включение отсутствует, то раствор будет находиться в механическом равновесии. Однако концентрация соли внутри полупроницаемой области имеет важнейшее значение, поскольку она вместе с концентрацией раствора вне включения определяют величину и характер аномалии давления.

Из (10)–(11) следует, что решение в безразмерном исчислении зависит всего от нескольких параметров, в частности от осмотического числа Рэлея. Исходных же параметров задачи значительно больше. Поэтому данные значений безразмерных величин можно получить для разных значений исходных параметров. Безразмерные величины, использованные на рис. 2, можно получить, например, при следующих значениях исходных параметров:

$$R = 8.3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль}), \quad \rho_w = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, \\ T_0 = 270 \text{ К}, \quad M = 58.44 \text{ г}/\text{моль}, \quad b_0 = 2, \\ c_0 = 30 \text{ г}/\text{л}, \quad \gamma_c r_0 = c_0/3, \quad \phi = 0.1, \\ \eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad k_e = 10^{-18} \text{ м}^2, \quad D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Отсюда с помощью (6) для числа Рэлея получено значение $Ra_0 = 10$.

Рассмотрим полученные результаты. Из рис. 2 следует, что во включении линии тока представляют собой почти прямые наклонные отрезки, вдоль которых растворитель движется вверх. Вне включения раствор движется вниз, образуя в итоге замкнутые линии тока и ячейки. Отметим, что в одночленном приближении линии тока внутри полупроницаемого включения строго вертикальны, а вне включения симметричны относительно не только вертикальной, но и горизонтальной оси симметрии включения. В общем случае, как это видно из рис. 2, имеется асимметрия, и линии тока вне включения несколько вытянуты вниз. Видно также, что по мере удаления от включения

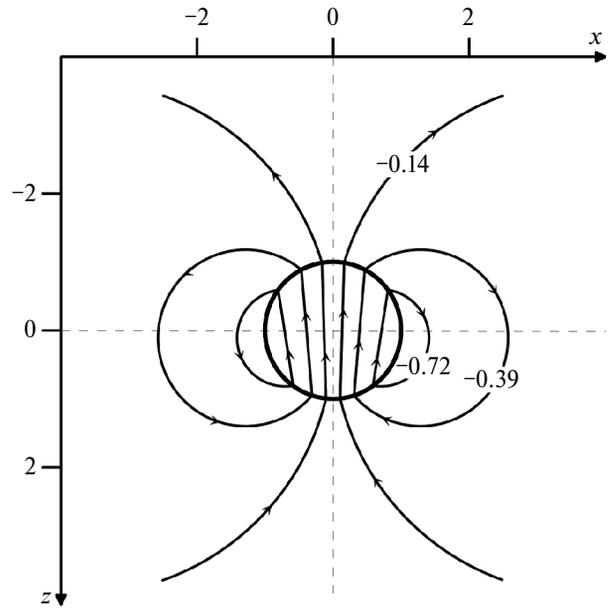


Рис. 2. Линии тока раствора в пористой среде с полупроницаемым включением при:

$$Ra_0 = 10, \quad k_e = 10^{-18} \text{ м}^2, \quad c_0 = 26 \text{ г}/\text{л}, \\ \gamma_c r_0 / c_0 = 1/3, \quad k_i / k_e = 0.1, \\ \phi = 0.1, \quad \eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Цифрами показаны значения функции тока ψ .

интенсивность конвекции падает. Таким образом, исследованная модель показала, что в данных условиях возникает осмотическая конвекция с замкнутыми линиями тока наподобие гравитационной конвекции.

Из рис. 3а видно, что с ростом числа Рэлея расход растет, т.е. растет интенсивность конвекции. Одночленное решение дает неплохое приближение при небольших числах Рэлея, однако с ростом числа Рэлея оно все больше отклоняется от точного решения. Тем не менее, это простое решение может быть использовано для предварительной оценки скоростей фильтрации и изучения свойств осмотической конвекции, как это сделано в [21]. Согласно рис. 3б, расход растворителя растет также и с ростом заданного градиента концентрации γ_c при фиксированном числе Рэлея и прочих параметров. При этом важно подчеркнуть, что число Рэлея также пропорционально γ_c , т.е. конвекция зависит от γ_c не только через число Рэлея, но и через граничное условие. С ростом градиента

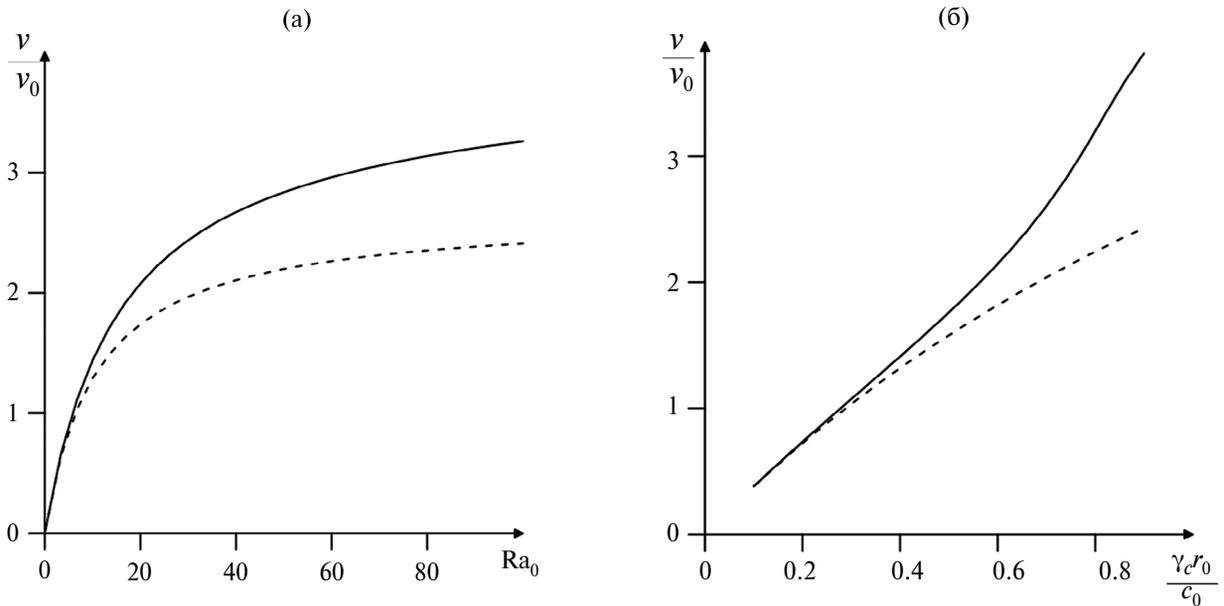


Рис. 3. Зависимость средней скорости фильтрации растворителя через полупроницаемое включение: а – от числа Рэлея при $k_i/k_e = 0.1$ и $\gamma_c r_0 / c_0 = 1/3$; б – от приведенного градиента концентрации при $Ra_0 = 30$. Пунктиром показано одночленное приближение решения. $v_0 = 0.03$ м/год; $c_0 = 30$ г/л; $\gamma_c r_0 / c_0 = 1/3$.

концентрации γ_c отклонение одночленного приближения от точного решения также растет.

Рисунок 4а построен для предельного случая $Ra_0 = 0$, когда раствор покоится, однако он справедлив для произвольных достаточно малых чисел Рэлея, когда конвективным переносом соли вне включения можно пренебречь,

по сравнению с молекулярной диффузией. Из рис. 4 видно, что в этом случае концентрация соли над включением увеличивается, а под включением уменьшается. При этом интенсивность конвекции, согласно рис. 3а, очень мала и равна нулю в предельном случае, когда $Ra_0 = 0$. Рисунок 4б, напротив, соответствует развитой конвекции, когда в основной области

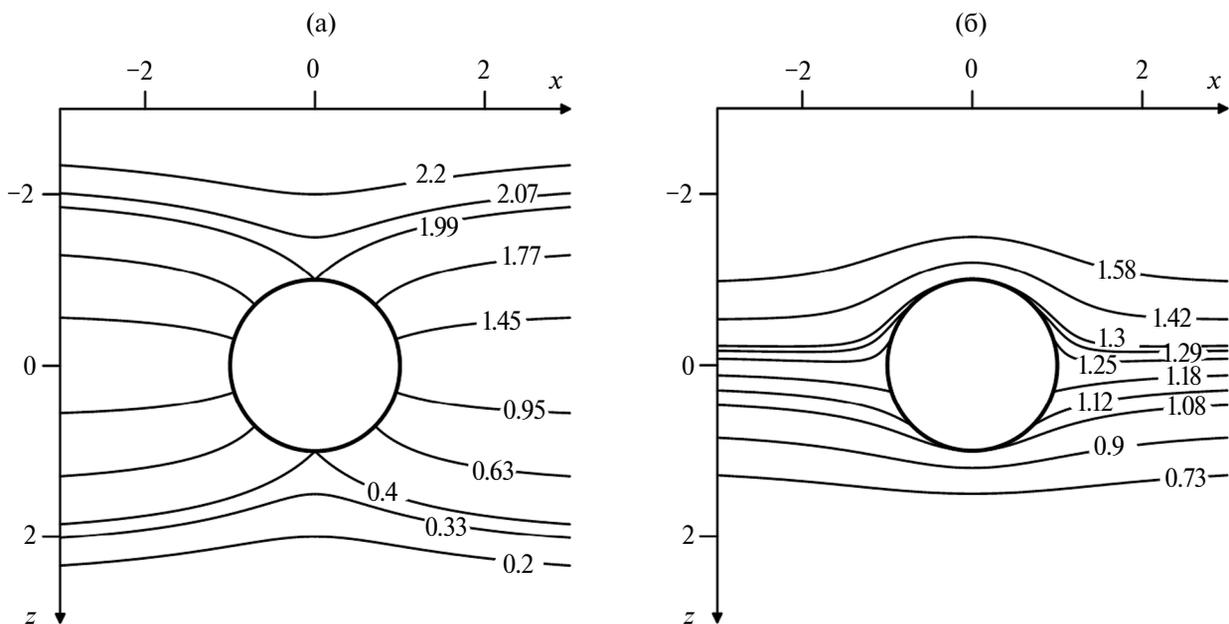


Рис. 4. Линии уровня безразмерной концентрации раствора c/c_* в пористой среде, содержащей полупроницаемое включение при $c_* = 25$ г/л, $\gamma_c r_0 = 10$ г/л, $c_0/\gamma_c r_0 = 3$, $k_i/k_e = 0.1$: $Ra_0 = 0$ (а). $Ra_0 = 30$ (б).

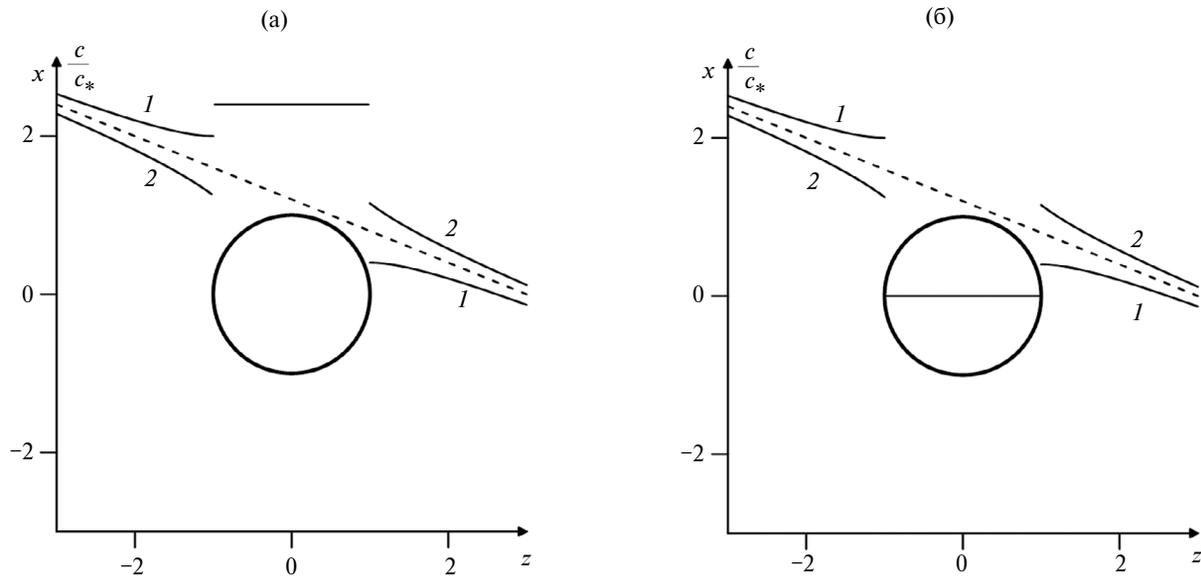


Рис. 5. Распределение концентрации соли в растворе с глубиной при $k_i/k_e = 0.1$ и $Ra_o = 0$ (1); $Ra_o = 30$ (2) а – включение содержит сильно концентрированный раствор; б – включение содержит anomalно слабо концентрированный раствор; $\gamma_c r_0 = 10$ г/л, $c_0/\gamma_c r_0 = 3$, $k_i/k_e = 0.1$, $c_* = 25$ г/л.

конвективный перенос доминирует над диффузией. Диффузия будет играть существенную роль лишь в пограничном слое вблизи границы включения. Как видно из рис. 4б, в этом случае, напротив, концентрация над включением уменьшается, а под включением растет. Это связано с тем, что развитая конвекция стремится выровнять распределение концентрации вне включения. Масштаб солености на рис. 4 равен 25 г/л. Отметим, что линии уровня давления качественно аналогичны, поэтому не приводятся.

На рис. 5 пунктиром показано невозмущенное распределение концентрации соли, цифрой 1 обозначены кривые, справедливые для малых чисел Рэлея, т.е. когда конвекция очень слаба или отсутствует, кривые 2 соответствуют развитой конвекции. Из рисунков следует, что при малых числах Рэлея осмос приводит к росту концентрации соли над включением и ее уменьшению под включением, конвекция же стремится выровнять концентрации соли над и под включением. Концентрация соли внутри включения остается первоначальной, поскольку включение не пропускает молекулы соли. Из рисунка видно так же, что образуются скачки концентрации на границе включения, характерные для осмоса. Масштаб солености на рис. 5 также равен 25 г/л.

Как видно из рис. 6, если внутри полупроницаемой области раствор более концентрированный (рис. 6а), то имеется положительная аномалия давления, в противном случае (рис. 6б) имеет место депрессия давления. Отметим, что во втором случае при некоторых значениях входных параметров давление внутри включения может формально получиться отрицательным, что лишено физического смысла. Это будет означать, что в данном случае вся влага из полупроницаемого включения будет вытянута. Из рис. 6 с учетом рис. 5 следует, что перепад солености в 10 г/л вызывает аномалию давления порядка 1 МПа. Согласно [2], аномалии, вызванные осмосом, в глинистых породах осадочного бассейна могут достигать 20 МПа. Таким образом, в рассматриваемом случае мы имеем аномалию давления, которая может быть значительной.

Рассмотрим одно из возможных приложений полученных результатов. Случай, когда внутри включения имеется положительная аномалия солености раствора и соответственно положительная аномалия давления, в упрощенном виде рассматривался в работе [20] в связи с приложением к криопэгам. Из-за сделанных упрощений наличие полученной выше конвекции в цитированной работе осталось незамеченным, однако аномалия давления в связи с аномалией солености была количественно оценена. В этой

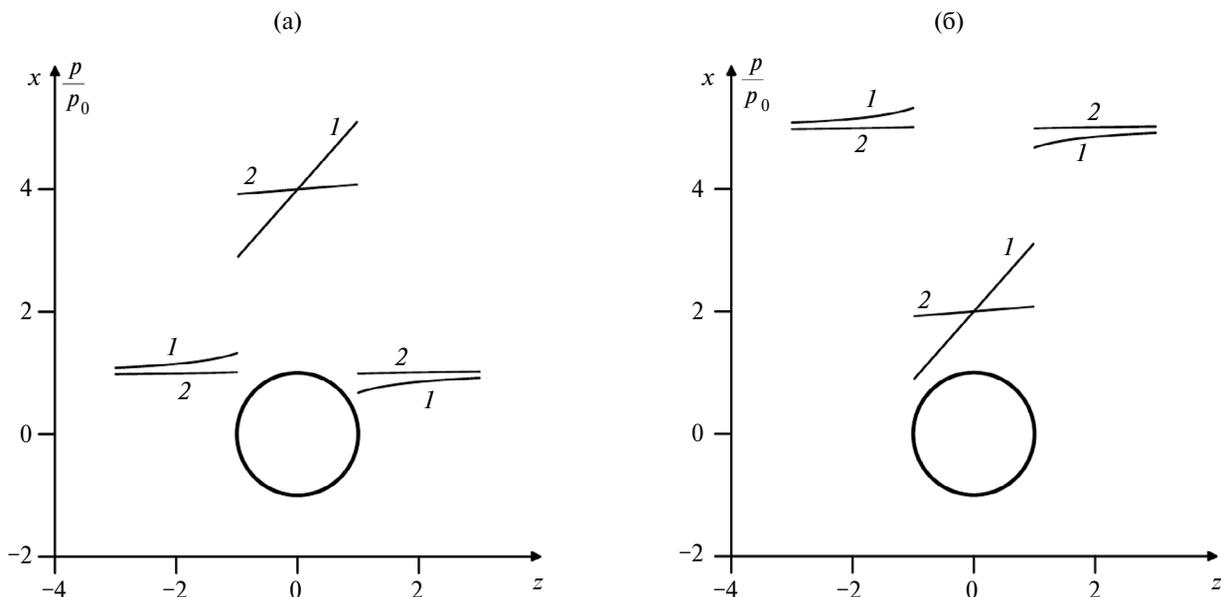


Рис. 6. Распределение безразмерного давления в растворе при $k_i/k_e = 0.3$ и $Ra_o = 0$ (1); $Ra_o = 30$ (2); $p_0 = 1.2$ МПа: а – включение содержит сильно концентрированный раствор, избыточная концентрация равна $C_0 - c_0 = 36$ г/л; б – включение содержит anomalously слабо концентрированный раствор.

работе показано, что значительный объем поверхностной талой воды может мигрировать вниз под действием осмотического давления, связанного с криопэггом (линзой рассола). Показано, что достигаемое на глубине избыточное давление, вызванное скоплением воды в пласте, может превышать предел прочности и вызывать растрескивание мерзлого грунта. Если такие трещины распространяются на поверхность, быстрое снижение давления на глубине может привести к разложению гидрата метана, выделению газа метана и механическому взрыву. Данный механизм рассматривается как возможная причина образования кратеров в Сибири. Предполагается, что это описанное явление также может быть причиной образования покмарков на морском дне в мелкозернистых отложениях, таких как ил и глина. Отмечается, что рассмотренный механизм способен значительно ускорить разложение гидратов метана, и перенос выделенного метана с глубины на поверхность в качестве парникового газа может влиять на потепление климата. Полученное выше более строгое решение задачи (см. рис. 5а–5б) подтверждает реалистичность данной гипотезы.

Рассмотрим теперь второй случай, когда внутри включения имеется отрицательная аномалия солёности раствора и соответственно отрицательная аномалия давления (рис. 5б–5б).

Если внутри рассматриваемого включения имеются газогидраты, то депрессия давления может привести к их быстрому разложению, сопровождаемому последующим ростом давления в пласте, вызванном скоплением освободившегося газа. Это может привести к растрескиванию мерзлого грунта и даже к механическому взрыву [20]. Разница между обоими случаями заключается в том, что в первом случае депрессия давления как триггер разложения газогидратов появляется после первичного образования трещин и разломов из-за повышенного давления на первом этапе, а во втором случае депрессия давления вызвана изначально осмосом из-за anomalously низкой солёности внутри полупроницаемой области. Таким образом, оба сценария выбросов метана имеют схожий характер на поздней стадии.

С другой стороны, возможно объяснение возникновения “сухих” покмарков и без наличия газогидратов – просто в результате схлопывания геосреды из-за значительного уменьшения давления в опресненных зонах слабой солёности. В этом случае на поверхности над опресненными зонами должны возникнуть воронки – “сухие” покмарки, которые наблюдаются в большом количестве на Чукотском плато Восточно-Арктического шельфа [18, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сформулированной математической модели рассмотрена осмотическая фильтрация соленой воды в осадочном слое, содержащем полупроницаемую область, насыщенную сильно или слабо концентрированным, по сравнению с окружающей средой, раствором. Показано, что в обоих случаях может возникнуть осмотическая конвекция с замкнутыми линиями тока наподобие гравитационной конвекции. Эта конвекция, если она развита, приводит к выравниванию концентрации соли, т.е. к уменьшению разности концентрации соли над и под полупроницаемым включением. Показано, что в рассматриваемых условиях может возникнуть значительная депрессия давления в полупроницаемой области. Это может вызвать разложение газогидратов, при их наличии, с последующим повышением давления в пласте с возможным растрескиванием пласта и механическим взрывом с образованием кратеров.

Рассмотренный осмотический механизм разрушения осадочной толщи имеет два важных следствия:

1. Он не связан с обязательной разгрузкой флюидов или газов, что, как правило, подразумевается при анализе покмарков или кратеров. Этот важный вывод позволяет правильно интерпретировать “сухие” покмарки, которые наблюдаются в разных местах, например, в южной части Чукотского плато [18, 19].

2. Достаточно часто встречаются поля покмарков в тектонически пассивных областях коры (например, Чукотское плато), где отсутствовали деформации коры на протяжении достаточно продолжительных периодов времени (миллионы лет и больше). Поэтому осмотический механизм разрушения представляет собой альтернативный подход к интерпретации генезиса покмарков по отношению к традиционному тектоническому подходу, который основывается на существовании так называемой полигональной системы разломов [18].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиала ОИВТ РАН; в рамках государственного задания Института

океанологии им. П.П. Ширшова РАН (проект № FMWE-2024-0018); частично при поддержке РНФ № 22-67-00025, № 21-77-30001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Magara K.* Compaction, Ion Filtration, and Osmosis in Shale and Their Significance in Primary Migration // *The Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 1974. V. 58. №. 2. P. 283–290.
<https://doi.org/10.1306/83D913D5-16C7-11D7-8645000102C1865D>
2. *Neuzil C.E.* Osmotic generation of ‘anomalous’ fluid pressures in geological environments // *Nature*. 2000. V. 40. P. 182–184.
<https://doi.org/10.1038/35003174>
3. *Young A., Low P.F.* Osmosis in argillaceous rocks // *AAPG Bull.* 1965. V. 49. P. 1004–1008.
<https://doi.org/10.1306/A663368E-16C0-11D7-8645000102C1865D>
4. *Fritz S.J.* Ideality of clay membranes in osmotic processes: A review // *Clays Clay Miner.* 1986. V. 34. P. 214–223.
<https://doi.org/10.1346/CCMN.1986.0340212>
5. *Bolt G.H.* Electrochemical phenomena in soil and clay systems // *Developments in Soil Science*. V. 5B. 1979. P. 387–432.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70666-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70666-4)
6. *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>
7. *Keijzer Th.J.S., Loch J.P.G.* Chemical osmosis in compacted dredging sludge // *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 2001. V. 65. P. 1045–1055.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541045x>
8. *Marine I.W., Fritz S.J.* Osmotic model to explain anomalous hydraulic heads // *Water Resour. Res.* 1981. V. 17. P. 73–82.
<https://doi.org/10.1029/WR017I001P00073>
9. *Hanor J.S.* Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins / Ed. John Parnell. Geological Society. 1994. P. 151–174.
10. *Bachu S.* Synthesis and model of formation-water flow // *Alberta Basin, Canada. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 1995. V. 79. P. 1159–1178.
<https://doi.org/10.1306/8D2B2209-171E-11D7-8645000102C1865D>
11. *Berry F.A.F., Hanshaw B.B.* Geological field evidence suggesting membrane properties of shales // *Proc. 21st Int. Geol. Congress. Copenhagen*, 1960. P. 209.
12. *Мирзаджанзаде А.Х., Ентов В.М.* Гидродинамика в бурении. М.: Недра, 1985. 196 с.
13. *Воронкевич С.Д., Сергеев В.И., Емельянов С.Н.* Исследование фильтрационно-осмотических

- процессов при создании плотных защитных экранов / Задачи механики природных процессов. М.: НИИ Механики МГУ, 1983. С. 47–63.
14. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / Под ред. Ю. А. Чизмадзе. М.: Мир, 1973. 280 с.
 15. Чураев Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. М.: Химия, 1990. 272 с.
 16. Graham J., Tanaka N., Crilly T., Alfaro M. Modified Cam-Clay modeling of temperature effects in clays // Can. Geotech. J. 2001. V. 38. P. 608–621. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-3-608>
 17. Srivastava R.C., Avasthi P.K. Non-equilibrium thermodynamics of thermo-osmosis of water through kaolinite // Hydrol. 1975. V. 24. P. 111–120. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(75\)90145-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(75)90145-6)
 18. Астахов А.С., Маркевич В.С., Колесник А.Н., Ван Рудзян, Кононов В.В., Обрезков М.С., Босин А.А. Возможные условия и время формирования покмарков Чукотского плато // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.7868/S0030157414040029>
 19. Логвина Е.А., Матвеева Т.В., Гладыш В.А., Крылов А.А. Комплексные исследования покмарков на Чукотском плато // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2(88). С. 45–54.
 20. Morgado A., Rocha L., Cartwright J., Cardoso S. Osmosis drives explosions and methane release in Siberian permafrost // arXiv - PHYS – Geophysics. Pub Date: 2023-08-11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.06046>
 21. Рамазанов М.М., Булгакова Н.С., Лобковский Л.И. Осмотическая конвекция // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 504. № 1. С. 47–52. <https://doi.org/10.31857/S2686740022020109>

OSMOTIC FILTRATION OF SALT WATER IN SEDIMENTARY STRATA CONTAINING SEMIPERMEABLE AREAS AND ITS POSSIBLE APPLICATIONS

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

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

^b*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, Russia*

^c*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,*

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

^e*Dagestan State Institute of National Economy, Makhachkala, Russia*

Mathematical modeling and investigation of the filtration process of salt water in the sedimentary column, taking into account the phenomenon of osmosis, has been performed. It is shown that the osmotic interaction of salt and fresh water in a sedimentary column containing interlayers and inclusions of poorly permeable rocks (clays, silts, etc.) can lead to the appearance of zones of large pressure anomalies and the destruction of the geomedium. The proposed osmotic mechanism of destruction of the geomedium explains the formation of pockmarks and craters on the surface of passive areas of the crust that do not experience any movements and deformations for a long period of time. This mechanism is an alternative to the common point of view about a polygonal fault system of tectonic nature, on the basis of which marks on the seabed or craters in permafrost areas on land are explained. The mathematical model under study showed that under the conditions under consideration, convection of a solution with closed current lines occurs, similar to gravitational convection.

Keywords: saline solution, osmosis, generalized mathematical model, osmotic convection, sedimentary column, semipermeable areas, gas hydrates, pockmarks, craters, osmotic destruction of the geomedium