

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 532.546: 551.343

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОГО СЦЕНАРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИДОННЫХ ЛЕДЯНЫХ БУГРОВ НА ШЕЛЬФЕ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

В.П. Мельников, К.М. Федоров*, А.А. Вольф**, В.И. Спесивцев***

Тюменский научный центр СО РАН, 625000, Тюмень, ГСП, ул. Таймырская, 74, Россия

** Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Семакова, 10, Россия*

*** Институт механики многофазных систем СО РАН, 625000, Тюмень, ГСП, ул. Таймырская, 74, Россия*

**** Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ГСП, 1230, Россия*

Рассмотрен сценарий образования крупнобугристых ледяных и льдогрунтовых образований, выявленных на дне Печорского моря. Сделан предварительный вывод, что эти формы донного макрорельефа сформировались за счет миграции природного газа по зонам трещиноватости в нефтегазовых покрывках и в новейших супесчано-суглинисто-глинистых отложениях.

На основе анализа сейсмоакустических материалов, данных бурения и теоретических исследований рассмотрен процесс промерзания пористой среды за счет расширения газа и эффекта Джоуля—Томпсона.

Выделено два этапа процесса промерзания пористого коллектора: нестационарный и стационарный. На первом этапе промерзание пористой среды осуществляется за счет адиабатического расширения газа, характеризуется временным интервалом около суток. На втором этапе — при стационарном распределении давления, а промерзание происходит за счет эффекта Джоуля — Томпсона.

Установлен временной интервал (около 10 час.), за который может происходить полное промерзание зон трещиноватости, при этом максимальное льдообразование наблюдается у поверхности морского дна, а минимальное — вблизи газового коллектора. Этот вывод хорошо согласуется с данными, полученными по инженерно-геологическим скважинам.

Зоны трещиноватости, фильтрация газа, эффект Джоуля—Томпсона, промерзание пористой среды

ANALYSIS OF AVAILABLE SCENARIO OF ICE COLUMN FORMATION ON THE BOTTOM OF PECHOR SEA SHELF

V.P. Melnikov, K.M. Fedorov*, A.A. Volf**, V.I. Spesivtsev***

Tyumen scientific center SB RAS, 625000, Tyumen, Taymirskay St., 74, Russia

** Tyumen State University, 625003, Tyumen, Semakova Str. 10, Russia*

*** Tyumen Institute of mechanics of Multiphase Systems, 625000 Tyumen, Taymirskay Str. 74, Russia*

**** Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia*

Different scenario of large and icy rock ice column formation founded on the bottom of Pechor sea shelf are developed. Preliminary conclusion on reasons of these formations growth was made. These reasons thermal effects of gas flow through fractured porous channels from underlying gas reservoir are developed.

Seismic, core data and theoretical research of the problem of thermal gas flow through water — saturated fractured porous zones including Joule — Thompson and adiabatic gas expansion effects are the basis of the present analysis.

Process of water — saturated rock freezing is divided on two periods. The first, non-stationary period, is characterized by adiabatic gas expansion in porous media reason of water freezing, its time range does not prevail a day, maximum of ice saturation occurs near gas reservoir and decreases to a sea bottom. During the second period pressure distribution with depth is stationary, ice saturation rise is caused by Joule—Thompson effect.

Present analysis established that ice column growth on a sea bottom due to thermal gas flow may occur in a range of 10 years. Maximum ice saturation appears on the bottom and decrease with depth, this distribution tendency coincides with core analysis of drilling data.

Fractured porous channel, thermal gas flow, Joule—Thompson effect, freezing of water — saturated porous matrix

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в юго-восточной части Баренцева моря (Печорский шельф) обнаружены участки со сложным макрорельефом дна. По имеющимся данным, представленным в монографии В.П. Мельникова, В.И. Спесивцева [1995] в этом районе зафиксированы сильно-

льdistые бугристые образования высотой до 15—17 м от поверхности дна и шириной в основании 100—300 м. В донных отложениях были обнаружены мерзлые породы. В сентябре 1995 г. ГП АМИГЭ проводила инженерно-геологические исследования в Печорском море напротив

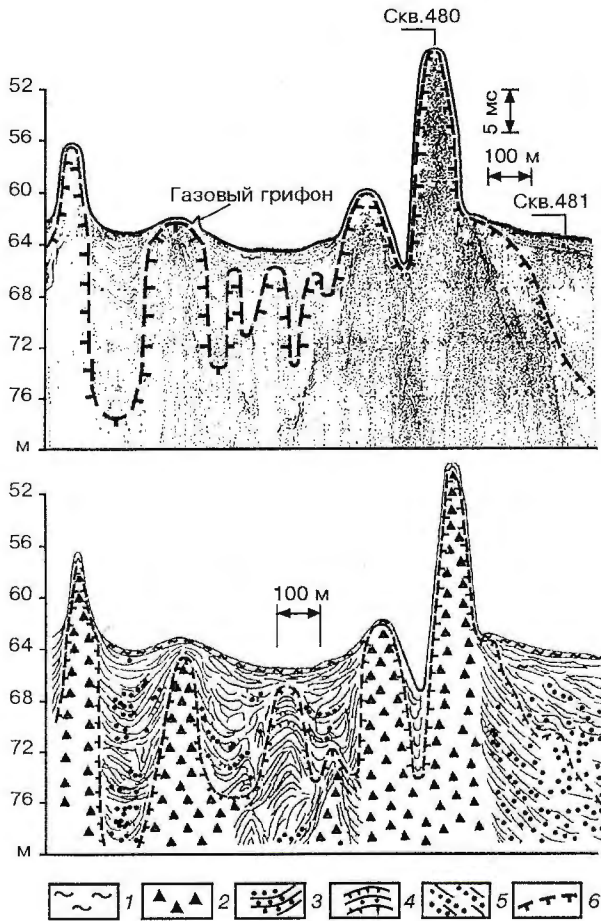


Рис. 1. Геокриологический разрез крупнобугристых образований донного рельефа в Печорском море.

1 — ил суглинистый, 2 — льдогрунтовые образования, 3 — талые суглинистые отложения, 4 — мерзлые пески, 5 — песчаные отложения, 6 — граница мерзлых пород.

пролива Карские ворота [Мельников и др., 1997]. Разрез скв. 480, пробуренной в апикальной части бугра с глубины 0,3 м до 100 м, представлен пластично-мерзлыми, сильнольдистыми глинистыми породами (рис. 1). Бурение скважины сопровождалось отбором керна и исследованием его на льдистость. Проводились также замеры температуры (рис. 2). Главными особенностями, вытекающими из анализа этих данных, является следующее: температура пород вблизи дна моря практически однородна и близка температуре замерзания морской воды; с глубиной льдистость пород уменьшается. Скважина 481 пробурена в 425 м от скв. 480 на выровненной поверхности. Ее разрез до 20 м представлен тальми песками, ниже — мерзлыми. На глубине 28 м эти отложения подстилаются сильнольдистыми глинистыми отложениями. На глубине

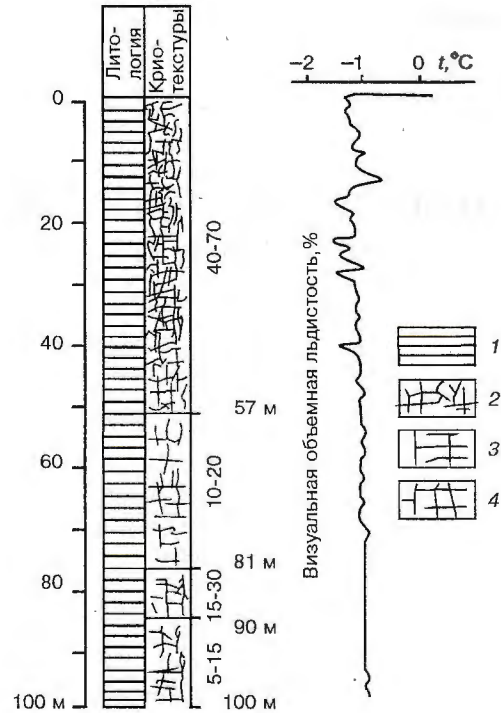


Рис. 2. Криолитологический разрез и температура пород по скв. 480.

1 — глина, 2—4 — криотекстуры: 2 — тонкошлировая мелкосетчатая, 3 — разреженная сетчатая, 4 — разреженная крупношлировая.

49,7 м был вскрыт газосодержащий горизонт с давлением больше гидростатического. Первоначальный выброс газовой смеси с песком достигал 10 м над уровнем моря. После выброса на поверхности воды появилось бурлящее пятно воды диаметром до 8 м, которое за 1—2 мин увеличилось до 80—100 м. Через несколько часов признаков выделения газа и бурлящего пятна на поверхности моря не наблюдалось. Однако при эхолотировании через 4 и 10 дней в водной толще сохранялся газовый фонтан диаметром более 10 м и высотой 40 м от поверхности дна.

Анализ приведенных данных свидетельствует о прямой связи мерзлых пород, газонасыщенных пластов и уникальных форм донного рельефа — бугров. Современное положение мерзлых толщ говорит о „молодости“ происходящих процессов. Столь сильное газонасыщение не могло возникнуть на глубине около 50 м и, естественно, газ является более древним, привнесенным с нижележащих горизонтов. В результате активизации тектонических движений, вызванных, например, антропогенными сейсмическими колебаниями фундамента в сводовых частях, к которым приурочены нефтегазовые залежи, могли возникнуть зоны трещиноватости. В этом случае, газ из подстилающего придонный слой коллекто-

ра устремлялся в вышележащие породы по этим зонам трещиноватости. По мнению Р.М. Бембеля с соавторами [1997], В.П. Мельникова, В.И. Спесивцева, В.Н. Куликова [1997] газ, высвобождаясь из структур, где он находился под высоким давлением, фильтруясь в верхние слои, мог промораживать слабосцементированные водонасыщенные породы за счет его расширения и дроссельного эффекта Джоуля—Томпсона. Мерзлые грунты, ставшие непроницаемыми, могли служить перекрывающими слоями, под которыми накапливался газ, проникающий из нижних горизонтов. В этом случае механические свойства мерзлых пород позволяли удерживать газ при более сильных давлениях.

При сейсмических колебаниях в верхнем мерзлом песчаном горизонте образуются трещины, через которые газ выдавливает на поверхность дна пластично-мерзлые глинистые породы, в результате чего на морском дне образуются выпукло-бугристые формы макрорельефа. По всей вероятности прекращение роста бугра наступает тогда, когда мощность выдавленной породы компенсирует пластовое давление.

По мнению В.П. Мельникова, В.И. Спесивцева, В. Н. Куликова [1995, 1997], эти процессы происходят в настоящее время, а основными иницирующими процессами для развития данных явлений могли служить подводные и подземные ядерные испытания на о. Новая Земля и приновоземельном шельфе. Авторы предполагают, что вспучивание поверхности морского дна может происходить над всеми газовыми месторождениями, расположенными в непосредственной близости от проводимых испытаний.

Обнаруженные явления имеют большой научный интерес и представляют практическое значение с точки зрения геологии, геоэкологии и экологии. Цель нижеизложенного исследования — математическое моделирование и анализ возможных причин и сценариев возникновения и сохранения крупнобугристых льдогрунтовых образований и мерзлых толщ при глубине моря 50—80 м.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ПРОМЕРЗАНИИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ НЕИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Пусть придонный слой, состоящий из водонасыщенных глинистых пород, находится под

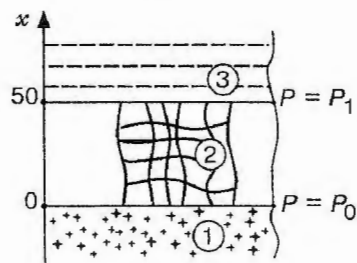


Рис. 3. Схема структуры анализируемой области в задаче о фильтрации газа сквозь зону трещиноватости.

1 — газонасыщенный коллектор, 2 — зона трещиноватости в придонных глинистых отложениях, 3 — морское дно.

гидростатическим давлением морской воды p_0 и подстилается газосодержащим пластом с давлением p_1 (рис. 3).

Ограничимся рассмотрением задачи о фильтрации газа через такую пористую среду после образования в ней зоны трещиноватости (проницаемостью k) в результате каких-либо сейсмических колебаний. При моделировании этого процесса будем основываться на следующих допущениях [Цытович, 1973; Жесткова, 1982; Ентов и др., 1986; Максимов, Цыпкин, 1988]:

- 1) выделяются следующие фазы, участвующие в процессе: пористая среда, насыщающая ее вода, образующийся при замерзании воды лед, газ, фильтрующийся по трещинам;
- 2) пористая среда, вода и лед несжимаемы и неподвижны;
- 3) капиллярные эффекты не учитываются;
- 4) пренебрегается концентрацией газа в жидкой фазе и воды в газовой фазе;
- 5) выполняется допущение о локальном термодинамическом равновесии в насыщенной пористой среде;
- 6) температура насыщенной трещиноватопористой среды придонного слоя близка к температуре замерзания морской воды.

Процесс фильтрации газа через пористую среду моделируется следующим образом. Уравнения сохранения массы фаз, участвующих в процессе, с учетом фазового перехода вода—лед имеют следующий вид*:

* Здесь и далее используются следующие обозначения: C — теплоемкость при постоянном давлении, f — фазовая (относительная) проницаемость, κ — абсолютная проницаемость пористой среды, P — давление, R — универсальная газовая постоянная, t — время, T — температура, v — среднemasовая скорость, x — координата, L — характерный размер задачи, ℓ — скрытая теплота фазового перехода вода—лед, M — молекулярный вес газа, α — объемное содержание, μ — динамическая вязкость, ρ — плотность, ρ^0 — истинная плотность, ε — коэффициент Джоуля—Томпсона, χ — коэффициент пьезопроводности среды. Нижние индексы: g, s, w, r — газовая, ледовая, водная фазы, пористая матрица; i — индекс i -й фазы, c — параметры газа в критической точке, f — параметры фазового перехода вода—лед, 0 — начальные значения, 1 — граничные условия.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g^0 \alpha_g + \text{div}(\rho_g^0 \alpha_g \mathbf{v}_g)) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w^0 \alpha_w) = J, \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s^0 \alpha_s) = -J. \quad (1)$$

Движение газа по трещинам определяется законом Дарси [Басниев и др., 1986]:

$$\alpha_g \mathbf{v}_g = -\frac{\kappa_f}{\mu_g} \text{grad } P. \quad (2)$$

Уравнение притока тепла с учетом гипотезы о локальном термодинамическом равновесии в насыщенной пористой среде записывается в следующем виде [Баширов и др., 1984; Нигматуллин, 1987]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_i \rho_i^0 C_i \alpha_i T - \alpha_g P (1 - \varepsilon C_g \rho_g^0) + \ell \rho_s^0 \alpha_s \right) +$$

$$+ \text{div} (\rho_g^0 \alpha_g C_g \mathbf{v}_g (T + \varepsilon P)) =$$

$$= \text{div} \left(\sum_i \lambda_i \alpha_i \text{grad } T \right) - P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t},$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho_g^0 C_g} \left(1 - T \rho_g^0 \frac{\partial (1/\rho_g^0)}{\partial T} \Big|_P \right), \quad i = g, s, w, r,$$

где ℓ — теплота плавления льда, ε — коэффициент Джоуля—Томпсона который, как описано в монографии Э.Б. Чекалюка [1965], является поправкой на неидеальность газа и для углеводородных газов имеет отрицательный знак, для температуры около 0 °С и давления $P \sim 1 - 5$ МПа порядок $\varepsilon \sim 10^{-5}$ К/Па. В дальнейшем эффект Джоуля—Томпсона анализируется только для газовой фазы, так как для жидкостей коэффициент ε значительно меньше и имеет другой знак.

В уравнении притока тепла учтены также эффект адиабатического расширения газа, приводящий к охлаждению системы.

Система уравнений (1)—(3) при задании фильтрационных и термодинамических свойств

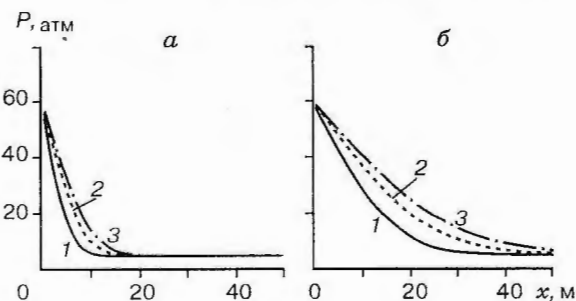


Рис. 4. Распределение давления (P , атм) по зоне трещиноватости с коэффициентами пьезопроводности.

$a - \chi = 0,03 \text{ м}^2/\text{с}$, $b - \chi = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}$ в различные моменты времени t : 1 — $t = 5$ мин, 2 — $t = 10$ мин, 3 — $t = 15$ мин.

придонного слоя и замыкающего систему уравнения состояния газа полностью описывает процесс фильтрации газа по зонам трещиноватости.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА В ЗОНАХ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ЗА СЧЕТ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ ГАЗА

Процесс фильтрации газа из придонных отложений по зонам трещиноватости можно условно разбить на два этапа. Первый, начальный этап, характеризуется нестационарным полем давления. На этом относительно коротком по времени этапе образование льда обуславливается в первую очередь адиабатическим расширением газа. На втором этапе поле давления уже установилось и образование льда связано только с эффектом Джоуля—Томпсона.

Систему уравнений (1)—(3) можно существенно упростить с учетом следующих допущений:

1) рассмотрим плоский одномерный случай фильтрации метана снизу вверх; 2) по имеющимся данным (см. рис. 2) разброс температуры в интересующей нас зоне фильтрации газа невелик от $-1,0$ до $-1,5$ °С и для первоначального анализа изменением температуры можно пренебречь, полагая ее равной температуре фазового перехода вода—лед $T = T_f = \text{const}$; 3) на первом этапе исследований пренебрежем эффектом Джоуля—Томпсона (рассмотрим, например, фильтрацию идеального газа $\varepsilon = 0$) и исследуем процесс промерзания талой породы только за счет работы газа при его расширении; 4) далее будем полагать $\rho_s^0 \approx \rho_w^0$, т. е. пренебрежем разностью между плотностями воды и льда, а уравнение состояния газа примем в виде:

$$\rho_g^0 = \rho_g^0(P, T) = \frac{P}{RT}.$$

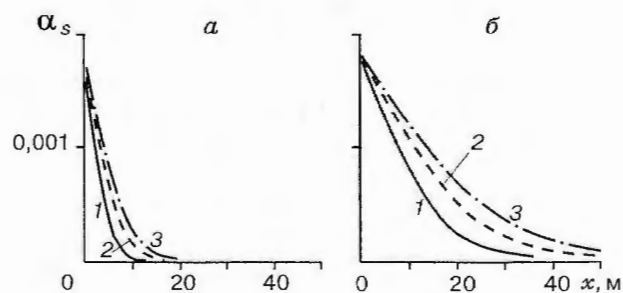


Рис. 5. Распределение объемного содержания льда α_s по зоне трещиноватости с коэффициентами пьезопроводности.

$a - \chi = 0,03 \text{ м}^2/\text{с}$, $b - \chi = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}$ в различные моменты времени t : 1 — $t = 5$ мин, 2 — $t = 10$ мин, 3 — $t = 15$ мин.

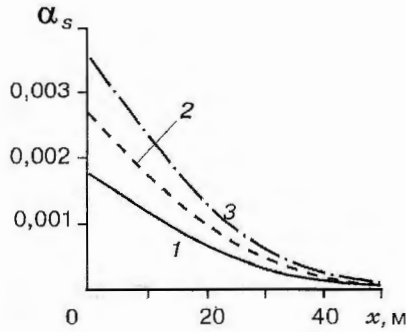


Рис. 6. Распределение объемного содержания льда α_s по зоне трещиноватости с коэффициентом пьезопроводности $\chi = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}$ в момент времени $t = 15 \text{ мин}$ при различных значениях объемного содержания газа α_g :

1 — $\alpha_g = 0,1$; 2 — $\alpha_g = 0,15$; 3 — $\alpha_g = 0,2$.

С учетом сделанных предположений система уравнений (1) — (3) примет следующий вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\ell \rho_s^0}{\alpha_g} \frac{\partial \alpha_s}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\alpha_w + \alpha_s \approx \text{const}, \Rightarrow \alpha_g \approx \text{const},$$

где χ — коэффициент пьезопроводности среды,

$$\text{для идеального равен } \chi = \frac{k f_g}{\mu_g \alpha_g} P_0.$$

Здесь задача о фильтрации газа рассматривается в линейном приближении $P = P_0 + P'$, $\alpha_s = \alpha_{s0} + \alpha'_s$, когда изменения искомым функций малы по сравнению с их абсолютными значениями $\frac{P'}{P_0} \ll 1$, $\frac{\alpha'_s}{\alpha_{s0}} \ll 1$. Охлаждение среды за счет расширения газа наблюдается только на начальном этапе установления стационарного распределения давления. При рассмотрении этого этапа процесса, задачу можно считать полубесконечной, т. е. полагать, что морское дно достаточно удалено от газового пласта. Тогда начальные и граничные условия задачи будут иметь вид:

$$\begin{aligned} t = 0, x > 0: P &= P_1, \alpha_s = 0; \\ t > 0, x = 0: P &= P_0; \\ t > 0, x = \infty: P &= P_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Сформулированная выше задача решается методом автоматической переменной ($\xi = x/\sqrt{\chi t}$), а решения имеют вид:

$$P = P_0 + (P_1 - P_0) \operatorname{erf} (x/2\sqrt{\chi t}), \quad (6)$$

$$\alpha_s = \frac{\alpha_g}{\ell \rho_s^0} (P - P_1).$$

Полученные решения (6) анализировались для метана при следующих фильтрационных и термодинамических параметрах системы:

$$\rho_s^0 = 910 (\text{кг}/\text{м}^3), P_0 = 60 \cdot 10^5 (\text{Па}),$$

$$P_1 = 5 \cdot 10^5 (\text{Па}), \alpha_g = 0,1, \quad (6')$$

$$\ell = 334 \cdot 10^3 (\text{Дж}/\text{кг}), \mu_g = 1,7 \cdot 10^5 (\text{Па} \cdot \text{с}),$$

$$k \approx 10^{-12} - 10^{-13} (\text{м}^2).$$

Таким образом, коэффициент пьезопроводности среды χ , зависящий от ее проницаемости, варьировался в пределах от 0,1 до 1 $\text{м}^2/\text{с}$. Результаты расчетов приведены на рис. 4—6.

Расчеты позволили оценить характерные времена и степень промерзания в исследуемом процессе с учетом различных значений χ . Время промерзания пористой среды на нестационарном этапе процесса фильтрации газа составляет $t \approx 1-2$ часа, а максимальная степень промерзания среды составляет $\alpha_{s \text{max}} \approx 0,004$. Таким образом, первый этап является быстротечным и не приводит к заметному промерзанию породы и образованию зон повышенной льдистости. Распределение льда в придонных отложениях характеризуется ростом льдонасыщенности с глубиной, что не подтверждается данными первого раздела (см. рис. 2).

ЛЬДООБРАЗОВАНИЕ В ПРИДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА ДЖОУЛЯ—ТОМПСОНА

Как уже было отмечено, стационарная фильтрация газа через зоны развитой трещиноватости устанавливается уже через несколько часов после образования трещин. На втором этапе поле давления в пористой среде устанавливается и процесс образования льда происходит в квазистационарном режиме только за счет оттока тепла из-за эффекта Джоуля—Томпсона. Процесс, как и на первом этапе, считается плоским одномерным, а температура среды постоянной и равной температуре фазового перехода. В этом случае общая система уравнений фильтрации с учетом фазового перехода воды в лед (1) — (3) приводится к виду:

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho_g^0 \alpha_g v_g = 0,$$

$$\alpha_g v_g = -\frac{k f_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (7)$$

$$\ell \rho_s^0 \frac{\partial \alpha_s}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \rho_g^0 \alpha_g v_g c_g \varepsilon P.$$

В системе уравнений (7) газ полагается идеальным и его термодинамическое поведение описывается уравнением Редлиха—Квонга [Уэйлес, 1989]:

$$\left(P + \frac{a \left(\frac{\rho_g^0}{M} \right)^2}{\sqrt{T} \left(1 + b \left(\frac{\rho_g^0}{M} \right) \right)} \right) \left(1 - b \left(\frac{\rho_g^0}{M} \right) \right) = \left(\frac{\rho_g^0}{M} \right) RT,$$

где $a = 0,42748 \frac{R^2 T_c^{2,5}}{P_c}$, $b = 0,08664 \frac{RT_c}{P_c}$.

Для определенности рассмотрим фильтрацию газа метана, для которого критические параметры равны: $P_c = 46,4 \cdot 10^5$ Па, $T_c = 190,7$ К. В этом случае коэффициент Джоуля—Томпсона, определяемый уравнением (3), уже отличен от нуля и его значение для характерных температур и давлений составляет $\varepsilon \approx -5 \cdot 10^{-6}$ К/Па.

Граничные условия для задачи (7) определяются уже не только давлением в газовом коллекторе, но и давлением на морском дне (стационарный этап). С учетом данных первого раздела граничные условия задавались в виде:

$$x = 0: P = P_0 = 6 \text{ МПа}, \quad (8)$$

$$x = L = 50 \text{ м}: P = P_1 = 0,5 \text{ МПа}.$$

Начальные условия соответствовали отсутствию льда в момент времени $t = 0$: $\alpha_s = 0$.

Решение задачи (7) при граничных условиях (8) имеют вид:

$$P = \sqrt{\frac{P_1^2 - P_0^2}{L} x + P_0^2}, \quad (9)$$

$$\alpha_s = \frac{k f_g C_g \varepsilon (P_1^2 - P_0^2)^2 \rho_g^0 t}{4 \mu_g L^2 \rho_s^0 \left(\frac{P_1^2 - P_0^2}{L} x + P_0^2 \right)}.$$

Для параметров трещиноватой зоны (6') распределения давления и объемного содержания льда в различные моменты времени в придонных отложениях приведены на рис. 7, 8. Распределение давления по высоте (см. рис. 7), близко к квадратичному закону. Максимальные градиенты давления наблюдаются вблизи морского дна.

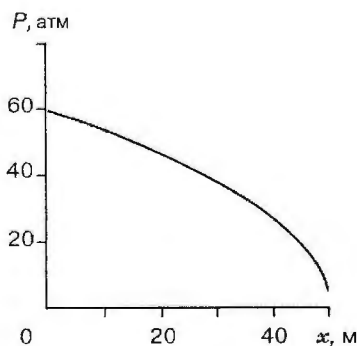


Рис. 7. Стационарное распределение поля давления (P , атм) в зоне трещиноватости.

Объемное содержание льда в придонной области в зависимости от времени и проницаемости трещиноватой зоны приведены на рис. 8.

Максимальное льдообразование наблюдается в зоне максимального градиента давлений — вблизи морского дна. Интенсивность роста льда пропорциональна проницаемости пористой среды. Предлагаемые расчеты адекватны природным процессам лишь до определенного этапа. После полного перехода воды в лед хотя бы на одной глубине температура среды начинает меняться и исходные упрощения становятся неверными. Поэтому все расчеты проводились до момента времени, когда вся грунтовая вода у дна замерзает.

Качественное совпадение результатов расчетов по распределению льдонасыщенности с фактическими данными, полученными по скв. 1 (см. рис. 2), подтверждает правильность исходных посылок и допущений. Максимальной льдонасыщенностью характеризуется область вблизи морского дна. При значительной проницаемости зоны трещиноватости (порядка 1 Дарси, 10^{-12} м²) процесс льдообразования происходит за время до 10 час.

Рассмотрим возможный сценарий образования льдонасыщенных бугров (с объемным содержанием льда свыше 50 %). Начальный нестационарный этап процесса не вносит значительного вклада в образование льда в пористой среде. Процесс образования бугров обуславливается в основном за счет эффекта Джоуля—Томпсона на втором квазистационарном этапе. Согласно проведенному анализу за относительно небольшие времена происходит образование тонкой зоны полного замерзания породы вблизи морского дна. Образование этой корки льда приводит к затуханию фильтрации и перераспределению давления в горных породах, в результате чего основной перепад давления устанавливается

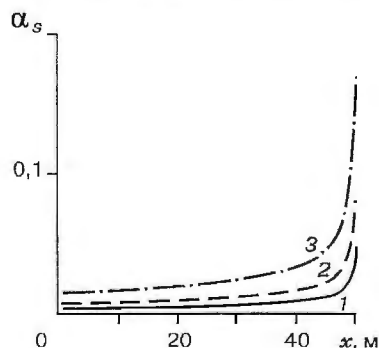


Рис. 8. Распределение объемного содержания льда α_s по зоне трещиноватости с коэффициентом проницаемости $k = 10^{-12}$ м² в различные моменты времени t .

1 — $t = 2,5$ час, 2 — $t = 5$ час, 3 — $t = 10$ час.

на образовавшейся корке льда. Незначительная толщина образовавшегося слоя не может сдерживать общего перепада давления, она разрушается, что приводит к выдавливанию льда и породы на поверхность дна. Далее происходит повторение этого цикла. За этот период образования корки льда, выход газа на поверхность дна составляет около $1,3 \cdot 10^3$ кг. Таким образом, на дне моря происходит рост льдонасыщенного бугра, в котором порода не сцементирована, а минеральная составляющая находится во взвешенном состоянии во льду, т. е. объемная льдистость в этом бугристом образовании составляет более 50 %. Стабилизация процесса роста бугра наступает тогда, когда его прочностные свойства выдерживают образующийся перепад давления. Эта картина ясно прослеживается по скв. 1 (см. рис. 2). Общий расход газа, приводящий к образованию бугра массой $1,9 \cdot 10^7$ кг (конус с площадью основания 7500 м^2 и высотой 15 м), может достигать 70 000 т или 105 млн м^3 при нормальных условиях.

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что образование льдогрунтовых бугров на морском дне возможно за небольшие времена и могли быть вызваны трещинообразованием в придонных отложениях в результате как естественных сейсмических подвижек, так и ядерных взрывов в близлежащих районах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы данные инженерно-геологических исследований придонных областей Печорского моря. Приведены данные о структуре морского дна, льдонасыщенности придонных отложений и их газопроявлений. Построена математическая модель процесса выхода газа из придонных отложений в результате образования зон трещиноватости (сейсмических подвижек или ядерных испытаний). Процесс описывается в рамках многофазной неизотермической фильтрации с учетом фазовых переходов вода—лед.

Таким образом, теоретически установлено:

1. Процесс можно условно разбить на два этапа. Первый, нестационарный этап, на котором льдообразование происходит за счет адiabатического расширения газа. Второй характеризуется стационарным распределением давления, образование льда на этом этапе происходит в квазистационарном режиме за счет эффекта Джоуля—Томпсона.

2. Первый этап происходит на временном масштабе около 1—2 час. Максимальное содержание льда на этом этапе составляет не более $\alpha_s \sim 0,004$. Максимальное льдообразование происходит вблизи газового коллектора, минимальное — у дна моря.

3. Второй этап характеризуется временным интервалом до 10 час. За это время может прои-

зойти полное промерзание придонной области. Максимальное льдообразование происходит наоборот у дна моря и убывает в сторону газового коллектора. Это распределение качественно согласуется с данными исследования кернового материала по льдистости.

4. Проведенный анализ показал, что образование бугров льдистости в придонных отложениях можно объяснить образованием зон развитой трещиноватости в результате сейсмических подвижек и ядерных испытаний в близлежащих районах. Прорыв газа из придонных газовых коллекторов по этим зонам приводит к образованию зон высокой льдистости за счет известных термодинамических эффектов за реальные времена.

5. Предложен возможный сценарий образования бугров льдистости с объемным содержанием льда выше 50 %. Общий расход газа, приводящий к образованию бугра массой $1,9 \cdot 10^7$ кг (конус с площадью основания 7500 м^2 и высотой 15 м), может достигать 70 000 т или 105 млн м^3 при нормальных условиях.

Работа подготовлена при поддержке РФФИ, проект № 97-05-64255.

Литература

- Басниев К. С., Власов А. М., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидравлика, М., Недра, 1986, 303 с.
- Баширов В. В., Федоров К. М., Овсюков А. В. Неизотермическое движение жидкости и газа в пористых средах и задачи увеличения нефтеотдачи пластов тепловыми методами. Уфа, Изд-во БашГУ им. 40-летия Октября, 1984, 84 с.
- Бембель Р. М., Бембель С. Р., Кашин А. Е., Ласковец Е. Б. Связь очагов активности нефтегазоаккумуляции и глубинных криогенных источников // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск, Наука, 1997, 193—198 с.
- Ентов В. М., Максимов А. М., Цыпкин Г. Г. Об образовании двухфазной зоны при кристаллизации смеси в пористой среде // Докл. АН СССР, 1986, сер. гидромеханика, т. 288, № 3, с. 621—624.
- Жесткова Т. Н. Формирование криогенного строения грунтов. М., Наука, 1982, 216 с.
- Максимов А. М., Цыпкин Г. Г. Автомодельное решение задачи о протаивании мерзлого грунта // Изв. АН СССР, 1988, МЖГ, № 6, с. 136—142.
- Мельников В. П., Спесивцев В. И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.
- Мельников В. П., Спесивцев В. И., Куликов В. Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразования льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск, Наука, 1997, с. 259—269.
- Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М., Наука, 1987, 464 с.
- Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии. Т. 1, (Пер. с англ.). М., Мир, 1989, 304 с.
- Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М., Высшая школа, 1973, 448 с.
- Чекалюк Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта. М., Недра, 1965, 238 с.

Поступила в редакцию
16 марта 1998 г.