

ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ

УДК 622.248.3

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД,  
СОДЕРЖАЩИХ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ ГАЗОГИДРАТЫ**

**З.А. Васильева, С.И. Ефимов, В.С. Якушев**

*Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина,  
119991, Москва, Ленинский просп., 65, Россия; zoyavac@gmail.com*

Для оценки интенсивности оттаивания и сопутствующего газовыделения при добыче нефти и газа на северных месторождениях предложена модель теплового взаимодействия добывающей скважины и толщи многолетнемерзлых пород, содержащей реликтовые метастабильные гидраты. Получены автомодельное решение задачи и аналитическая зависимость для определения границы фазового перехода, выведена формула распространения радиуса теплового воздействия скважины. В рамках автомодельного решения проанализировано влияние гидратонасыщенности породы и теплопроводности цементного камня на радиус оттаивания грунта скважины.

*Метастабильные газогидраты, газовыделения, граница фазового перехода, радиус теплового влияния скважины*

**PREDICTION OF THERMAL INTERACTION BETWEEN OIL/GAS WELLS  
AND PERMAFROST ROCKS CONTAINING METASTABLE GAS HYDRATES**

**Z.A. Vasil'eva, S.I. Efimov, V.S. Yakushev**

*Gubkin Russian State University of Oil and Gas,  
119991, Moscow, pr. Lenina, 65, Russia; zoyavac@gmail.com*

A model of thermal interaction between the production well and permafrost rocks containing the relic, metastable hydrates has been developed to evaluate the intensity of permafrost thawing and associated gas emission at oil and gas north fields. The self-similar solution and the analytical expression for estimation of the boundary of phase transition have been obtained. The formula of spreading of radius of the well's thermal influence has been derived. The dependence of the soil thawing radius on the hydrate saturation of the rock and the cement stone heat conductivity has been deduced on the basis of self-similar solution.

*Metastable gas hydrates, gas emission, boundary of phase transition, radius of the well's thermal influence*

**ВВЕДЕНИЕ**

Интенсивное недропользование при добыче нефти и газа на северных месторождениях сопровождается частыми и внезапными выделениями горючих газов вокруг устьев добывающих скважин. Наиболее остро эти проблемы проявляются при освоении месторождений на п-ове Ямал и прилегающих шельфовых областях Карского моря. Все чаще эти газовыделения связываются с наличием гидратосодержащих прослоев на глубинах от первых метров до 200–250 м в толще многолетнемерзлых пород, залегающих над месторождениями. Газовые гидраты там находятся в законсервированном метастабильном состоянии и

называются реликтовыми. По составу газ в этих гидратах представлен в основном метаном [Якушев, 2009]. Гидраты находятся в законсервированном состоянии только до тех пор, пока вокруг них существует ледяная оболочка, поэтому они крайне чувствительны к природным и техногенным воздействиям. Тепловое влияние наиболее значимо и усугубляет все другие виды воздействия. Оттаивание льда вызывает разложение газогидратов и соответствующее выделение газа.

На протяжении жизненного цикла скважины могут возникать аварийные ситуации, связанные с фазовыми переходами “лед–вода–гидрат–газ”.

Анализ взаимосвязи фазового состояния пород и осложнений при бурении дан в работе [Васильева и др., 2011].

Во время эксплуатации скважины при некачественном цементировании (причиной которого могут быть газовые гидраты) и недостаточной теплоизоляции тепловой импульс от добываемого газа или нефти поступает в породу, окружающую скважину. Вокруг нее образуется ореол оттаивания по всей мощности многолетнемерзлых пород, например, для п-ова Ямал в интервалах 200–300 м от поверхности.

Газогидрат, так же как и лед, является цементирующим веществом между минеральными частицами, поэтому растепление ведет к потере устойчивости пород, перераспределению напряжений и нагрузок по обсадной колонне. Одно из серьезных последствий разложения метастабильного газового гидрата и таяния льда – интенсификация процессов кавернообразования [Васильева и др., 2011].

Для оценки интенсивности оттаивания и сопутствующего газовыделения представляется целесообразным рассмотреть модель теплового взаимодействия добывающей скважины и толщи многолетнемерзлых пород, содержащей реликтовые метастабильные гидраты.

Существующие методы тепловых расчетов позволяют найти тепловое поле горных пород в предположении постоянства температуры нефти или газа в скважине и ее постоянства на стенке скважины (стационарная задача) [СТО Газпром..., 2008] либо постоянства температуры только флюида в скважине (нестационарная задача) [Коротаев и др., 1976; Истомина, 1981]. В первом случае принимаются граничные условия I рода, во втором и третьем – граничные условия III рода.

Однако скважина и породы являются единой теплообменной системой, поэтому в данной работе предполагаются переменными как температура флюида в скважине, так и температура горных пород, а постоянным считается тепловой поток на стенке скважины, т. е. принимаются граничные условия II рода.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается процесс оттаивания грунта вокруг газовой скважины, имеющей эксплуатационную колонну с внутренним радиусом  $r_0$  и цементное кольцо с внешним радиусом  $r_c$ . Окружающие скважину породы имеют начальные насыщенности порового пространства льдом ( $s_{i0}$ ), гидратом ( $s_{h0}$ ) и водой ( $s_{w0}$ ). Во время работы скважины по ней движется газ с температурой  $T_g = 303$  К (+30 °С), вследствие чего вокруг скважины образуется растущая во времени талая зона ( $r_c \leq r < R_*(t)$ ), сопряженная с мерзлой зоной ( $R_*(t) \leq r < \infty$ ). Здесь  $R_*(t)$  – подвижная граница

фазового перехода, м;  $t$  – время, с. Тепловым потоком в вертикальном направлении пренебрегаем, так как рассматриваемый интервал скважины значительно больше радиуса оттаивания, задача является линейной осесимметричной.

В талой области сосуществования газа и воды имеет место закон сохранения энергии

$$\text{при } r_c \leq r < R_*(t): \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad a_1 = \frac{\lambda_1}{(cp)_1}, \quad (1)$$

где  $a_1$  – температуропроводность;  $(cp)_1 = \rho_s c_s (1-m) + \rho_w c_w s^0 m + \rho_g c_g (1-s^0) m$  – произведение теплоемкости на плотность талой зоны;  $\lambda_1 = \lambda_s (1-m) + \lambda_w s^0 m + \lambda_g (1-s^0) m$  – теплопроводность талой зоны, Вт/(м·К);  $m$  – пористость;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T_1$  – температура талой зоны, К.

Здесь  $s^0$  – невозмущенная водонасыщенность в области газ–вода, которая зависит от начальных значений гидратонасыщенности, льдонасыщенности и водонасыщенности:

$$s^0 = s_{i0} \rho_i / \rho_w + s_{h0} \rho_{0w} / \rho_w + s_{w0},$$

где  $\rho_{0w}$  – эффективная плотность воды в гидрате (масса воды в единице объема гидрата), кг/м<sup>3</sup>. Индексы  $w, h, g, i, s$  соответствуют воде, гидрату, газу, льду и скелету пористой среды.

В мерзлой области сосуществования воды, гидрата и льда выполняется закон сохранения энергии

$$\text{при } r_c \leq r < R_*(t): \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad a_2 = \frac{\lambda_2}{(cp)_2}, \quad (2)$$

где  $(cp)_2 = \rho_s c_s (1-m) + \rho_i c_i s_i m + \rho_h c_h s_h m + \rho_w c_w \times (1-s_h - s_i) m$  – произведение теплоемкости на плотность мерзлой зоны;  $\lambda_2 = \lambda_s (1-m) + \lambda_i s_i m + \lambda_h s_h m + \lambda_w (1-s_h - s_i) m$  – теплопроводность мерзлой зоны;  $T_2$  – температура мерзлой зоны.

Начальные и граничные условия принимаются в виде

$$\text{при } t = 0, r > r_c: T = T_0, s_i = s_{i0}, s_h = s_{h0}; \quad (3)$$

$$\text{при } r = \infty, t > 0: T_2(r) = T_0; \quad (4)$$

на подвижной границе фазового перехода

$$\text{при } r = R_*(t):$$

$$\left( \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)^+ - \left( \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \right)^- = m \left( \rho_h q_h s_h^+ + \rho_i q_i s_i^+ \right) \frac{dR_*}{dt}; \quad (5)$$

$$T_1(r)^+ = T_2(r)^- = T_*. \quad (6)$$

Здесь  $T_*$  – температура оттаивания грунта, К;  $T_0$  – температура мерзлого грунта в естественных

условиях,  $K$ ;  $q_h, q_i$  – скрытая теплота фазового перехода гидрата и льда соответственно, Дж/кг.

Граничное условие, являющееся условием сопряжения температурных полей газа в скважине и породы при движении газа, принимается в виде

$$\text{при } r = r_c, t > 0: k_D(T_2 - T_c) = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{W}{2\pi h r_c}, \quad (7)$$

где  $T_c$  – средняя по длине рассматриваемого интервала скважины температура на поверхности цементного кольца;  $W$  – тепловой поток через внешнюю поверхность цементного кольца, Вт·м<sup>2</sup>/с; коэффициент теплоотдачи имеет вид

$$k_D = \left[ \frac{1}{\alpha} + \frac{r_c}{\lambda_c} \ln \frac{r_c}{r_0} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Коэффициент конвективного теплообмена между газом и внутренней поверхностью трубы  $\alpha$  зависит от скорости движения газа и определяется по эмпирической формуле [СТО Газпром..., 2008]:

$$\alpha = 5.42 \cdot 10^{-3} V^{0.8} / (2r_0)^{0.2}, \quad (9)$$

где  $V$  – скорость движения газа, м/ч.

### АВТОМОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Если начальные и граничные функции температуры, гидратонасыщенности и льдистости ( $T_0, W, s_{h0}, s_{i0}$ ) являются постоянными величинами, задача (1)–(9) допускает автомодельное решение:

$$T = T(\xi), R_* = \delta t^{1/2}, \xi = r t^{-1/2}.$$

Автомодельное решение задачи для талой зоны имеет вид

$$\text{при } \xi < \delta: T_1 = T_* + \frac{W}{4\pi h \lambda_1} \left[ Ei\left(-\frac{\delta^2}{4a_1}\right) - Ei\left(-\frac{\xi^2}{4a_1}\right) \right], \quad (10)$$

где  $Ei(x) = -\int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$  – интегральная показательная функция.

Автомодельное решение задачи для мерзлой зоны имеет вид

$$\text{при } \delta < \xi < \infty: T_2 = T_0 - \frac{T_0 - T_*}{Ei\left(-\delta^2/(4a_2)\right)} Ei\left(-\frac{\xi^2}{4a_2}\right). \quad (11)$$

Условие (5) на границе фазового перехода в автомодельных переменных принимает вид

при  $\xi = \delta$ :

$$\left( \lambda_2 \frac{dT}{d\xi} \right)^+ - \left( \lambda_1 \frac{dT}{d\xi} \right)^- = m \left( \rho_h q_h s_h^+ + \rho_i q_i s_i^+ \right) \frac{\delta}{2}. \quad (12)$$

Подставив решения (10), (11) в условия на подвижной границе (12), получим интегральное уравнение для определения параметра  $\delta$ :

$$4\lambda_2 \frac{T_* - T_0}{Ei\left(-\delta^2/(4a_2)\right)} \exp\left(-\frac{\delta^2}{4a_2}\right) + \left( \frac{W}{\pi} \exp\left(-\frac{\delta^2}{4a_1}\right) \right) = m \left( \rho_h q_h s_h^+ + \rho_i q_i s_i^+ \right) \delta^2. \quad (13)$$

### Определение радиуса теплового влияния добывающей скважины

Для создания технологического проекта эксплуатации месторождения необходимо прогнозировать как динамику области оттаивания многолетнемерзлых пород вокруг скважин, так и области теплового влияния скважин.

Если принять радиус теплового влияния скважины как значение текущего радиуса  $R_T(t)$ , на котором отклонение температуры от начальной равно некоторой заданной малой величине  $\varepsilon$ , то из решения задачи в мерзлой зоне (11) получим интегральное уравнение для его определения

$$T_2 - T_0 = \varepsilon = \frac{T_* - T_0}{Ei\left(-\delta^2/(4a_2)\right)} Ei\left(-\frac{R_T^2}{4a_2 t}\right). \quad (14)$$

Как следует из формулы (14), радиус теплового влияния зависит от разности начальной температуры и температуры фазового перехода, от скорости движения фронта фазового перехода и температуропроводности мерзлой области. В случае, если начальная температура равна температуре фазового перехода, тепловое влияние скважины не распространяется за фронт фазового перехода, что соответствует однофазной задаче Стефана.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов, проведенных в программном комплексе MATHCAD, при следующих значениях параметров, характерных для мерзлых пород на севере Западной Сибири и применяемых в строительстве скважин материалов:  $T_* = 271$  К,  $T_0 = 268$  К,  $r_0 = 0.084$  м,  $r_c = 0.45$  м,  $m = 0.45$ ,  $s_{i0} = 0.76$ ,  $s_{h0} = 0.15$ ,  $\rho_s = 2000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_h = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_i = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{0g} = 116$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{0w} = 784$  кг/м<sup>3</sup>,

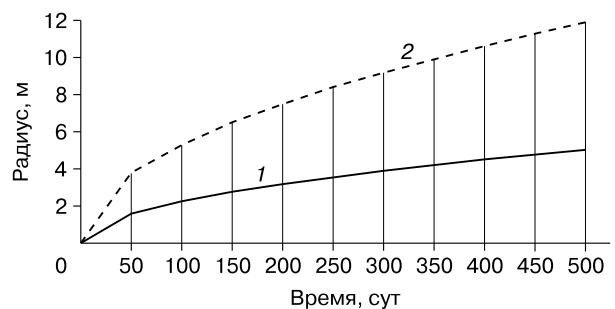
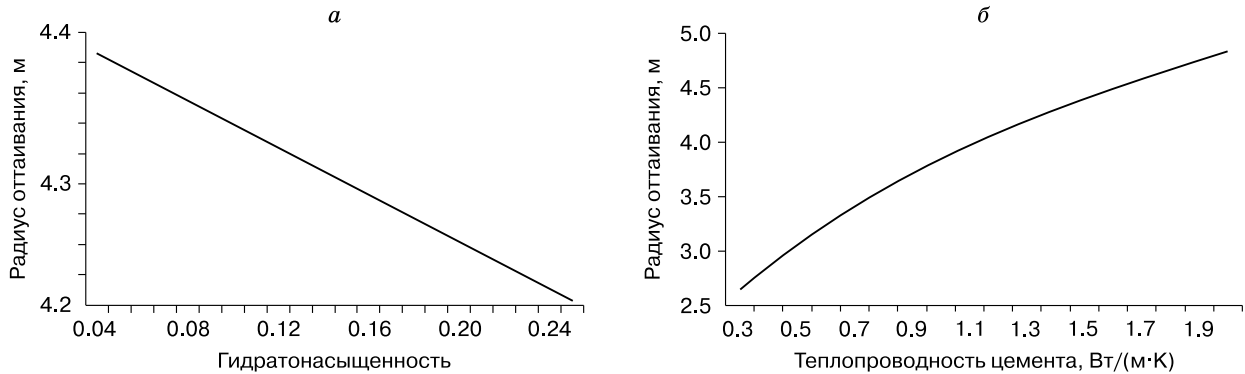


Рис. 1. Зависимости радиусов оттаивания грунта (1) и теплового влияния скважины (2) от времени.



**Рис. 2.** Зависимость радиуса оттаивания грунта за год от гидратонасыщенности породы (а) и теплопроводности цемента (б).

$c_s = 966$  Дж/(кг·К),  $c_w = 4200$  Дж/(кг·К),  $c_h = 2100$  Дж/(кг·К),  $c_i = 2050$  Дж/(кг·К),  $c_g = 2200$  Дж/(кг·К),  $\lambda_s = 2$  Вт/(м·К),  $\lambda_w = 0.58$  Вт/(м·К),  $\lambda_g = 0.034$  Вт/(м·К),  $\lambda_h = 0.5$  Вт/(м·К),  $\lambda_i = 2.21$  Вт/(м·К),  $\lambda_c = 1.4$  Вт/(м·К),  $q_h = 43.7 \cdot 10^4$  Дж/кг,  $q_i = 33 \cdot 10^4$  Дж/кг.

На рис. 1 приведена динамика роста радиуса оттаивания грунта вокруг газовой скважины с температурой потока  $+30^\circ\text{C}$ , толщиной цементного кольца 0.27 м и теплопроводностью цементного камня 1.4 Вт/(м·К). За год радиус оттаивания достиг 4.3 м, радиус теплового влияния скважины – 10.2 м. При этом за счет разложения гидрата по глубине  $H = 100$  м за первый год эксплуатации скважины образуется около 63 600 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях, объем газа рассчитывался по формуле

$$V_g = \pi R_*^2 H m p_{0g} s_{h0} \cdot 22.4 / 16.$$

За весь период разработки (например, 30 лет) радиус оттаивания достигает 23.5 м. Это может вызвать нарушение устойчивости скважин.

На рис. 2, а приведена зависимость радиуса оттаивания грунта за год от гидратонасыщенности породы, при этом сумма льдистости и гидратонасыщенности остается постоянной. На рис. 2, б представлена зависимость радиуса оттаивания грунта за год от теплопроводности цемента. Снижение теплопроводности цемента до 0.4 Вт/(м·К) приводит к уменьшению радиуса оттаивания до 3 м за год, например, массовые доли микросфер до 25 % позволяют снизить теплопроводность тампонажного камня до данной величины [Коростелев..., 2011].

### ВЫВОДЫ

Впервые предложена математическая модель теплового взаимодействия добывающей скважины и толщи многолетнемерзлых пород, содержа-

щей реликтовые метастабильные гидраты. Получены динамика распространения температуры в талой и мерзлой зонах и аналитическая зависимость для определения границы фазового перехода.

Выведена формула распространения радиуса теплового влияния скважины. Показано, что радиус теплового влияния зависит от разности начальной температуры и температуры фазового перехода, от скорости движения фронта фазового перехода и температуропроводности мерзлой области.

Из данных расчета следует, что даже небольшая величина гидратонасыщенности мерзлых пород может приводить к существенным изменениям теплофизических характеристик, и при оттаивании эти гидраты могут выделять значительные объемы газа.

В рамках автотельного решения проанализировано влияние гидратонасыщенности породы и теплопроводности цементного камня на радиус оттаивания грунта скважины.

Применение теплоизолирующих материалов не только уменьшает радиус оттаивания, но и снижает риск сильных газовыделений при строительстве и работе скважин. Подготовка тампонажных растворов с пониженным тепловыделением при застывании и низкой теплопроводностью является одним из очевидных направлений совершенствования арктических технологий добычи нефти и газа и обеспечения рационального недропользования.

Выполненные расчеты подтверждают необходимость разработки технологических решений по управлению мерзлотной обстановкой в течение всего периода эксплуатации.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (№ 13.290.2014/К).

### Литература

- Васильева З.А., Джафаров Д.С., Аметова Т.А.** Косвенные техногенные признаки индикации газогидратов в криолитозоне // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 61–67.
- Истомин В.А., Дегтярев Б.В., Колушев Н.Р.** Руководство по расчету темпов протаивания и обратного промерзания пород при выборе конструкции скважин в криолитозоне / В.А. Истомин, Б.В. Дегтярев, Н.Р. Колушев. М., ВНИИГАЗ, 1981, 67 с.
- Коростелев А.С.** Опыт разработки и применения арктических тампонажных систем для цементирования обсадных колонн в интервалах размещения многолетнемерзлых пород на газовых и газоконденсатных месторождениях / Конференция SPE по разработке месторождений в осложненных условиях и Арктике (18–20 окт. 2011 г., Москва, Россия). 2011. SPE 149928.
- Коротаев Ю.П., Кривошейин Б.Л., Новаковский В.Н.** Термодинамический расчет газовых скважин // Тр. МИНХиГП. М., Недра, 1976, № 116, с. 106–109.
- СТО Газпром 2-3.1-233-2008.** Методика проведения геокриологических исследований при разведке и разработке месторождений. М., ИРЦ Газпром, 2008, 116 с.
- Якушев В.С.** Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне / В.С. Якушев. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.

*Поступила в редакцию  
26 марта 2015 г.*