

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД И ВНУТРИМЕРЗЛОТНЫХ ГАЗОГИДРАТОВ

З.А. Васильева, В.С. Якушев

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

На основе модели теплового взаимодействия добывающей скважины и толщи многолетнемерзлых пород, содержащей реликтовые метастабильные гидраты, даны оценки интенсивности оттаивания и сопутствующего газовыделения в зависимости от параметров теплоизоляции скважин. Впервые решена обратная задача: для заданного радиуса оттаивания через заданный период эксплуатации скважины определяются параметры ее теплоизоляции. Получена зависимость необходимой теплопроводности изоляции фонтанной трубы от теплопроводности цемента при заданном радиусе оттаивания.

Многолетнемерзлые породы, метастабильные газогидраты, газовыделения, граница фазового перехода, радиус теплового влияния скважины

INFLUENCE OF GAS WELL THERMAL INSULATION PARAMETERS ON THAWING INTENSITY OF PERMAFROST AND INTRAPERMAFROST GAS HYDRATES

Z.A. Vasil'eva, V.S. Yakushev

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

Based on the model of thermal interaction between a production well and the surrounding permafrost rock massif containing relic metastable hydrates, we estimated the intensity of permafrost thawing and associated intrapermafrost gas liberation, considering the parameters of thermal insulation of wells. For the first time, the inverse problem is solved where thermal insulation parameters of a well are defined at a given thaw radius through a preset period of its operation. The dependence of necessary thermal conductivity of the production pipe heat insulation on the thermal conductivity of cement at a given thaw radius has been obtained.

Permafrost, metastable gas hydrates, gas emission, boundary of phase transition, radius of the well's thermal influence

ВВЕДЕНИЕ

Освоение газовых месторождений на севере Западной Сибири сопровождается рядом характерных осложнений, связанных с тепловым воздействием добывающих скважин на окружающие многолетнемерзлые породы (ММП). Там, где ММП представлены осадочными дисперсными льдонасыщенными грунтами, вокруг устьев работающих скважин часто наблюдаются выделения горючих газов. Эти газовыделения связаны с оттаиванием внутримерзлотных газогидратов и проникновением высвобождающегося газа в околоскважинное пространство [Якушев, 2009]. Первоначальная оценка темпов оттаивания вокруг работающей нетеплоизолированной скважины в условиях ММП п-ова Ямал показала, что за первый год радиус оттаивания может достигать 6 м, а объем выделяющегося при этом из ММП газа – до 36 тыс. м³ [Васильева и др., 2016]. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть возможности сокращения темпов оттаивания ММП

при применении пассивной теплоизоляции стволов скважины.

При кустовом способе расположения скважин (в случае бурения с одного основания) в результате длительной эксплуатации ореолы оттаивания вокруг отдельных скважин могут сомкнуться, если расстояние между ними будет менее двух радиусов оттаивания.

Для уменьшения теплового воздействия эксплуатационной скважины на вмещающие ММП применяют различные способы увеличения термического сопротивления на контакте “скважина–ММП”.

Выбор конструкций скважин и расстояний между ними осуществляется на основе моделирования процессов растепления ММП вокруг теплоизолированных и нетеплоизолированных скважин различной конструкции. Из основных теплоизоляционных решений для скважин можно выделить следующие: теплоизолированные лиф-

товые трубы (ТЛТ), термокейсы (теплоизолированное направление), теплоизоляционные краски, цементы с пониженной теплопроводностью (например, с полыми керамическими микросферами).

В связи с этим представляет интерес оценка минимальных размеров зоны расположения куста скважин, расстояния между ними, при котором возможно их взаимное тепловое влияние. В [Горелик и др., 2008] разработан метод численного решения трехмерной задачи Стефана, описывающей динамику протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух добывающих скважин. Показано, что нестационарное температурное поле и форма области протаивания вблизи скважин в течение длительного времени с момента слияния таликов существенно отличаются от стационарных. Существующие аналитические методы тепловых расчетов позволяют найти тепловое поле горных пород в предположении постоянства температуры нефти или газа в скважине и постоянства температуры на стенке скважины (стационарная задача) [СТО Газпром..., 2008; Хрусталева, Гунар, 2015], либо постоянства температуры только флюида в скважине (нестационарная задача) [Коротав и др., 1976; Истомин и др., 1981].

В настоящей работе скважина и породы рассматриваются как единая теплообменная система, предполагаются переменными и температура флюида в скважине, и температура горных пород, а постоянным предполагается тепловой поток на стенке скважины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для оценки интенсивности оттаивания и сопутствующего газовыделения рассматривается модель теплового взаимодействия добывающей скважины (имеющей эксплуатационную колонну с внутренним радиусом r_0 и цементное кольцо с внешним радиусом r_c) и толщи многолетнемерзлых пород, содержащей реликтовые, метастабильные гидраты. Такой вариант без теплоизоляции был рассчитан ранее в работе [Васильева и др., 2016].

Окружающие скважину породы имеют пористость m и начальные насыщенности порового пространства льдом s_{i0} , гидратом s_{h0} и водой s_{w0} . Во время работы скважины по ней движется газ с температурой $T_g = 303 \text{ K}$ ($+30 \text{ }^\circ\text{C}$), вследствие чего вокруг скважины образуется растущая во времени талая зона ($r_c \leq r < R_*(t)$), сопряженная с мерзлой зоной ($R_*(t) < r < \infty$). Здесь $R_*(t)$ – подвижная граница фазового перехода; t – время. Тепловым потоком в вертикальном направлении пренебрегаем.

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

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

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

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

где a_j – температуропроводность; $(cp)_j$ – объемная теплоемкость; λ_j – теплопроводность; T_j – температура j -й зоны ($j = 1, 2$); ρ – плотность; c – удельная теплоемкость. Индекс 1 относится к талой зоне, индекс 2 – к мерзлой зоне.

Начальные и граничные условия принимаются в виде

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

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

на подвижной границе фазового перехода – в виде 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; T_0 – температура мерзлого грунта в естественных условиях; q_h, q_i – скрытая теплота фазового перехода гидрата и льда. Индексы w, h, g, i, s соответствуют воде, гидрату, газу, льду и скелету пористой среды. Индексом “+” обозначена величина справа от границы (предел справа), индексом “–” – слева от границы (предел слева).

Граничное условие, которое является условием сопряжения температурных полей газа в скважине и породы при движении газа, задается в виде

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

где T_c – средняя по длине рассматриваемого интервала скважины температура на поверхности цементного кольца; W – тепловой поток через внешнюю поверхность цементного кольца.

Коэффициент теплоотдачи для теплоизолированных скважин зависит от конструкции скважины, применения средств активной и пассивной теплоизоляции. К ним относятся: устройство воздушного зазора между эксплуатационной и промежуточной колоннами, устройство кольцевой изоляции вокруг лифтовой трубы.

Коэффициент теплоотдачи для теплоизолированных скважин, согласно [Хрусталева, Гунар, 2015], имеет вид

$$k_D = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{r_{ins}}{\lambda_{ins}} \ln \left(\frac{r_{ins}}{r_0} \right) + \frac{r_p}{\lambda_{ef}} \ln \left(\frac{r_p}{r_{ins}} \right) + \frac{r_c}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_p} \right) \right)^{-1}.$$

В работе [Исаченко, 1969] приводится следующая формула для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$k_D = \left[r_c \left(\frac{1}{\lambda_{ins}} \ln \left(\frac{r_{ins}}{r_0} \right) + \frac{1}{\lambda_{ef}} \ln \left(\frac{r_p}{r_{ins}} \right) + \frac{1}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_p} \right) \right) \right]^{-1},$$

где r_{ins} , r_p – радиусы кольцевой теплоизоляции и эксплуатационной колонны; λ_{ins} , λ_{ef} , λ_c – коэффициенты теплопроводности: теплоизоляции (λ_{ins}), эффективной теплопроводности воздуха при замене конвективного теплообмена на кондуктивный (λ_{ef}), цементного камня (λ_c).

Ввиду отсутствия в литературе единого представления о коэффициенте теплоотдачи возникает необходимость в выводе *коэффициента теплоотдачи для теплоизолированных скважин*.

Уравнения стационарной теплопроводности для теплоизоляции ($r_0 < r < r_{ins}$), эффективной теплопроводности воздуха ($r_{ins} < r < r_p$) (при замене конвективного теплообмена на кондуктивный) и цементного кольца ($r_p < r < r_c$) имеют вид

$$\text{при } r_0 < r < r_{ins} \quad \frac{d^2 T_{ins}}{dt^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{ins}}{dr} = 0; \quad (8)$$

$$\text{при } r_{ins} < r < r_p \quad \frac{d^2 T_{ef}}{dt^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{ef}}{dr} = 0; \quad (9)$$

$$\text{при } r_p < r < r_c \quad \frac{d^2 T_c}{dt^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_c}{dr} = 0 \quad (10)$$

со следующими граничными условиями: условие теплоотдачи на стенке лифтовой трубы

$$\text{при } r=r_0 \quad \frac{dT_{ins}}{dr} = -\frac{\alpha}{\lambda_{ins}} (T_g - T_{ins}(r_0)), \quad (11)$$

условия непрерывности тепловых потоков и температуры:

$$\text{при } r=r_{ins} \quad \lambda_{ins} \frac{\partial T_{ins}}{\partial r} = \lambda_{ef} \frac{\partial T_{ef}}{\partial r}, \quad T_{ins} = T_{ef}; \quad (12)$$

$$\text{при } r=r_p \quad \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} = \lambda_{ef} \frac{\partial T_{ef}}{\partial r}, \quad T_p = T_{ef}; \quad (13)$$

$$\text{при } r=r_c \quad \lambda_c \frac{\partial T_p}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}, \quad T_p = T_1. \quad (14)$$

В результате решения задачи (8)–(14) получим условие на стенке цементного камня

$$(T_1 - T_g) \left[\frac{r_c}{r_0 \alpha} + \frac{r_c}{\lambda_{ins}} \ln \left(\frac{r_{ins}}{r_0} \right) + \frac{r_c}{\lambda_{ef}} \ln \left(\frac{r_p}{r_{ins}} \right) + \frac{r_c}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_p} \right) \right]^{-1} = \lambda_1 \frac{dT_1}{dr}.$$

Отсюда выражение для коэффициента теплоотдачи для теплоизолированной скважины имеет вид

$$k_{D1} = \left[\frac{r_c}{r_0 \alpha} + \frac{r_c}{\lambda_{ins}} \ln \left(\frac{r_{ins}}{r_0} \right) + \frac{r_c}{\lambda_{ef}} \ln \left(\frac{r_p}{r_{ins}} \right) + \frac{r_c}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_p} \right) \right]^{-1}, \quad (15)$$

для нетеплоизолированной скважины (только цемент)

$$k_{D2} = \left[\frac{r_c}{r_0 \alpha} + \frac{r_c}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_0} \right) \right]^{-1}, \quad (16)$$

для скважины с изоляцией лифтовой трубы

$$k_D = \left[\frac{r_c}{r_0 \alpha} + \frac{r_c}{\lambda_{ins}} \ln \left(\frac{r_{ins}}{r_0} \right) + \frac{r_c}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_{ins}} \right) \right]^{-1}. \quad (17)$$

Если начальные и граничные функции температуры, гидратонасыщенности и льдистости (T_0 , W , s_{h0} , s_{i0}) являются постоянными величинами, задача (1)–(7) при $r_c \rightarrow 0$ является *автомодельной* и имеет решение вида $T = T(\xi)$, $R_* = \delta t^{1/2}$, $\xi = r t^{-1/2}$. В теории фильтрации [Баренблатт и др., 1972; Басниев и др., 2005] основная задача – *нестационарный приток газа к скважине* – решается в автомодельной постановке (скважина рассматривается как точечный сток или источник). Теория гидродинамических исследований скважин строится на основе этого автомодельного решения при $r = r_c$, так как замеры давления и температуры возможно проводить только на забое скважины [Эрлагер, 2007; Инструкция..., 2010]. Геофизические исследования скважин также основываются на автомодельном решении *задачи точечного, мгновенного источника* [Баренблатт, 1978]. Эти исследования подтверждаются многолетней практикой. Поэтому и в данном случае, хотя фактический радиус скважины – конечная величина, рассмотрим автомодельное решение, которое является асимптотическим решением исходной задачи.

Постановка задачи в автомодельных переменных принимает следующий вид:

$$\text{таялая зона} \quad \frac{d^2 T_1}{d\xi^2} + \frac{dT_1}{d\xi} \left(\frac{1}{\xi} + \frac{\xi}{2a_1} \right) = 0, \quad (18)$$

$$\text{мерзлая зона} \quad \frac{d^2 T_2}{d\xi^2} + \frac{dT_2}{d\xi} \left(\frac{1}{\xi} + \frac{\xi}{2a_2} \right) = 0; \quad (19)$$

граничные условия имеют вид

$$\text{при } \xi \rightarrow 0 \quad \left(\xi \frac{dT}{d\xi} \right)_{\xi=0} = -\frac{W}{2\pi h \lambda_1}, \quad (20)$$

$$\text{при } \xi \rightarrow \infty \quad T = T_0, \quad (21)$$

$$\text{при } \xi = \delta \quad T = T_*,$$

$$\lambda_2 \left(\frac{dT_2}{d\xi} \right)^+ - \lambda_1 \left(\frac{dT_1}{d\xi} \right)^- = m(\rho_h q_h v^+ + \rho_i q_i s_i^+) \delta / 2. \quad (22)$$

Решение автомодельной задачи (18)–(22) приведено в работе [Васильева и др., 2016].

Условие на границе фазового перехода (5) с учетом (17) примет вид

$$4\lambda_2 \frac{T_0 - T_*}{Ei(-\delta^2/4a_2)} \exp\left(-\frac{\delta^2}{4a_2}\right) + \left[\frac{2(T_g - T_c) \exp\left(-\frac{\delta^2}{4a_1}\right)}{(1/r_0\alpha) + (1/\lambda_{ins}) \ln(r_{ins}/r_0) + (1/\lambda_c) \ln(r_c/r_{ins})} \right] = m(\rho_h q_h s_h^+ + \rho_i q_i s_i^+) \delta^2. \quad (23)$$

Из трансцендентного уравнения (23) находим δ – параметр движения границы фазового перехода $R_* = \delta t^{1/2}$.

Из уравнения (23) можно выразить коэффициент теплоотдачи

$$k_D = \frac{m(\rho_h q_h s_h^+ + \rho_i q_i s_i^+) \delta^2}{2r_c (T_g - T_c) \exp\left(-\frac{\delta^2}{4a_1}\right)} - 2\lambda_2 \frac{T_0 - T_*}{Ei(-\delta^2/4a_2) r_c (T_g - T_c)} \exp\left(\frac{\delta^2}{4a_1} - \frac{\delta^2}{4a_2}\right). \quad (24)$$

Анализ влияния параметров теплоизоляции газовых скважин на интенсивность оттаивания многолетнемерзлых пород и внутримерзлотных газогидратов

На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов в программном комплексе MATHCAD при средних значениях параметров верхних 100 метров толщи криолитозоны южной части Бованенковского га-

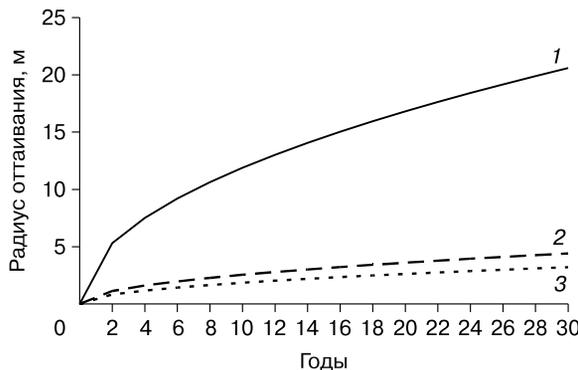


Рис. 1. Динамика роста радиуса оттаивания грунта при различных типах теплоизоляции скважины. 1 – без изоляции; 2 – изоляция 1; 3 – изоляция 2.

законденсатного месторождения (ГКМ) [Строе-ние..., 2007] и при наличии реликтовых гидратов (15 % от объема пор) [Якушев, 2009].

Начальные условия: $T_0 = 268$ К, $T_g = 303$ К, $m = 0.45$, $s_{i0} = 0.76$, $s_{h0} = 0.15$. Параметры льда и гидрата: $\rho_i = 900$ кг/м³, $\rho_h = 900$ кг/м³, $\rho_{0g} = 116$ кг/м³, $T_* = 271$ К, $q_h = 43.7 \cdot 10^4$ Дж/кг, $q_i = 33 \cdot 10^4$ Дж/кг. Параметры скважины: $r_0 = 0.072$ м, $r_c = 0.213$ м, $r_{ins} = 0.084$ м, $r_p = 0.122$ м. Теплофизические свойства талой зоны: $(ср)_1 = 267 \cdot 10^4$ Дж/К, $\lambda_1 = 3.32$ Вт/(м·К) и мерзлой зоны: $(ср)_2 = 186 \cdot 10^4$ Дж/К, $\lambda_2 = 3.87$ Вт/(м·К).

На рис. 1 приведена динамика роста радиуса оттаивания грунта вокруг газовой скважины с температурой потока газа +30 °С для трех вариантов: “без изоляции” с теплопроводностью цемента $\lambda_c = 1.28$ Вт/(м·К); вариант “изоляция 1” с пассивной теплоизоляцией (например, из пенополистирола) вокруг лифтовой трубы с теплопроводностью $\lambda_{ins} = 0.04$ Вт/(м·°С) и далее цементное кольцо со стандартным цементом $\lambda_c = 1.28$ Вт/(м·°С); вариант “изоляция 2” с той же теплоизоляцией вокруг лифтовой трубы, но с низкой теплопроводностью цемента $\lambda_c = 0.4$ Вт/(м·°С).

За первый год эксплуатации скважины радиус оттаивания без теплоизоляции достиг 3.8 м, за 30-летний период эксплуатации скважины он достиг 20.6 м, т. е. области оттаивания пересекаются при расстоянии между скважинами одного куста 40 м.

При этом за счет разложения внутримерзлотных газогидратов за первый год эксплуатации скважины без изоляции образуется около 50 тыс. м³ свободного газа при нормальных условиях, а за весь период эксплуатации скважины 30 лет – около 1500 тыс. м³. Объем выделившегося из гидратов газа рассчитывался по формуле [Васильева и др., 2016]

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

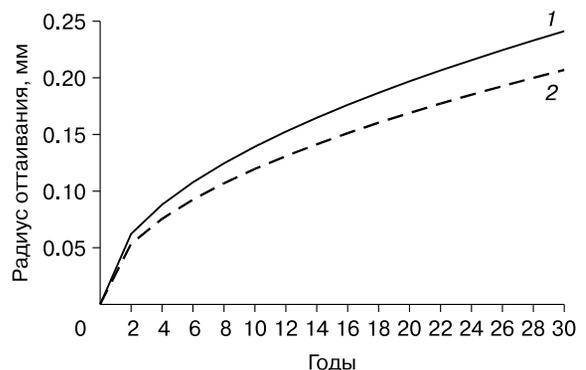


Рис. 2. Динамика роста радиуса оттаивания грунта при теплопроводности теплоизоляции лифтовой трубы $\lambda_{ins} = 0.006$ Вт/(м·К). 1 – изоляция 3; 2 – изоляция 4.

Учитывая, что месторождения п-ова Ямал планируется разрабатывать кустовым способом, причем в кусте должно быть от 6 до 10 скважин, можно предполагать, что в случае нетеплоизолированных скважин растепление ММП приведет к выбросу в атмосферу и в проницаемых пропластках ММП до 15 млн м³ внутримерзлотного газа из одного куста за период 30 лет. Такой объем выделяющегося газа может существенно затруднить обслуживание скважин и привести к авариям на их устье, что уже наблюдалось на Бованенковском ГКМ [Строение..., 2007; Якушев, 2009].

Однако применение пассивной теплоизоляции в пределах ММП может существенно снизить как радиус оттаивания, так и объем выделяющегося внутримерзлотного газа. Как видно на рис. 1, радиусы оттаивания с теплоизоляцией лифтовой трубы различаются незначительно. За первый год эксплуатации скважины радиус оттаивания с теплоизоляцией 1 достиг 0.8 м, с теплоизоляцией 2 – 0.6 м, за период эксплуатации скважины 30 лет он достиг 4.4 и 3.2 м соответственно, т. е. области оттаивания не пересекаются при расстоянии между скважинами одного куста более 10 м.

При этом за счет разложения гидрата до глубины $H = 100$ м за первый год эксплуатации скважины с изоляцией 1 и 2 образуется всего около 2.2 и 1.2 тыс. м³ газа при нормальных условиях, а за весь период эксплуатации скважины 30 лет – около 67 и 36.5 тыс. м³. Это означает, что применение эффективной теплоизоляции резко снижает объемы (в 20–40 раз) выделяющегося из ММП горячего газа при работе скважины.

При очень низкой теплопроводности теплоизоляции лифтовой трубы $\lambda_{ins} = 0.006$ Вт/(м·°С) (например, цилиндрическими блоками на основе супертонких базальтовых волокон) радиусы оттаивания составляют лишь доли миллиметра (см. рис. 2). За первый год эксплуатации скважины радиус оттаивания с высокой теплопроводностью цемента $\lambda_c = 1.4$ Вт/(м·°С) (теплоизоляция 3) достиг 4·10⁻⁵ м, с низкой теплопроводностью цемента $\lambda_c = 0.8$ Вт/(м·°С) (теплоизоляция 4) соста-

вил 3.8·10⁻⁵ м, а за весь период эксплуатации скважины 30 лет достиг 2.4·10⁻⁴ и 2·10⁻⁴ м соответственно. С учетом диссипации энергии можно считать, что при такой низкой теплопроводности теплоизоляции лифтовой трубы растепление ММП вокруг скважины практически не происходит и газ от разложения гидрата не образуется.

Решение обратной задачи теплового взаимодействия добывающей скважины и толщи многолетнемерзлых пород, содержащей реликтовые метастабильные гидраты

Аналитические выражения для коэффициента теплоотдачи (15), (19) позволяют решить *обратную задачу*: для заданного радиуса оттаивания через заданный период эксплуатации скважины можно определить параметры теплоизоляции скважины.

Параметр движения границы фазового перехода δ выражается через радиус оттаивания $r(t)$ за t лет:

$$\delta = r(t) / (60\sqrt{24}\sqrt{365t}).$$

Например, радиус оттаивания за 30 лет эксплуатации должен составить 4.4 м, тогда $\delta = 1.4 \cdot 10^{-4}$ м. По формуле (24) вычисляем коэффициент теплоотдачи $k_D = 0.75$. Для параметров теплоизоляции из (15) получаем выражение

$$\lambda_{ins} = \frac{\ln(r_{ins}/r_0)}{(k_D r_c)^{-1} - (r_0 \alpha)^{-1} - (1/\lambda_c) \ln(r_c/r_{ins})}. \quad (25)$$

При известных значениях $r_0 = 0.084$ м, $r_c = 0.213$ м, $r_{ins} = 0.09$ из формулы (25) получим зависимость теплопроводности изоляции фонтанной трубы от теплопроводности цемента (рис. 3).

Из рис. 3 определяем, что при теплопроводности изоляции лифтовой трубы $\lambda_{ins} < 0.04$ Вт/(м·°С) радиус оттаивания практически не зависит от теплопроводности цемента.

Итак, при теплоизоляции вокруг лифтовой трубы с теплопроводностью $\lambda_{ins} = 0.04$ Вт/(м·°С) (например, из пенополистирола) можно использовать цемент с высокой теплопроводностью, но обладающий быстрым набором прочности (например, арктические системы на основе гипса). Традиционные цементные растворы замерзают, но не набирают прочность. Газ диссоциации гидрата, попадая в цементный раствор, снижает его качество. Быстрый набор прочности обеспечит и минимальное попадание газа в тампонажный раствор.

ВЫВОДЫ

Таким образом, расчеты показывают, что применение современных эффективных теплоизоляционных материалов пониженной теплопроводности может существенно снизить или вообще предотвратить оттаивание ММП и сопутствующее выделение внутримерзлотного газа на газовых скважинах на севере Западной Сибири.

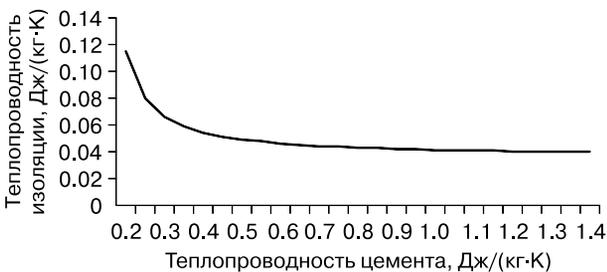


Рис. 3. Зависимость теплопроводности изоляции фонтанной трубы от теплопроводности цемента при коэффициенте теплоотдачи $k_d = 0.75$ Вт/(м²·К) и радиусе оттаивания грунта 4.4 м через 30 лет.

В случае эксплуатации нетеплоизолированных скважин остается риск не только смыкания радиусов оттаивания для скважин в кусте, но и значительных выбросов внутримерзлотного газа из разлагающихся реликтовых гидратов.

За первый год эксплуатации нетеплоизолированной скважины в условиях ММП п-ова Ямал можно ожидать возникновения радиуса растепления до 3.8 м и выделения до 50 тыс. м³ газа из внутримерзлотных гидратов в интервале первых 100 метров. Возможно проникновение газа в приповерхностные слои ММП и общая загазованность территории добычи.

Применение материалов с низкой теплопроводностью для изоляции лифтовых труб, например супертонких базальтовых волокон ($\lambda_{ins} = 0.006 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$), может снизить скорость увеличения радиуса растепления до долей миллиметров в год. При этом резко снижается риск загазованности территории добычи.

Впервые решена обратная задача: для заданного радиуса оттаивания через заданный период эксплуатации скважины определяются параметры теплоизоляции скважины. Получена зависимость теплопроводности изоляции фонтанной трубы от теплопроводности цемента при заданном радиусе оттаивания, из которой можно определить теплопроводность изоляции лифтовой трубы, когда радиус оттаивания практически не зависит от теплопроводности цемента. Тогда можно использовать цемент с высокой теплопроводностью, но обладающий быстрым набором прочности, что обеспечит лучшее сцепление цементного камня с породой.

Аналитическое решение обратной задачи позволяет при проектировании разработки и обустройства месторождений, расположенных в районах распространения ММП, при заданной геометрии расположения куста скважин определять параметры теплоизоляции газовых скважин, при которых невозможно взаимное тепловое влияние скважин.

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

Литература

Баренблатт Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. М., Недра, 1972, 211 с.
Barenblatt, G.I., Entov, V.M., Ryzhik, V.M., 1972. Theory of Unsteady Filtration of Fluids and Gas. Nedra, Moscow, 211 pp. (in Russian)

Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Л., Гидрометеоздат, 1978, 207 с.

Barenblatt, G.I., 1978. Similarity, Self-similarity, and Intermediate Asymptotics. The Theory and applications to geophysical. Gidrometeoizdat, Leningrad, 207 pp. (in Russian)

Басниев К.С. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов. М.; Ижевск, Ин-т компьютерных исслед., 2005, 496 с.
Basniev, K.S., Dmitriev, N.M., Kanevskaya, R.D., Maksimov, V.M., 2005. Underground Fluid Mechanics. Izhevsk Inst. komp. issled., Moscow, 496 pp. (in Russian)

Васильева З.А., Ефимов С.И., Якушев В.С. Прогнозирование теплового взаимодействия нефтегазодобывающих скважин и многолетнемерзлых пород, содержащих метастабильные газогидраты // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 1, с. 65–69.

Vasil'eva, Z.A., Efimov, S.I., Yakushev, V.S., 2016. Prediction of thermal interaction between oil/gas wells and intra-permafrost metastable gas hydrates. Earth's Cryosphere, XX (1), 65–69. (in Russian)

Горелик Я.Б., Шабаров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 59–65.

Gorelik, J.B., Shabarov, A.B., Sysoev, Yu.S., 2008. The dynamics of frozen ground melting in the influence zone of two wells. Earth's Cryosphere, XII (1), 59–65. (in Russian)

Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М., Энергия, 1969, 235 с.

Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S., 1969. Heat Transfer. Energia, Moscow, 235 pp. (in Russian)

Истомин В.А. Руководство по расчету темпов протаивания и обратного промерзания пород при выборе конструкций скважин в криолитозоне / В.А. Истомин, Б.В. Дегтярев, Н.Р. Колушев. М., МинГазпром, ВНИИГАЗ, 1981, 87 с.

Istomin, V.A., Degtyarev, B.V., Kolushev, N.R., 1981. Guidelines for Calculations of Rocks Thawing and Freeze-back Rate at Evaluation of Well Design for Permafrost Areas. VNIIGAZ, Moscow, 87 pp. (in Russian)

Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных скважин. Р Газпром 086-2010. Ч. 1. М., Газпром, 2010, 242 с.

Instructions for integrated gas and gas condensate well test, 2010. R Gazprom 086-2010. Part 1. Gazprom, Moscow, 242 pp. (in Russian)

Коротаев Ю.П., Кривошеин Б.Л., Новаковский В.Н. Термодинамический расчет газовых скважин // Тр. МИНХиГП. М., Недра, 1976, № 116, с. 106–109.

Korotaev, Yu.P., Krivosheyin, B.L., Novakovskii, V.N., 1976. Thermodynamic Calculations of Gas Production Wells. Tr. MINKHiGP, Nedra, Moscow, No. 116, 106–109.

СТО Газпром 2-3.1-233-2008. Методика проведения геокриологических исследований при разведке и разработке месторождений. М., ИРЦ Газпром, 2008, 116 с.

STO Gazprom (Gazprom Company Standards) 2-3.1-233-2008, 2008. Methodological guidelines for geocryological investigations during exploration and development of oil and gas fields. IRTs Gazprom, Moscow, 166 pp. (in Russian)

Строение и свойства криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Отв. ред. Е.М. Чувилин. М., GEOS, 2007, 137 с.

Chuvilin, E.M. (Ed.), 2007. Structure and Properties of Permafrost in the Southern Part of the Bovanenkovo OGCF Area. GEOS, Moscow, 137 pp. (in Russian)

Хрусталева Л.Н., Гунар А.Ю. Влияние газо- и нефтедобывающих скважин на устойчивость гравитационной платформы, расположенной на арктическом континентальном шельфе // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 75–80.

Khrustalev, L.N., Gunar, A.Yu., 2015. Thermal influence of gas and oil boreholes on the stability of a gravity platform located on the Arctic continental shelf. *Earth's Cryosphere*, XIX (4), 75–80. (in Russian)

Эрлагер Р. Гидродинамические методы исследования скважин / Р. Эрлагер. 11-е изд.: пер. с англ. М., Мир, 2007, 512 с.

Erlager, R., 2007. *Hydrodynamic Methods of Well Surveys*. 11th ed. (Translation from English), Mir, Moscow, 512 pp.

Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне / В.С. Якушев. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.

Yakushev, V.S., 2009. *Natural Gas and Gas Hydrates within the Permafrost Zone*. VNIIGAZ, Moscow, 192 pp. (in Russian)

*Поступила в редакцию
21 декабря 2016 г.*