

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В СКВАЖИНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я.

Башкирский государственный педагогический университет

Рассматривается задача о распространении тепла в скважине, в насосно-компрессорной трубе которой образовалась газогидратная пробка. При этом в межтрубное пространство вводится высокочастотная электромагнитная энергия. Получена формула для оценки времени нагрева и разложения газогидратной пробки в адиабатическом приближении. Данная задача решена также в полной математической постановке численным методом. Показана возможность разложения газогидратной пробки в насосно-компрессорной трубе с использованием источников энергии, выпускаемой отечественной электронной промышленностью.

При добыче углеводородов скважинным способом продукция проходит или внутри насосно-компрессорной трубы (НКТ), или в кольцевом пространстве между НКТ и обсадной колонной скважины. Соответственно и газогидратные пробки образуются или в НКТ, или в кольцевом пространстве между НКТ и обсадной колонной. Рассмотрим случай разрушения газогидратной пробки внутри НКТ с использованием энергии электромагнитной волны. Разрушение газогидратной пробки внутри НКТ возможно путем ввода электромагнитной энергии непосредственно в НКТ или в межтрубное пространство.

Рассмотрим особенности разрушения газогидрата внутри НКТ в случае, когда электромагнитная энергия вводится в межтрубное пространство*. Система, состоящая из НКТ и обсадной колонны, представляет в данном случае коаксиальную линию передачи электромагнитных волн от наземного генератора. При соответствующем способе возбуждения в такой коаксиальной линии передачи устанавливается режим бегущих электромагнитных волн. Вследствие конечной электропроводности материала труб и диэлектрических потерь электромагнитной энергии в среде, находящейся между трубами, происходит преобразование части энергии электромагнитной волны в тепловую, повышается

* С участием Насырова Н.М.

температура в скважине. За счет повышения температуры в скважине происходит нагрев и разложение гидратопарафиновой пробки.

Представляет теоретический и прикладной интерес определение температурного поля в скважине при распространении в ней ВЧ электромагнитных волн и исследование процессов фазового перехода в поле электромагнитной волны.

При составлении математической модели подобной задачи, исходной является предпосылка о том, что при достижении соответствующих термодинамических условий (температуры фазового перехода) происходит фазовый переход в узкой области. Эта область в первом приближении может рассматриваться как поверхность. При повышении температуры в среде эта поверхность движется, причем, закон ее движения является неизвестным и определяется в ходе решения задачи. Таким образом, математическая модель представляет собой краевую задачу для уравнений типа теплопроводности в областях разделенных подвижной неизвестной границей. Подобные задачи с неизвестной границей относятся к классу специальных задач математической физики - к задачам со свободной границей (в простейшем случае к задачам типа Стефана) [1- 4]

Целью данной работы является постановка и исследование решений краевой задачи со свободной границей для системы неоднородных уравнений теплопроводности с объёмным источником тепла электромагнитного происхождения для случая многослойной в радиальном направлении цилиндрической системы труб в плане определения оптимальных параметров температурного режима в скважине при воздействии на нее ВЧ электромагнитным полем.

Сначала решим термодинамическую задачу о фазовом переходе в адиабатическом приближении.

Для определения времени нагрева и разложения гидратной пробки в НКТ была решена система уравнений распространения тепла. При этом было пренебрежено переносом тепла за счет теплопроводности вдоль координаты z вследствие малости значений α_3 , α_4 , α_5 , т.е. решалась одномерная задача. Было

принято также, что среда, заполняющая межтрубное пространство и окружающая ствол скважины однородна и изотропна.

В результате была получена следующая система уравнений распространения тепла:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{\rho_1 c_1 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_2 c_2 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_2 r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{1}{\rho_3 c_3 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_3 r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{2\alpha_3 P_0 e^{-2\alpha z}}{c_3 \rho_3 \pi (R_2^2 - R_1^2)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{1}{\rho_4 c_4 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_4 r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \frac{2\alpha_4 P_0 e^{-2\alpha z}}{c_4 \rho_4 \pi (R_3^2 - R_2^2)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial t} = \frac{1}{\rho_5 c_5 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_5 r \frac{\partial T_5}{\partial r} \right) + \frac{2\alpha_5 P_0 e^{-2\alpha z}}{c_5 \rho_5 \pi (R_4^2 - R_3^2)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial t} = \frac{1}{\rho_6 c_6 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_6 r \frac{\partial T_6}{\partial r} \right) \quad (6)$$

Здесь индекс "1" относится к твердой фазе гидрата внутри НКТ $0 < r < R(t)$. Индекс "2" относится к жидкой фазе гидрата $R(t) < r < R_1$, которая появляется по мере нагрева в скважине и возникает вначале у стенки НКТ, потом область жидкой фазы постепенно увеличивается и доходит до центра НКТ. Индекс "3" относится к НКТ $R_1 < r < R_2$. Индекс "4" относится к диэлектрику, заполняющему пространство между НКТ и обсадной колонной $R_2 < r < R_3$. Индекс "5" относится к обсадной колонне $R_3 < r < R_4$. Индекс "6" относится к окружающим скважину породам $R_4 < r < \infty$. Между твердой и жидкой фазами гидрата находится подвижная граница $R(t)$, которая по мере нагрева скважины движется от внутренней стенки НКТ к его центру. Предполагается, что в начальный момент весь гидрат находится в твердой фазе.

c - удельная теплоемкость, Дж/кг К;

ρ - плотность, кг/м³;

λ - теплопроводность, Вт/м К.

Краевые условия для уравнений (8.35) - (8.40) были приняты следующие:

$$T_1(r,0)= T_2(r,0)= T_3(r,0)= T_4(r,0)= T_5(r,0)= T_6(r,0)=T_H; \quad (7)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

$$T_1(R,t) = T_2(R,t) = T_\phi; \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_1,t)}{\partial r} + \lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1,t)}{\partial r} = \rho_1 L \frac{dR}{dt} \quad (9)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_1,t)}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(R_1,t)}{\partial r} \quad T_2(R_1,t) = T_3(R_1,t) \quad (10)$$

$$T_1(R_1,t) = T_3(R_1,t); \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1,t)}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(R_1,t)}{\partial r}$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(R_2,t)}{\partial r} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4(R_2,t)}{\partial r}; \quad T_3(R_2,t) = T_4(R_2,t) \quad (11)$$

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4(R_3,t)}{\partial r} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5(R_3,t)}{\partial r}; \quad T_4(R_3,t) = T_5(R_3,t) \quad (12)$$

$$-\lambda_5 \frac{\partial T_5(R_4,t)}{\partial r} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6(R_4,t)}{\partial r}; \quad T_5(R_4,t) = T_6(R_4,t) \quad (13)$$

$$T_6(\infty,t)=T_H \quad (14)$$

Здесь T_H - температура скважины до начала нагрева, °С;

T_ϕ - температура разложения гидрата, °С;

L – удельная теплота разложения гидрата, Дж/кг.

Для оценочных расчетов времени нагрева и разложения газогидратов было сделано предположение, что теплопроводность газогидрата и НКТ вдоль координаты r очень велики, а теплопроводность среды заполняющей пространство между НКТ и обсадной колонной, равна нулю. В таком случае время, необходимое для нагрева и разложения газогидрата в НКТ, можно определить по простому балансу энергий, выделяемых на единице длины НКТ и необходимых для нагрева от первоначальной температуры до температуры разложения газогидрата единицы длины НКТ, газогидратной пробки и для разложения ее. Эти энергии соответственно равны:

$$N = 2\alpha_3 P_0 t e^{-2\alpha z} \quad (15)$$

$$N_1 = \pi(R_2^2 - R_1^2)c_3\rho_3(T_\phi - T_n) \quad (16)$$

$$N_2 = \pi R_1^2 c_1 \rho_1 (T_\phi - T_n) \quad (17)$$

$$N_3 = \pi R_1^2 \rho_1 L \quad (18)$$

Суммируя выражения (16) - (18) и приравнявая их выражению (15) находим время, необходимое для нагрева и разложения газогидратной пробки в точке z :

$$t = \frac{\pi(T_\phi - T_n)[R_1^2 c_1 \rho_1 + (R_2^2 - R_1^2)c_3 \rho_3] + R_1^2 \rho_1 L}{2\alpha_3 P_0} e^{2\alpha z} \quad (19)$$

Рассмотрим численное решение термодинамической задачи о разложении газогидрата в высокочастотном электромагнитном поле.

Краевая задача (1) - (14) представляет собой нелинейную задачу Стефановского типа, не допускающую аналитическое решение. Эта задача решалась методом конечных разностей по неявной схеме. При этом выбиралась схема с фиксированным шагом по времени и использовались дробные пространственные шаги при определении положения границы раздела фаз [5]. Вычисления проводились для типичных в промышленной практике геометрических и физических характеристик НКТ, обсадных колонн, гидратов и окружающих скважину пород.

В случае заполнения межтрубного пространства между НКТ и обсадной колонной жидкостью или газом, за счет свободной конвекции, эквивалентный коэффициент теплопроводности больше истинного коэффициента теплопроводности [6]. Поэтому в расчетах коэффициент теплопроводности λ_4 умножался на коэффициент конвекции:

$$\varepsilon_k = f(Gr, Pr) \quad (20)$$

где Gr и Pr – соответственно критерии Грасгофа и Прандтля, которые определяются выражениями [6]:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2}; \quad (21)$$

$$Pr = \nu/a \quad (22)$$

Здесь g - ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

V – коэффициент объёмного расширения среды, заполняющей межтрубное пространство, $^{\circ}\text{К}^{-1}$;

ΔT -разность температур между НКТ и обсадной колонной, $^{\circ}\text{К}$;

$l = R_3 - R_2$ – ширина щели между НКТ и обсадной колонной, м ;

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ - кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

μ - динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

При вычислениях Gr , Pr параметры среды принимались для средней температуры между НКТ и обсадной колонной. При $Gr \cdot Pr < 1000$ коэффициент конвекции $\varepsilon_k = 1$ [6], а для $Gr \cdot Pr > 1000$ в первом приближении допустимо принять:

$$\varepsilon_k = 0,105(GrPr)^{0,3} \quad \text{при } 10^3 < GrPr < 10^6 \quad (23)$$

$$\varepsilon_k = 0,4(GrPr)^{0,2} \quad \text{при } 10^6 < GrPr < 10^{10} \quad (24)$$

При расчетах были использованы параметры среды Средне-Вилуйского месторождения Якутской АССР.

В расчетах будем предполагать, что межтрубное пространство заполнено керосином. Диэлектрические характеристики керосина - фракции $150-200^{\circ}\text{C}$, измеренные в лаборатории электромагнитных процессов БашГУ, имеют следующие значения:

Таблица 1

Зависимость ε' и $\text{tg}\delta$ керосина от частоты

f	50МГц	13,56МГц	27,12МГц	40,68МГц	81,36МГц
ε'	2,18	2,13	2,16	2,07	2,17
$\text{tg}\delta$	0,00301	0,00048	0,00031	0,00013	0,0015

Данные об относительной магнитной проницаемости электропроводности стальных НКТ и обсадной колонне берутся из работы [7], они имеют следующее значение: $\mu' = 2,72$; $\sigma = 0,34 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Параметры труб скважины следующие [8]: $R_1 = 0,065$ м; $R_2 = 0,073$ м; $R_3 = 0,12755$ м; $R_4 = 0,13655$ м.

Можно показать, что при расстоянии от устья скважины до нижней границы гидратной пробки $H = 850$ м наивыгоднейшая частота электромагнитных волн для разложения газогидратной пробки равна $13,56$ МГц. Коэффициенты затухания электромагнитных волн α_3 , α_4 , α_5 , вычисленные для данной частоты электромагнитных волн и приведенных выше радиусов труб и параметров среды равны: $\alpha_3 = 0,000311$ 1/м; $\alpha_4 = 0,000099$ 1/м; $\alpha_5 = 0,000178$ 1/м.

Теплофизические параметры твердого гидрата приведены в книге [9]. Они равны: $\lambda_1 = 0,38$ Вт/м·К; $C_1 = 2880$ Дж/кг·К; $\rho_1 = 680$ кг/м³; $L = 533000$ Дж/кг.

По величине $H = 850$ м и по кривым 1 и 2 на рис.11 книги [10] получаем, что в простаивающей скважине на этой глубине температура $T_H = 10$ °С, давление $P = 22,0$ МПа. По вычисленному давлению P и уравнению параметров гидратообразования

$$T = 9,75 \ln(P) - 0,7, \quad (25)$$

приведенному в той же книге, находим температуру фазового перехода гидрата на глубине $H = 850$ м $T_{\phi} = 22,1$ °С.

Теплофизические свойства газового гидрата в жидком состоянии, т.е. при температуре выше температуры фазового перехода, определялись по правилу аддитивности по формуле:

$$F_{см} = \sum_{i=1}^n F_i y_i$$

где $F_{см}$ – интересующее нас свойство газогидратной смеси, например, плотность, молекулярная масса и т.п.;

F_i – свойство i -го компонента, входящего в состав смеси;

y_i – объёмная доля i -го компонента;

n – число компонентов смеси.

При этом должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1$$

Такой расчет теплофизических свойств жидкого газогидрата возможен вследствие того, что компоненты, входящие в состав природного газа, друг на друга химически не действуют [10].

Компонентный состав природного газа Средне-Виллюйского месторождений Якутской АССР приведен в таблице 2 [10].

Таблица 2

Компонентный состав природного газа
Средне-Виллюйского месторождения Якутской АССР

Компонент	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ +выс	CO ₂	N ₂
Y _i	0,877	0,06	0,021	0,013	0,007	0,008	0,014

Теплофизические свойства компонентов природного газа и воды при давлении $P = 22$ МПа и температуре $T = 10$ °С были приняты по книге [11]. Согласно данным этой книги и диаграмме фазового состояния, многие компоненты природного газа при вышеуказанных давлении и температуре находятся в жидком состоянии (C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀, C₅+выст., CO₂) или в состоянии, в котором жидкость и газ неразличимы (CH₄, N₂).

Удельный объём воды в газогидрате был вычислен по данным книги [11] и вышеприведенным данным о давлении, температуре и составе гидрата. Оказалось, что вода в газогидрате Средне-Виллюйского месторождения Якутской АССР занимает объём 0,803. Используя вышеупомянутое правило аддитивности при вычислении теплофизических свойств жидкого газогидрата [10] и данные о теплофизических свойствах компонентов природного газа и воды [11,12], получили: $\lambda_2 = 0,511$ Вт/м·К; $C_2 = 3977$ Дж/кг·К; $\rho_2 = 840$ кг/м³.

Теплофизические свойства стали для расчетов приняты по книге [7]: $\rho_3 = \rho_5 = 7900$ кг/м³; $\lambda_3 = \lambda_5 = 0,11$ кал/см·с·град. = 45,98 Вт/м·К; $C_3 = C_5 = 0,12$ кал/г·град. = 501,6 Дж/кг·К

Теплофизические параметры керосина приняты по книге [2]: $\beta_4 = 0,000406$ К⁻¹; $\lambda_4 = 0,1192$ Вт/м К; $\mu_4 = 0,00173$ Н·с/м²; $C_4 = 2000$ Дж/кг К; $\rho_4 = 819$ кг/м³; окружающих скважину пород по книге [9]: $\lambda_6 = 3,12$ ккал/м·ч·град. = 3,62 Вт/м·К; $C_6\rho_6 = 700$ ккал/м³·град. = 2926000 Дж/м³ К.

Расчеты показали, что в случае заполнения межтрубного пространства керосином мощности ВЧ генератора, выпускаемого отечественной промышленностью, порядка 60 кВт не хватает для разложения газогидратной пробки высотой 850 м. Нужны генераторы гораздо большей мощности. Расчеты показали, что температура фазового перехода быстро достигается, но затем идет долгий процесс разложения газогидрата. Это объясняется приведенными выше теплофизическими параметрами твердого гидрата, из которых видно, что разложение одного килограмма газогидрата энергетически эквивалентно нагреву того же количества газогидрата на 181 °С.

Динамика движения границы фазового перехода $R(t)$ при мощности ВЧ генератора $P_0 = 600$ кВт на глубине скважины $Z = 850$ м показана на рис. 1. Как видно из рисунка, график движения границы фазового перехода гидрата $R(t)$ представляет собой примерно прямую линию.

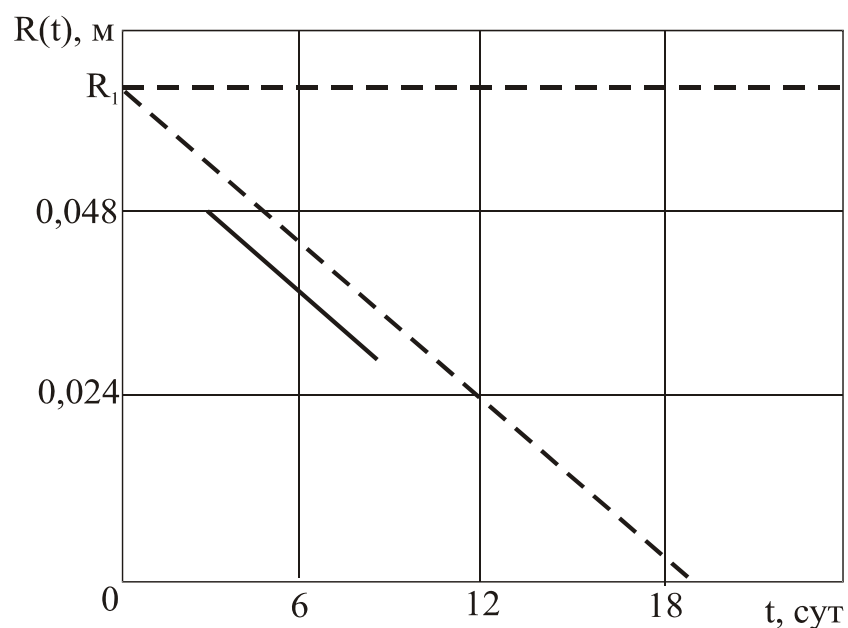


Рисунок 1. Движение границы фазового перехода

— вычисленная кривая;

R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0 = 600$ кВт, $z = 850$ м)

Значительную математическую трудность представляет собой определение начала и конца процесса фазового перехода газогидрата в НКТ, т.к. до начала процесса фазового перехода газогидрата в НКТ задача определения в ней

температуры является однообластной, а с момента начала разложения гидрата двухобластной. Так как данная задача решается методом конечных разностей, то в каждой области должно быть не меньше четырех узлов, в которых определяется температура. Следовательно, остается неопределенным время с начала достижения температуры фазового перехода газогидрата на внутренней стенке НКТ τ_1 до момента достижения границы фазового перехода $R(t)$ четвертого узла от внутренней стенки НКТ.

Это время определяется следующим образом.

Сначала оно определяется по приближенной адиабатической формуле:

$$t = \frac{\pi h^2 [N_6^2 - (N_6 - 4)^2] \rho_1 L}{2\alpha_3 P_0} \rho^{2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)z} \quad (26)$$

где h – величина пространственного шага; N_6 – количество пространственных шагов от центра НКТ до его внутренней стенки.

Затем расчет распределения температуры в скважине продолжается до достижения границы фазового перехода $R(t)$ четвертого узла от центра скважины и определяется время разложения остатка гидрата газа в НКТ по приближенной адиабатической формуле

$$t = \frac{\pi (h/4)^2 \rho_1 L}{2\alpha_3 P_0} \rho^{2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)z} \quad (27)$$

Вслед за этим производится уточнение времени полного разложения газогидрата в НКТ следующим образом. График движения границы фазового перехода $R(t)$, представляющий собой примерно прямую линию, продолжается в обе стороны до пересечения с одной стороны оси абсцисс, с другой стороны до пересечения с внутренним радиусом НКТ R_1 (на рис. 1 показан пунктирной линией). Если это пересечение $R(t)$ и R_1 происходит за осью ординат, то делается параллельный перенос линии $R(t)$ вправо, как это показано на рис. 1. По рис. 1 получается, что полное разложение газогидрата высотой 850 м происходит примерно за $t = 18,6$ суток.

На рис. 2 показана динамика движения границы фазового перехода газогидрата при $P_0 = 300$ кВт. Как видно из рис. 2, время полного разложения газогидрата приблизительно равно $t = 38,5$ суток, т.е. получается, что с уменьшением колебательной мощности ВЧ генератора в два раза время полного

разложения газогидрата увеличилось в два с лишним раза. Видимо тут наблюдается эффект теплового удара, вследствие которого тепловые потери в окружающие скважину породы уменьшаются. Отсюда можно сделать вывод, что разложение газогидратной пробки энергетически выгоднее генератором большой мощности.

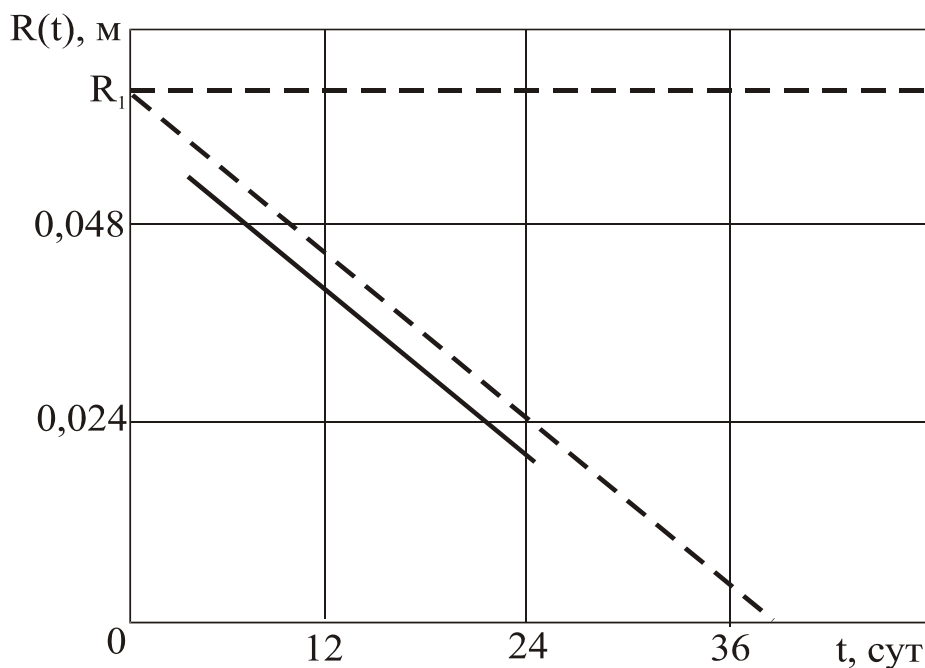


Рисунок 2. Движение границы фазового перехода
 ————— - вычисленная кривая;
 R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0 = 300$ кВт, $z = 850$ м)

Такие же расчеты по разложению газогидратной пробки для ВЧ генераторов мощностью 600 и 300 кВт проведены и для $Z = 10$ м. Глубина $Z = 10$ м выбрана потому, что на меньших глубинах на температуру земли влияют сезонные колебания температуры [9]. На этой глубине температура земли равна $T_H = -10,4$ °С. Так же, как выше, по кривым 1 и 2 на рис. 11 книги [10] определяем давление в простаивающей скважине на этой глубине $P = 200$ МПа. А потом по формуле (25) температуру фазового перехода газогидрата $T_\phi = 21,7$ °С. Как видно отсюда, температура фазового перехода при $Z = 10$ м ($T_\phi = 21,7$ °С) мало отличается от температуры фазового перехода при $Z = 850$ м ($T_\phi = 22,1$ °С)

Распределение температуры в скважине и динамика движения границы фазового перехода $R(t)$ для $Z=10$ м, $P_0=300$ кВт показаны на рис. 3 и 4.

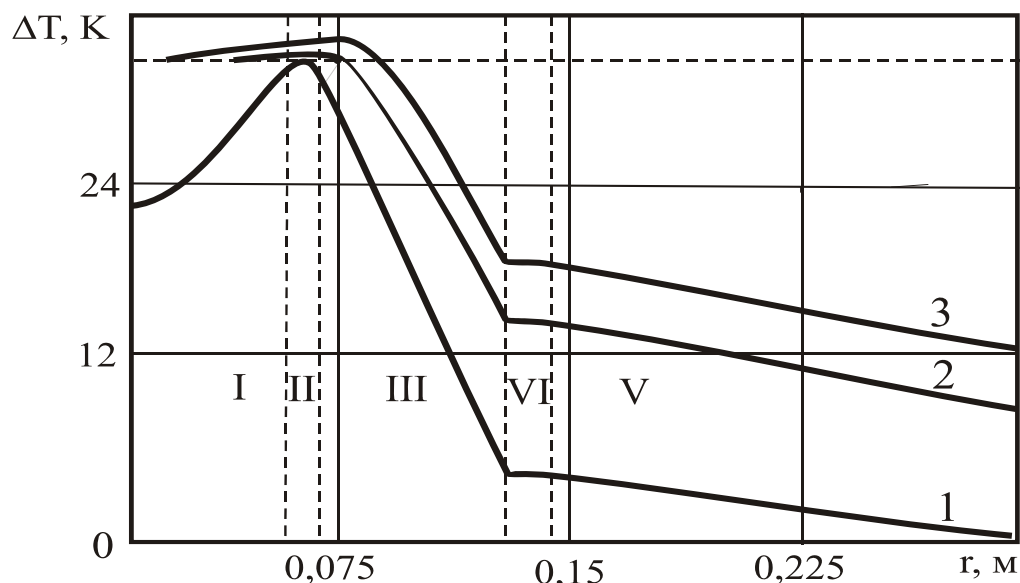


Рисунок 3. Пространственной распределение температуры в скважине:

1 – время достижения температуры фазового перехода $t=0,14$ сут;

2 – $t=3$ сут; 3 – $t=9$ сут;

I – область внутри НКТ; II – материал НКТ; III – межтрубное пространство;

IV – материал обсадной колонны; V – породы окружающие скважину.

————— - изотерма $T_\phi - T_0$ ($P_0=300$ кВт, $z=10$ м)

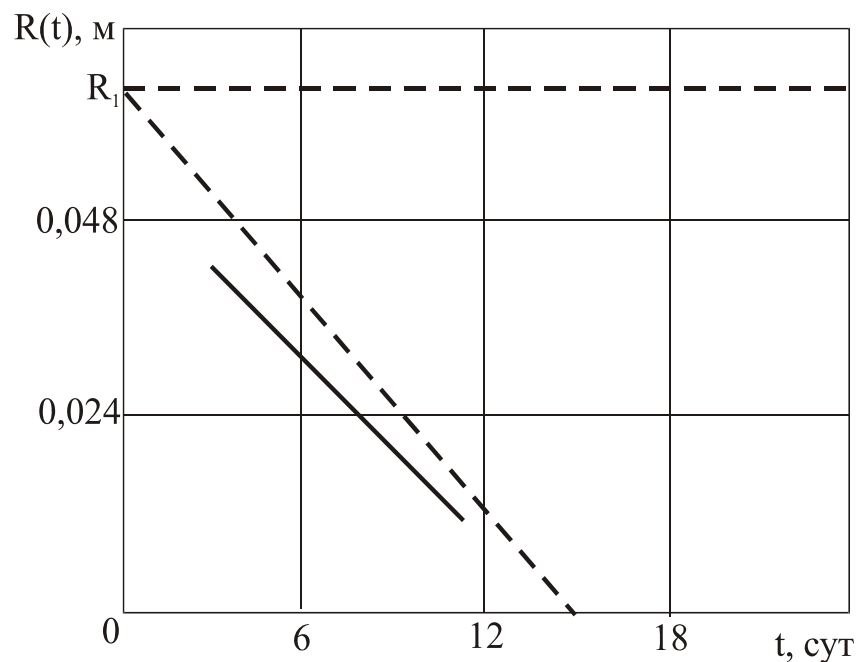


Рисунок 4. Движение границы фазового перехода

————— - вычисленная кривая;

R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0=300$ кВт, $z=10$ м)

То же самое для $P_0 = 600$ кВт показано на рис. 5 и 6.

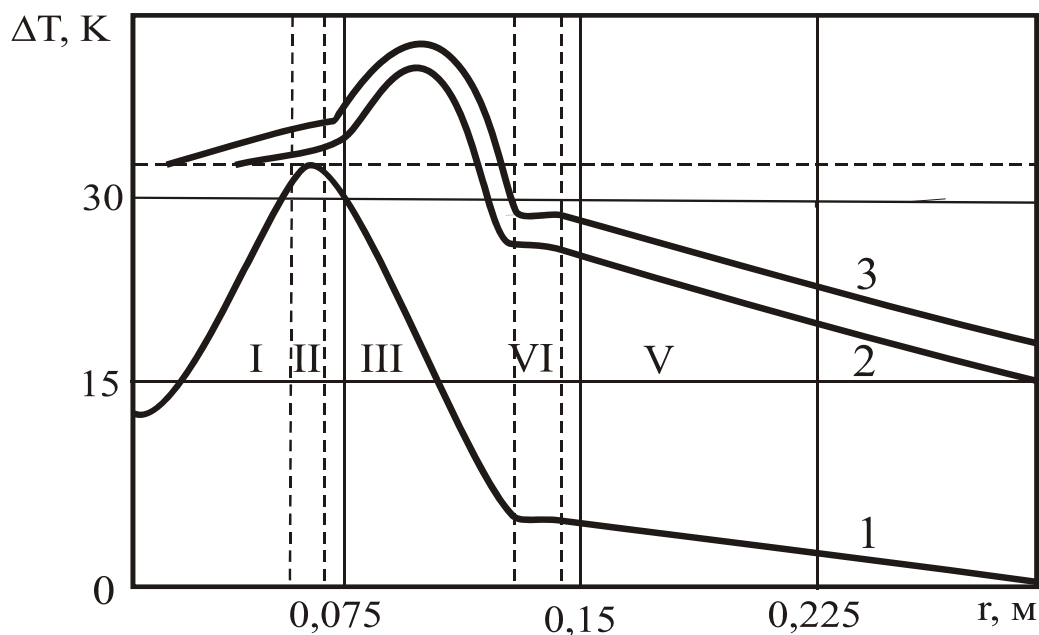


Рисунок 5. Пространственной распределение температуры в скважине:

1 – время достижения температуры фазового перехода $t=0,14$ сут;

2 – $t=3$ сут; 3 – $t=9$ сут;

I – область внутри НКТ; II – материал НКТ; III – межтрубное пространство;

IV – материал обсадной колонны; V – породы окружающие скважину.

————— - изотерма $T_\varphi - T_0$ ($P_0 = 300$ кВт, $z=10$ м)

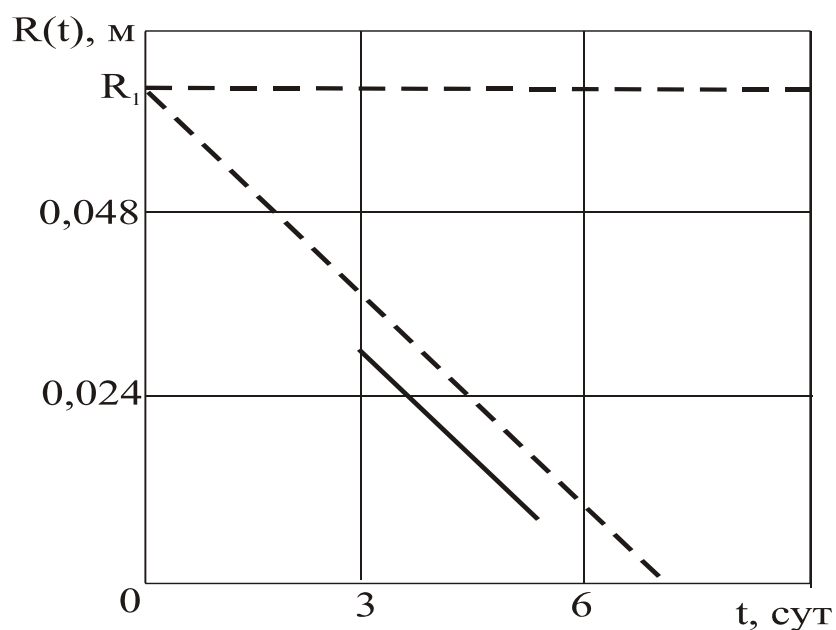


Рисунок 6. Движение границы фазового перехода

————— - вычисленная кривая;

R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0 = 300$ кВт, $z=10$ м)

Как видно из этих рисунков, полное разложение газогидрата при $P_0 = 300$ кВт произойдет приблизительно за $t = 7,4$ суток, т.е. значительно быстрее, чем при $Z = 850$ м. Это может сыграть свою положительную роль, т. к. увеличившееся давление в устье скважины вследствие разложения там газогидрата, может оставшийся газогидрат в нижней части скважины протолкнуть дальше вниз к забою скважины и дальнейшее разложение остатка газогидрата будет происходить под действием тепла земли, т.к. внизу температура земли выше, чем наверху. А может быть выгоднее наоборот, выталкивать газогидратную пробку снизу вверх уменьшением давления каким-нибудь образом на устье скважины, например, выпуском избытка газа в газопровод, т.к. нагрев верхней части скважины идет интенсивнее вследствие большей плотности там тепловых источников. Расчеты показывают, что возможность перемещения газогидратной пробки в процессе ее разложения вверх или вниз в НКГ реально существует, т.к. за долго до того, как произойдет разложение газогидрата по всему радиусу НКГ в какой-либо точке Z , произойдет разложение газогидрата в пристеночной НКГ области по всей длине газогидратной пробки. Таким образом, можно увеличить эффективность разложения газогидратной пробки в НКГ ВЧ электромагнитным полем.

Литература

1. Макогон Ю.Ф., Саяхов Ф.Л., Хабибуллин И.Л.. Физические принципы и модели разложения гидратов природного газа. - М.: ВНИИЭгазпром, 1988. - 32 с.
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1972. - 735 с.
3. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. – Рига: Звайгзне, 1967. - 456с.
4. Мейрманов А.М. Задача Стефана. – Новосибирск: Наука, 1986. – 239с.
5. Охлопков Н.М. О некоторых методах численной реализации многомерных нестационарных краевых задач математической физики. – Якутск: ЯГУ, 1976. - 255 с.
6. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. - М.: Энергия, 1971. - 560 с.
7. Саяхов Ф.Л., Бабалян Г.А., Чистяков С.И. О высокочастотном нагреве призабойной зоны скважин. //Нефтяное хозяйство, 1970. - № 10.- С.49-52.

8. Муравьев В.М. Спутник нефтяника. - М.: Недра, 1977. - 304 с.
9. Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. – Новосибирск: Наука, 1985. - 94 с.
10. Дегтярев Б.В., Бухгалтер Э.Б. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах. – М.: Недра, 1976. - 200 с.
11. Варгафтик Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука, 1972. - 720 с.
12. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. - М.: Недра, 1974. - 208 с.