

**РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ
МЕЖТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА НА 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. Исследуется влияние тепло – и электрофизических свойств среды, заполняющей межтрубное пространство, на эффективность разложения газогидратной пробки.

Для сравнения эффективности разложения газогидрата в НКТ ВЧ электромагнитным полем по сравнению с другими заполнителями межтрубного пространства между НКТ и обсадной колонной, были проведены расчеты* для случая заполнения межтрубного пространства воздухом и пенопластом (пенополиуретан). Математическая модель этих расчетов и смыслы принятых обозначений представлены в работе [1].

Теплофизические параметры воздуха приняты для расчетов по книге [2]:
 $\beta_4 = 0,003458 \text{ K}^{-1}$; $\lambda_4 = 0,0389 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $\mu_4 = 0,0000235 \text{ Н с/м}^2$; $Cp_4 = 1321 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$;
 $\rho_4 = 245,6 \text{ кг/м}^3$.

Коэффициенты затухания электромагнитных волн α_3 , α_4 , α_5 для случая заполнения межтрубного пространства воздухом имеют следующие значения: $\alpha_3 = 0,000213 \text{ 1/м}$; $\alpha_4 = 0$; $\alpha_5 = 0,000122 \text{ 1/м}$.

Здесь предполагается, что тангенс угла диэлектрических потерь воздуха $tg\delta_4 = 0$, а относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_4 = 1$. Это может быть не совсем верно, т.к. воздух в данном случае находится под большим давлением и имеет очень большую плотность: $\rho_4 = 245,6 \text{ кг/м}^3$. Но у нас нет пока данных о $tg\delta_4$ для воздуха при таких больших давлениях.

Результаты вычислений распределения температуры в скважине и динамики движения границы фазового перехода газогидрата $R(t)$ для ВЧ

* С участием Насырова Н.М.

генераторов электромагнитных волн с мощностью $P_0 = 600$ и 300 кВт, для точек с координатами $Z = 10$ и 850 м показаны на рис. 1 - 8.

Как видно из этих рисунков, разложение газогидрата в НКТ в случае заполнения межтрубного пространства воздухом происходит медленнее, особенно при $Z = 10$ м чем при заполнении межтрубного пространства керосином. Такие неожиданные результаты вычислений можно объяснить тем, что хотя и истинная теплопроводность воздуха в несколько раз меньше, чем у керосина, эквивалентная теплопроводность воздуха и керосина примерно одинаковы. Однако плотность распределенных источников тепла в рассмотренном участке скважины в случае заполнения межтрубного пространства воздухом меньше, чем керосином.

Потери тепла в окружающие скважину породы значительно меньше в случае заполнения межтрубного пространства между НКТ и обсадной колонной пенопластом, т.е. в этом случае нет свободной конвекции и эквивалентный коэффициент теплопроводности равен истинному.

Диэлектрические свойства пенопласта для расчетов приняты по [3, 4]: $\epsilon'_4 = 1,1$; $\operatorname{tg} \delta_4 = 0,0015$, по которым были вычислены коэффициенты затухания электромагнитных волн: $\alpha_3 = 0,000224$ 1/м; $\alpha_4 = 0,000223$ 1/м; $\alpha_5 = 0,000123$ 1/м.

Теплофизические свойства пенопласта приняты по [4] $C_4 = 120$ кал/кг·К = $501,6$ Дж/кг·К; $\rho_4 = 50$ кг/м³; $\lambda_4 = 0,02$ ккал/м·ч·град. = $0,0232$ Вт/м·К.

В результате вычислений выяснилось, что мощности ВЧ генератора порядка 60 кВт хватает для разложения газогидратной пробки высотой 850 м в НКТ в случае заполнения межтрубного пространства между НКТ и обсадной колонной пенопластом (пенополиуретаном). Результаты вычислений распределения температуры в скважине и динамики движения границы фазового перехода газогидрата $R(t)$ для генератора с мощностью $P_0 = 60$ кВт для точек с координатами $Z = 10$ и 850 м показаны на рис.9 - 12. Как видно из рисунков, разложение газогидрата по всей длине газогидратной пробки $Z = 10 - 850$ м при $P_0 = 60$ кВт пусть хоть и через длительное время произойдет.

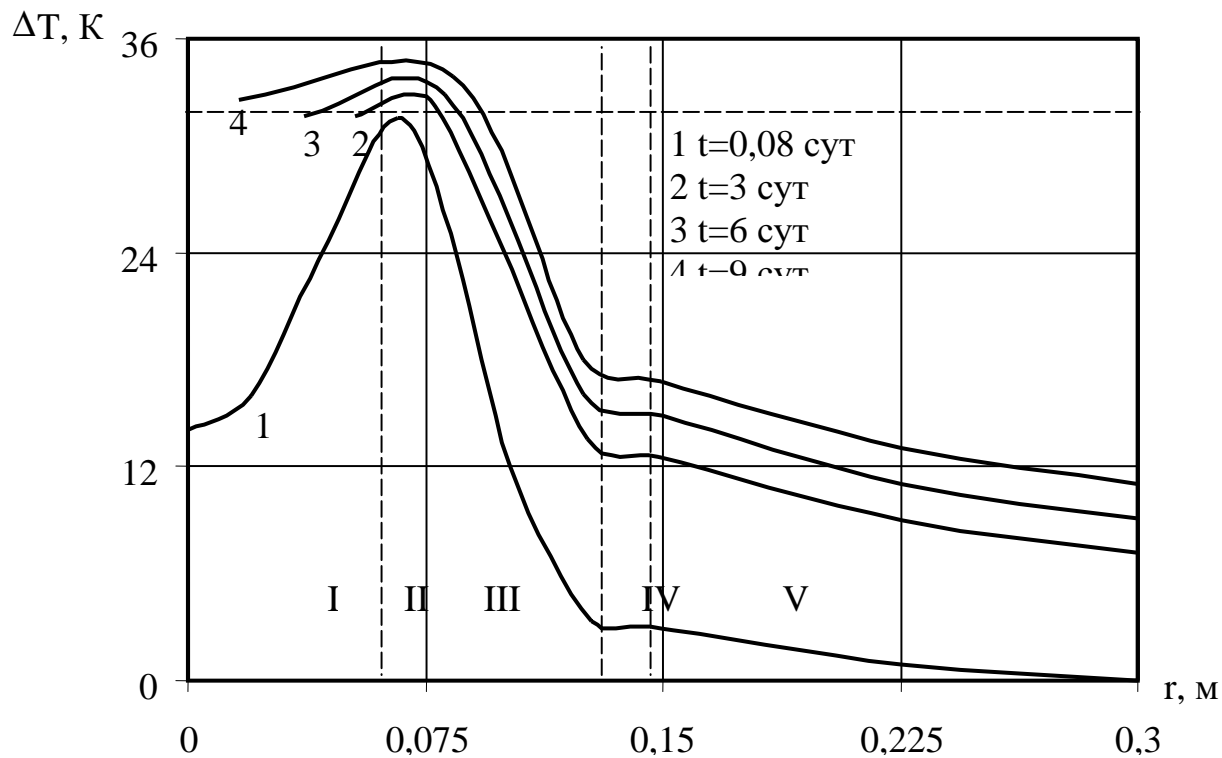


Рисунок 1. Пространственной распределение температуры в скважине:

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)

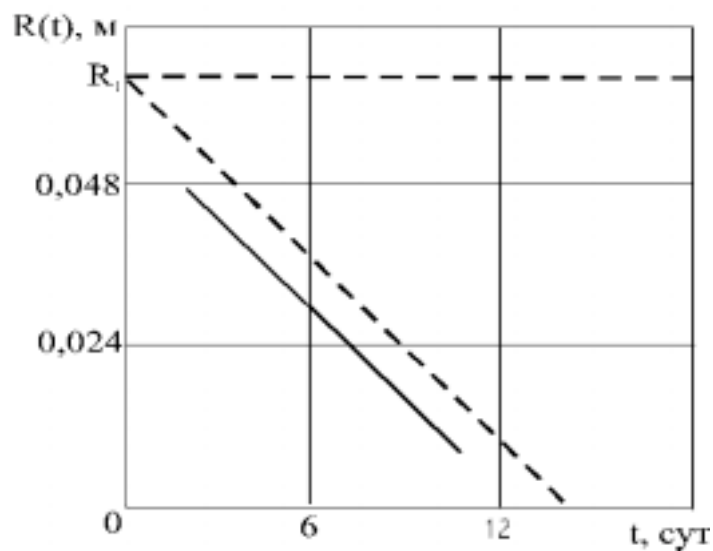


Рисунок 2. Динамика движения фронта фазового перехода:

— - вычисленная кривая; R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0 = 300$ кВт, $z = 10$ м)

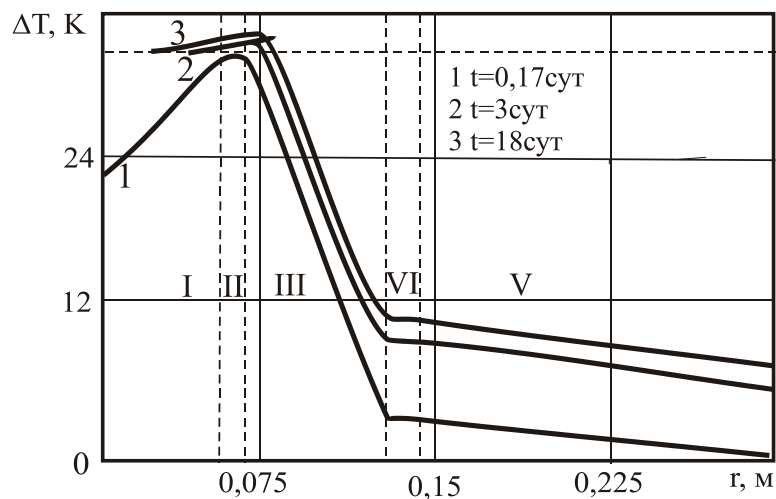


Рисунок 3. Пространственной распределение температуры в скважине:

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)

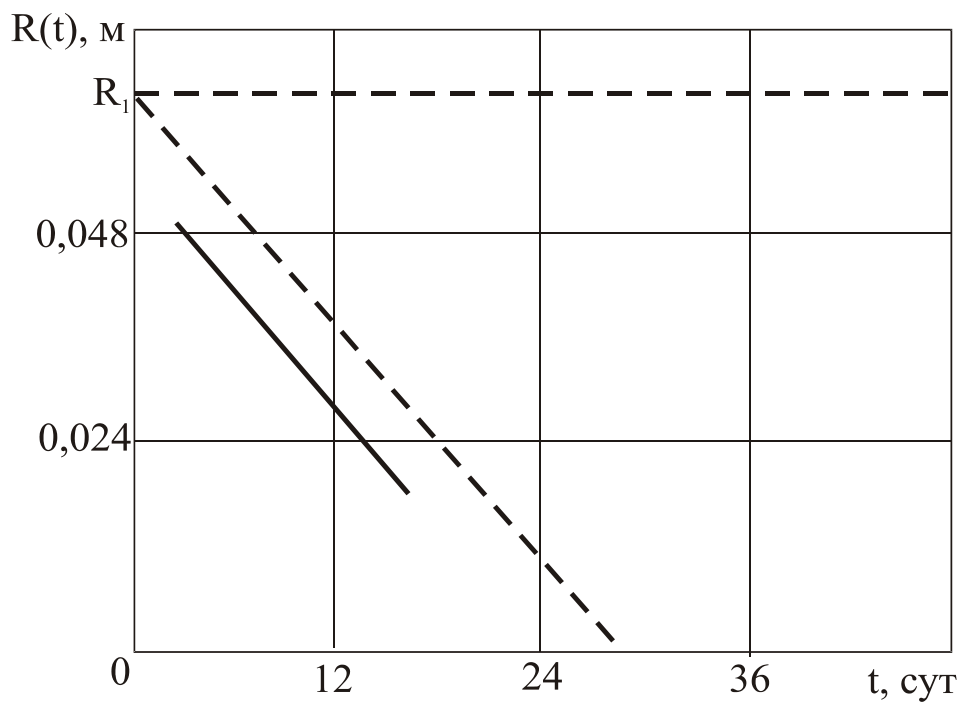


Рис. 4. Динамика границы фазового перехода:

————— - вычисленная кривая; R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0=300$ кВт, $z=10$ м)

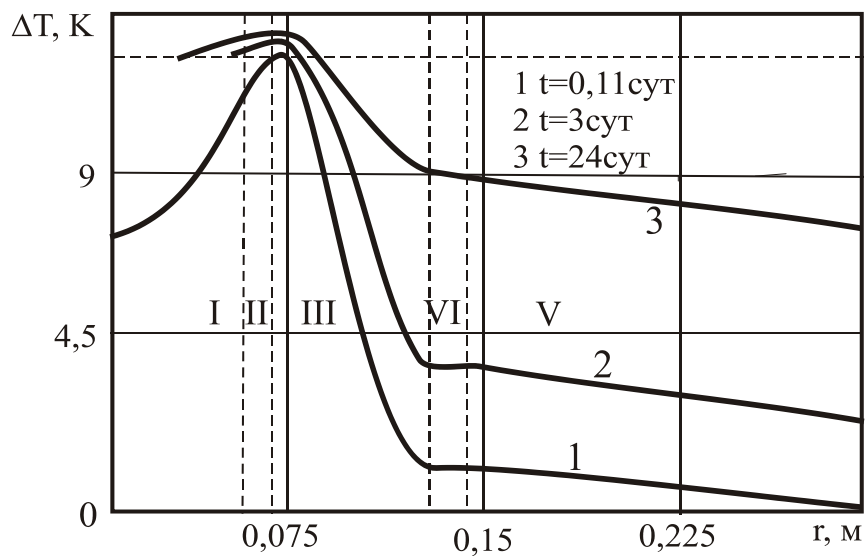


Рисунок 5. Пространственное распределение температуры в скважине:

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, $z=850$ м)

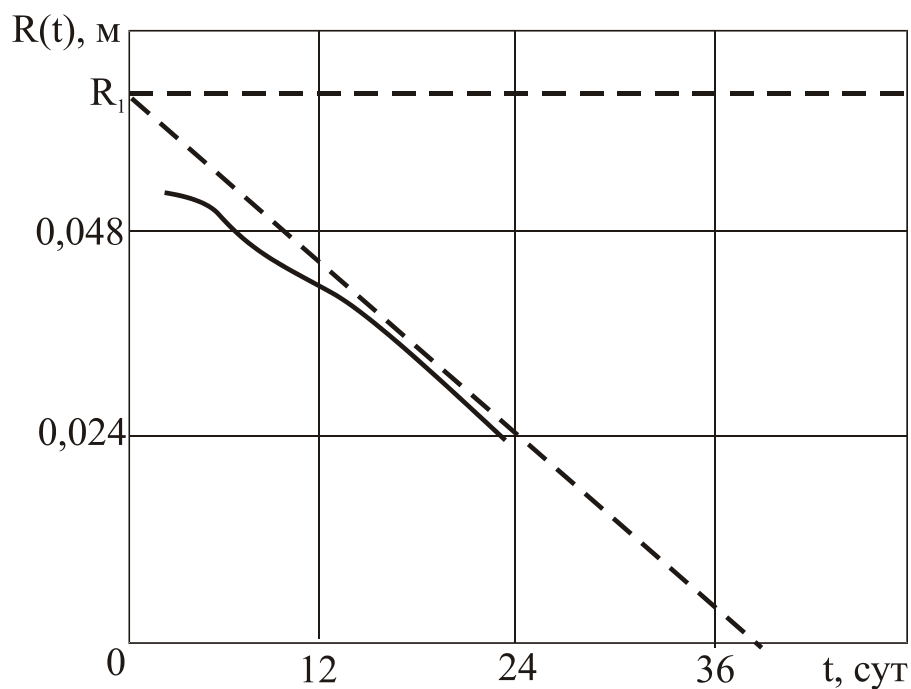


Рисунок 6. Динамика движения границы фазового перехода:

— - вычисленная кривая; R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0=300$ кВт, $z=850$ м)

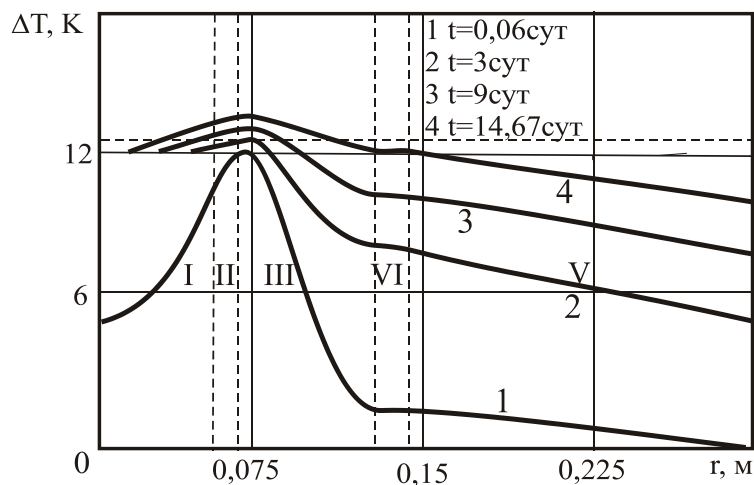


Рисунок 7. Пространственное распределение температуры в скважине:

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, $z = 850$ м)

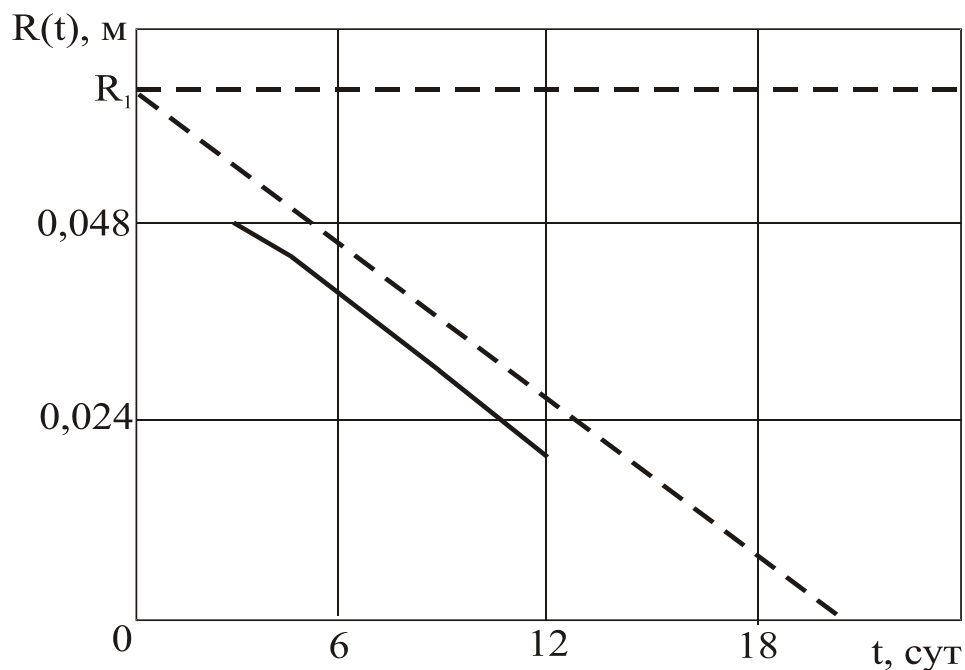


Рисунок 8. Динамика движения границы фазового перехода:

— - вычисленная кривая; R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0 = 300$ кВт, $z = 850$ м)

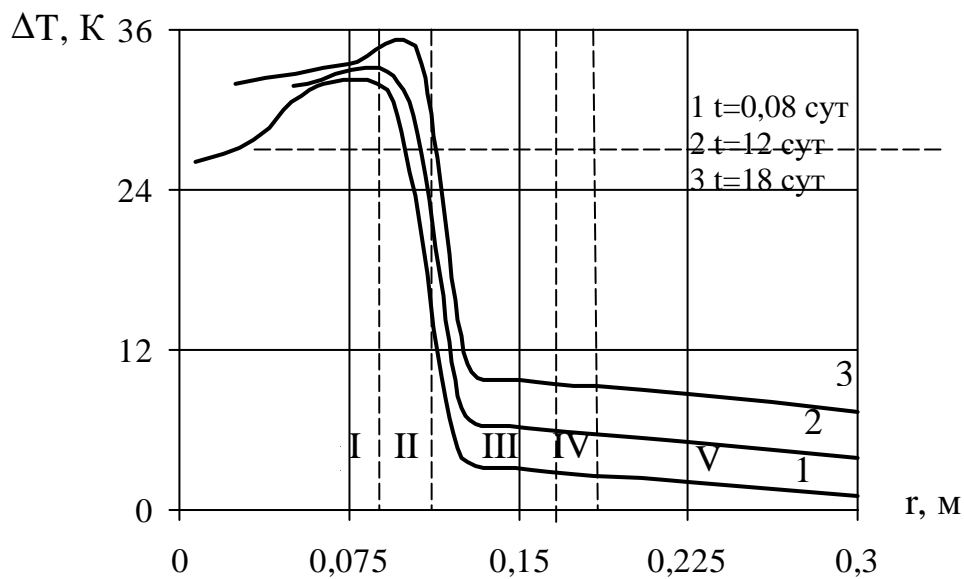


Рисунок 9. Пространственной распределение температуры в скважине:

I – область внутри НКТ; II – материал НКТ; III – межтрубное пространство;
IV – материал обсадной колонны; V – породы окружающие скважину.

----- - изотерма $T_{\phi} - T_0$ ($P_0 = 60$ кВт, $z = 10$ м)

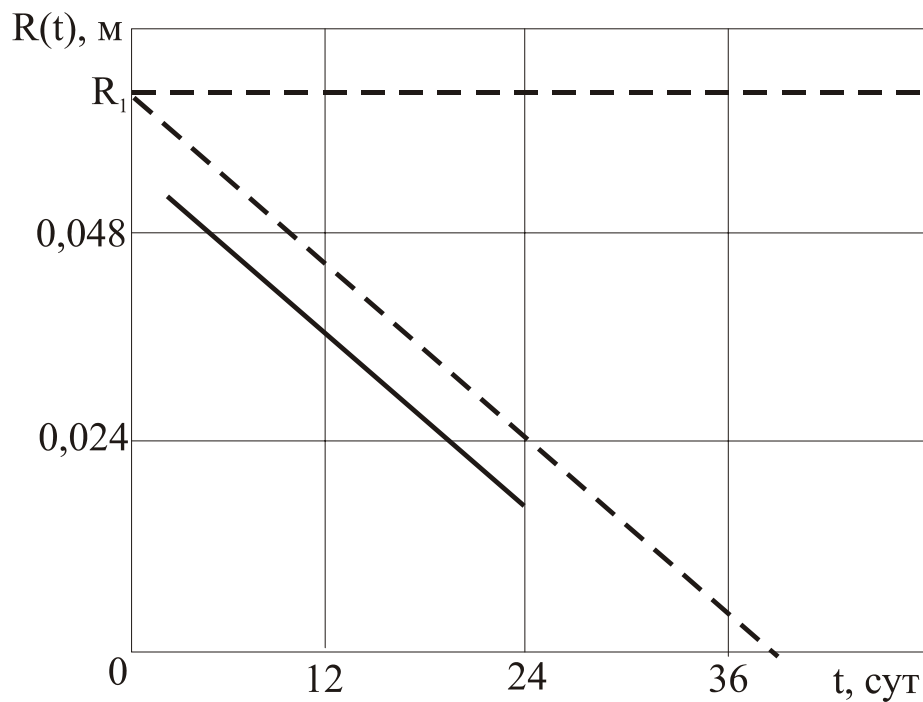


Рисунок 10. Динамика движения границы фазового перехода:

— - вычисленная кривая; R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0 = 60$ кВт, $z = 10$ м)

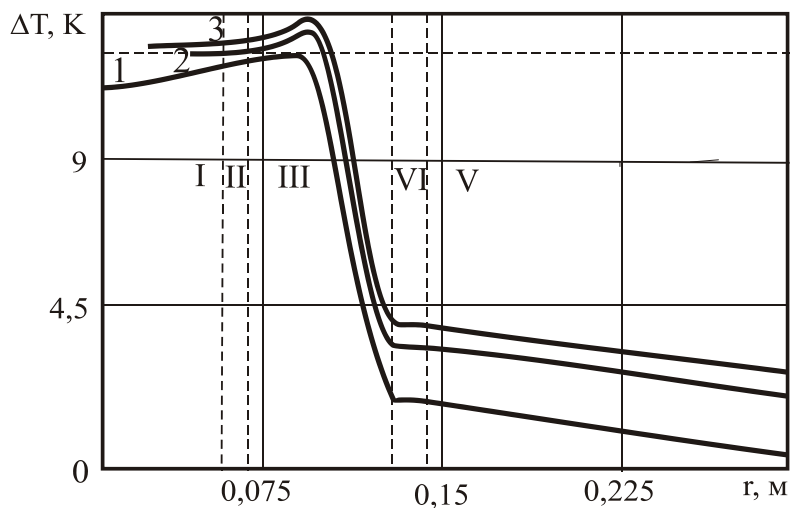


Рис. 11. Пространственной распределение температуры в скважине:

- 1 – время достижения температуры фазового перехода $t=0,24$ сут;
 2 – $t=10$ сут; 3 – $t=50$ сут; I – область внутри НКТ; II – материал НКТ;
 III – межтрубное пространство; IV – материал обсадной колонны;
 V – породы окружающие скважину. ----- - изотерма $T_{\phi}-T_0$ ($P_0=60$ кВт, $z=850$ м)

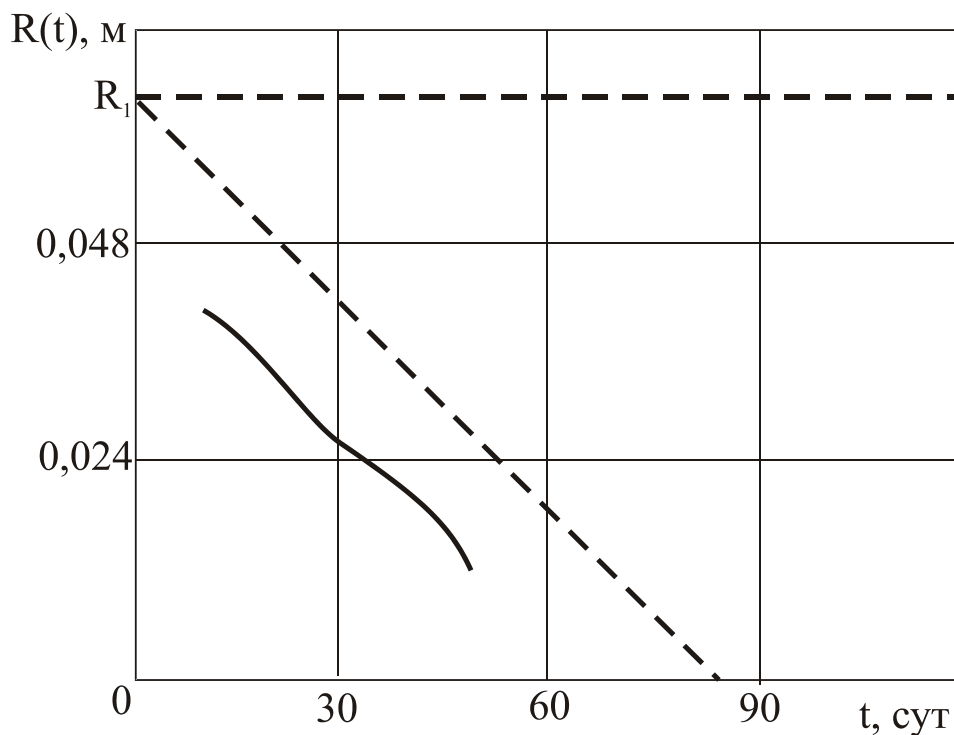


Рисунок 12. Динамика движения границы фазового перехода:

- - вычисленная кривая; R_1 – внутренний радиус НКТ ($P_0=60$ кВт, $z=850$ м)

Проведем сравнение расчета времени нагрева и разложения газогидратной пробки в точке Z , полученной при численном решении термодинамической задачи и в адиабатическом приближении. Время, необходимое для нагрева газогидратной пробки до температуры разложения гидрата, вычислялась по формуле:

$$t = \frac{\pi(T_{\phi} - T_H)[R_1^2 C_1 \rho_1 + (R_2^2 - R_1^2) C_3 \rho_1]}{2\alpha_3 P_0} e^{2\alpha Z} \quad (1)$$

Обозначим через τ_1 время, необходимое для нагрева газогидрата от первоначальной температуры до температуры разложения гидрата, через τ_2 время полного разложения гидрата.

Результаты сравнительных расчетов для разных материалов, заполняющих межтрубное, между НКТ и обсадной колонной пространство, для разных мощностей ВЧ генератора P_0 , для разных координат z приведены в таблицах 1 и 2. Как видно из этих таблиц, времена τ_1 , вычисленные в адиабатическом приближении и численным методом, приблизительно совпадают, т.е. до достижения температуры разложения газогидрата в НКТ потери тепла в окружающие скважину породы невелики и расчеты времени по формуле (1) не дают большой погрешности вычислений. Значения времени τ_2 отличаются больше, чем на порядок. Уносится в окружающие скважину породы не только тепло, выделяемое в обсадной колонне и материале, заполняющем межтрубное пространство, но и часть тепла, выделяемого в НКТ. Из таблиц 3 и 4 видно также, что τ_1^* , вычисленное в адиабатическом приближении для пенопласта больше, чем τ_1 , вычисленное численным методом, т.е. до достижения в НКГ температуры разложения газогидрата тепло, выделяемого в пенопласте, также идет на нагрев газогидрата в НКТ. Для воздуха и керосина наблюдается обратная картина, т.е. τ_1^* , вычисленное численным методом, больше, чем τ_1 , вычисленный в адиабатическом приближении. Это означает, что уже при нагреве газогидрата в НКТ до температуры его разложения только часть тепла, выделяемого в НКТ, идет на нагрев газогидрата, остальная часть идет на нагрев окружающих скважину пород, т.е. так велика эквивалентная теплопроводность воздуха и керосина и истинная теплопроводность окружающих скважину пород.

Рассмотренный нами случай разложения газогидрата, видимо, наихудший, т.к. разность температур между температурой фазового перехода T_f к начальной температурой гидрата в расчетах на глубине $Z=10$ м равнялась $32,1^\circ\text{C}$, а на глубине $Z=850$ м равнялась $12,1^\circ\text{C}$. Есть однако сведения [5], что повышение температуры в зоне гидратообразования на $5-6^\circ\text{C}$ достаточно для разложения гидрата на глубине до $400 - 1600$ м. В таком случае разложение газогидрата ВЧ электромагнитным полем будет происходить быстрее и с большей эффективностью.

Таблица 1

Зависимость времени достижения температуры фазового перехода и полного разложения газогидрата в НКТ от мощности ВЧ генератора и материала, заполняющего межтрубное пространство

Материал	Мощность, кВт	Z=10 м		Z=850 м	
		τ_1^*	τ_2^*	τ_1^*	τ_2^*
Пенопласт	60	0,554	2,61	0,549	5,94
Керосин	300	0,08	0,376	0,081	0,874
	600	0,04	0,188	0,0404	0,437
Воздух	300	0,116	0,546	0,077	0,83
	600	0,058	0,273	0,0384	0,415

*- вычислены в адиабатическом приближении.

Таблица 2

Зависимость времени достижения температуры фазового перехода и полного разложения газогидрата в НКТ от мощности ВЧ генератора и материала, заполняющего межтрубное пространство

Материал	Мощность, кВт	Z=10 м		Z=850 м	
		τ_1^*	τ_2^*	τ_1^*	τ_2^*
Пенопласт	60	0,24	39	0,24	82
Керосин	300	0,14	15,5	0,14	38,5
	600	0,07	7,4	0,07	18,6
Воздух	300	0,17	29	0,11	39
	600	0,08	13,4	0,06	21

*- вычислены численным методом.

Для сравнения были проведены расчеты параметров разложения газогидрата в НКТ при следующих дополнительных параметрах:

$R_1 = 0,0765$ м; $R_2 = 0,084$ м; $R_3 = 0,1$ м; $R_4 = 0,1095$ м (второй вариант). Считаем, что межтрубное пространство заполнено пенопластом. Расчеты показали, что при этих условиях время разложения газогидрата на расстоянии $Z = 10$ м составляет $\tau_1 = 16,4$ суток. При прежних параметрах (первый вариант) труб это значение равнялось $\tau_2 = 39$ суток. Это объясняется тем, что во втором варианте плотность мощности распределенных источников тепла в НКТ больше, чем в первом случае. Действительно, для первого варианта $\alpha_3 = 0,000224$ м⁻¹; $\alpha_4 = 0,000223$ м⁻¹; $\alpha_5 = 0,000128$ м⁻¹; $\alpha = 0,000575$ м⁻¹; для второго варианта $\alpha_3 = 0,000622$ м⁻¹; $\alpha_5 = 0,000522$ м⁻¹; $\alpha = 0,000136$ м⁻¹, т.е. во втором варианте коэффициент поглощения электромагнитных волн больше в 2,4 раза, нежели в первом варианте. Однако такое распределение мощности распределенных источников тепла ограничивает время разложения газогидрата в глубине скважины. Например, для второго варианта при $Z = 850$ м газогидрат нагревается до температуры фазового перехода, а газогидрат не разлагается.

Такие же закономерности прослеживаются в зависимостях времени разложения газогидрата от разности температур между температурой фазового перехода T_ϕ и начальной температурой гидрата T_0 . Так, при $Z = 10$ м $T_\phi - T_0 = 6^\circ\text{C}$ $\tau_1 = 14,4$ суток, а при $T_\phi - T_0 = 32,1^\circ\text{C}$ $\tau_2 = 16,4$ суток. Таким образом, в случае заполнения межтрубного пространства пенопластом, влияние значения $T_\phi - T_0$ на время разложения гидрата незначительное.

Литература

1. Саяхов Ф.Л., Багаутдинов Н.Я. Электротепловые методы воздействия на гидратопарафиновые отложения. -М.: Недра, 2003. – 119 с.
2. Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. - Новосибирск.:Наука, 1985. - 94 с.
3. Краткий справочник химика./ Сост. В.И. Передельман. - М.: Госхимиздат, 1963. - 620 с.

4. Справочник по пластическим массам. Т.II./ Под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова и др. - М.: Химия, 1975. - 568 с.

5. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. - М.: Недра, 1983. - 192 с