

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ РАДИУСА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ТЕПЛОВИМ РАЗЛОЖЕНИИ ГАЗОГИДРАТА МЕТАНА

Валеев Д.Ф., магистр, аспирант
Бирский филиал УУНиТ, г. Бирск, Россия

Аннотация. Рассматривается задача о движении фронта разложения газогидрата метана в вертикальном кольцевом канале с погружным трубчатым электронагревателем. Сформулирована математическая модель, включающая уравнения двухфазного потока, условие фазового равновесия и уравнение эволюции радиуса полости. Численное решение реализовано методом Рунге–Кутты с пристрелкой по давлению и явным пересчётом радиуса на каждом временном шаге. Получены зависимости радиуса полости и массового расхода газа от времени при различных мощностях нагревателя и противодавлениях.

Ключевые слова: газогидрат метана, кольцевой канал, фронт разложения, двухфазный поток, численное моделирование.

Введение. Газовые гидраты метана рассматриваются как перспективный источник природного газа [1]. Один из способов извлечения метана — погружение трубчатого электронагревателя (ТЭНа) в цилиндрическую полость, пробурённую в толще гидратного пласта [2]. Тепловой поток от нагревателя вызывает разложение гидрата на стенке полости, в результате чего фронт разложения смещается вглубь пласта, а радиус полости увеличивается со временем.

При моделировании восходящего двухфазного потока в кольцевом канале между ТЭНом и стенкой полости [3] радиус часто считается фиксированным. Для прогнозирования реальной динамики добычи необходимо отслеживать движение границы разложения. Настоящая работа посвящена численному

моделированию эволюции радиуса полости на основе уравнения баланса массы гидрата.

1. Математическая модель

В вертикальной цилиндрической полости радиуса $a(z,t)$ вдоль оси z расположен ТЭН радиуса r с линейной мощностью W . Тепловой поток от ТЭНа прогревает восходящий двухфазный поток (метан + вода) и расходуется на разложение гидрата на стенке.

Удельная скорость разложения j_h (кг/(м²·с)) определяется из баланса тепловых потоков на границе:

$$j_h = \frac{q_h - q_{hm}}{l_h} \quad (1)$$

где $q_h = \alpha_h(T - T_s)$ — тепловой поток от потока к стенке, q_{hm} — поток в массив гидрата, l_h — удельная теплота разложения, $T_s = T_s(P)$ — равновесная температура.

Эволюция радиуса полости описывается уравнением [2]:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{j_h}{\rho_h \varphi_h} \quad (2)$$

где ρ_h — плотность гидрата, φ_h — насыщенность пласта гидратом. Уравнения сохранения массы фаз, импульса и энергии для квазистационарного двухфазного потока имеют вид:

$$\frac{dm_g}{dz} = 2\pi a G j_h, \quad \frac{dm_l}{dz} = 2\pi a(1 - G) j_h \quad (3)$$

где G — массовая доля газа в гидрате. Уравнения для давления $P(z)$ и температуры $T(z)$ получаются из балансов импульса и энергии [3].

2. Метод решения

На каждом временном шаге Δt :

1. при текущем профиле $a^n(z)$ методом пристрелки по входному давлению решается краевая задача для системы ОДУ относительно (m_g, m_l, T, P) ; интегрирование выполняется методом Рунге–Кутты 4-го порядка по сетке $N_z = 500$ узлов;
2. из решения извлекается профиль скорости разложения $j_n^h(z)$;
3. радиус обновляется по явной схеме:

$$a^{n+1}(z) = a^n(z) + \frac{j_n^h(z)}{\rho_h \varphi_h} \Delta t \quad (4)$$

Шаг по времени $\Delta t = 300$ с. Расчёты выполнены до $t = 48$ ч.

3. Результаты

Параметры: $L = 50$ м, $a^0 = 0,10$ м, $a_t = 0,025$ м, $\rho_h = 910$ кг/м³, $l_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\varphi_h = 0,5$, $G = 0,12$.

На рис. 1 представлены профили радиуса полости $a(z)$ для базового расчёта ($W = 1000$ Вт/м, $P_0 = 5$ МПа) в моменты времени $t = 0, 12, 24, 36, 48$ ч.

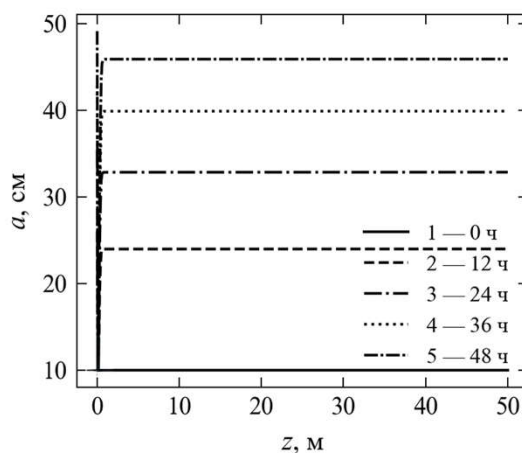


Рисунок 1. Профили радиуса полости в различные моменты времени: 1 — 0 ч; 2 — 12 ч; 3 — 24 ч; 4 — 36 ч; 5 — 48 ч.

Видно, что радиус почти однороден по длине канала (за исключением узкой приустьевой зоны $z < 2$ м) и монотонно увеличивается со временем. К $t = 48$ ч радиус в основной части канала достигает примерно 0,19 м, т. е. возрастает почти вдвое по сравнению с начальным значением.

Влияние мощности ТЭНа на накопленный объём добытого газа $V_g(t)$ иллюстрирует рис. 2. Зависимости близки к линейным, что отражает пропорциональность мгновенного расхода газа $m_g \sim W$.

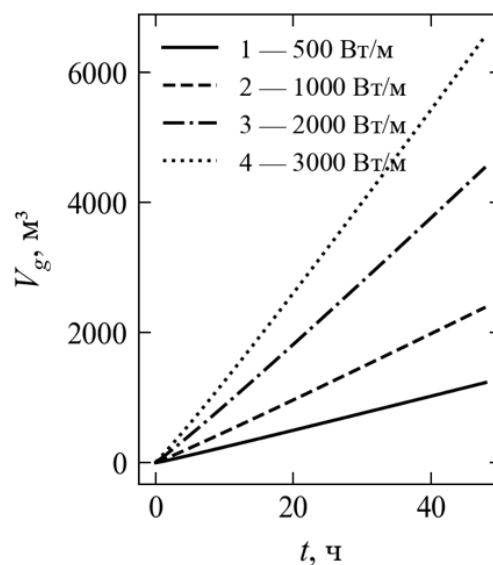


Рисунок 2. Накопленный объём добытого газа при различных мощностях ТЭНа: 1 — 500 Вт/м; 2 — 1000 Вт/м; 3 — 2000 Вт/м; 4 — 3000 Вт/м.

Таблица 1. Средний радиус полости и массовый расход газа при МПа

t, ч	W = 500 Вт/м	W = 1000 Вт/м	W = 2000 Вт/м	W = 3000 Вт/м
0	0,100	0,100	0,100	0,100
12	0,115	0,131	0,162	0,193
24	0,129	0,159	0,218	0,275

t, ч	W = 500 Вт/м	W = 1000 Вт/м	W = 2000 Вт/м	W = 3000 Вт/м
36	0,142	0,184	0,266	0,347
48	0,154	0,207	0,311	0,412

Приведённые значения (средний по длине канала радиус, м) показывают, что при увеличении мощности в 6 раз прирост радиуса за 48 ч возрастает примерно в 5,8 раза, т. е. зависимость близка к линейной. Это объясняется тем, что при фиксированном давлении P_0 равновесная температура T_s не изменяется, а скорость разложения j_h определяется преимущественно подводимым тепловым потоком.

Анализ показывает, что скорость роста радиуса слабо зависит от координаты z и практически постоянна во времени в широком интервале 6–48 ч. Это связано с тем, что при данных параметрах $\frac{a_t}{a} \ll 1$ и тепловое сопротивление в массиве гидрата невелико, так что $j_h \approx \frac{W}{2\pi a \cdot l_h}$. Соответственно, $\frac{da}{dt} \sim \frac{1}{a}$, что и даёт наблюдаемое слабое замедление фронта.

Заключение

Предложена вычислительная процедура для определения эволюции радиуса цилиндрической полости при тепловом разложении газогидрата метана погружным нагревателем. Процедура основана на сопряжении квазистационарной задачи о двухфазном потоке в кольцевом канале с явным пересчётом положения фронта разложения.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов теплового воздействия на газогидратные пласты.

Литература

1. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 1. — С. 5–20.

2. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива промывочной жидкостью // Прикладная механика и техническая физика. — 2009. — Т. 50, № 4. — С. 101–111.

3. Валеев Д.Ф., Русинов А.А. Регуляризация вырождающегося уравнения энергии при моделировании двухфазного потока с нулевым начальным расходом // Сб. науч. статей Региональной. науч.-практ. конф. «Наука в школе и вузе». — Бирск, 2026. — (в печати).