

М.В. Столповский, А.С. Чиглинцева, М.Р. Давлетшина (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА МЕТАНА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Maxim V. Stolpovsky, Angelina S. Chiglintseva, Milyausha R. Davletshina
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

NUMERICAL STUDY OF COMBUSTION PROCESS OF METHANE GAS HYDRATE IN A CLOSED SPACE

Введение

Гидраты природного газа представляют большой научный и практический интерес. Это обусловлено тем, что газовые гидраты представляют собой естественные резервуары, аккумулирующие в себе большие объемы газа (метана) и воды.

Интерес к изучению горения гидратов обусловлен различными факторами: повышенным термическим коэффициентом полезного действия для применения в энергетике, большей стабильностью гидрата и возможностью сжигания на месте.

Цели и задачи

Исследовать процесс горения гидрата метана в замкнутом объеме.

Методы

Математическое моделирование.

Результаты

Рассмотрен случай, когда газовая область, окружающая гидрат, разделена на две области. При этом ближняя область, примыкающая к гидрату, содержит горючее (метан) и окислитель для инициирования процесса горения; в дальней области горючее отсутствует.

Background

Natural gas hydrates are of great scientific and practical interest. This is due to the fact that gas hydrates are natural reservoirs that accumulate large volumes of gas (methane) and water.

Interest in the study of hydrate combustion is due to various factors: increased thermal efficiency for use in power engineering, greater hydrate stability, and the possibility of on-site combustion.

Aims and Objectives

Investigate the combustion process of methane hydrate in a closed space.

Methods

Math modeling.

Results

The case is considered when the gas region surrounding the hydrate is divided into two regions. In this case, the near region adjacent to the hydrate contains fuel (methane) and an oxidant to initiate the combustion process; there is no fuel in the far region.

Представленная система основных уравнений включает в себя уравнения импульсов, сохранения масс для всей газовой смеси, а также для каждого ее компонента; уравнения притока тепла (для газогидрата и газовой смеси). Кроме того, представленная система уравнений дополнена условиями баланса масс и тепла на границе разложения газогидрата, а также начальными условиями и условиями на границах замкнутого объема. Решение представленной системы осуществлено методом крупных частиц. На основе численных решений установлено, что при низких значениях коэффициентов переноса наблюдается устойчивое горение и максимальная температура газа поддерживается приблизительно постоянной на уровне 900 К. При высоких значениях коэффициентов переноса быстрота разложения гидрата увеличивается. Вследствие этого интенсивность горения метана увеличивается, что приводит к быстрому израсходованию кислорода и, как следствие, прекращению процесса горения. Установлено, что с увеличением исходной концентрации кислорода время горения, как и максимальное давление в объеме увеличиваются.

The presented system of basic equations includes the equations of momenta, mass conservation for the entire gas mixture, as well as for each of its components; heat flow equations (for gas hydrate and gas mixture). In addition, the presented system of equations is supplemented by the conditions for the balance of mass and heat at the decomposition boundary of the gas hydrate, as well as with the initial conditions and conditions at the boundaries of the closed space. The solution of the presented system was carried out by the method of large particles. On the basis of numerical solutions, it has been established that at low values of the transfer coefficients, stable combustion is observed and the maximum gas temperature is maintained approximately constant at 900 K. At high values of the transfer coefficients, the rate of hydrate decomposition increases. As a result, the intensity of methane combustion increases, which leads to a rapid consumption of oxygen and, as a consequence, the termination of the combustion process. It was found that with an increase in the initial oxygen concentration, the combustion time, as well as the maximum pressure in the volume, increase.

Ключевые слова: газогидрат; газовая смесь; фазовый переход; массовая концентрация

Key words: gas hydrate; gas mixture; phase transition; mass concentration

Введение

В настоящее время гидраты природного газа представляют большой научный и практический интерес. Это обусловлено в основном тем, что газовые гидраты представляют собой естественные резервуары, аккумулирующие в себе большие объемы газа (метана) и воды. Так, в 1 м³ газогидрата содержится до 170 м³ метана при нормальных условиях.

Интерес к изучению горения гидратов обусловлен различными факторами: повышенным термическим КПД для применения в энергетике, большей стабильностью гидрата и возможностью сжигания на месте.

По мнению некоторых ученых [1], сжигание гидратов на месте добычи позволит использовать полученное тепло для дальнейшего разложения. Эта задача является очень сложной и комплексной, так как необходимо учитывать и описывать сразу несколько за-

дач, таких как диссоциация гидрата на газ и воду, диффузия газа через водную оболочку, смешение метана с окружающим воздухом, горение образовавшейся метановоздушной смеси, дренаж воды с поверхности гидрата и т.д.

Принципиальная возможность горения газогидрата продемонстрирована в экспериментальных работах [2, 3]. Распространение пламени над гидратом метана численно исследовано в [4] и экспериментально в [5, 6]. Экспериментальные результаты показали, что скорость распространения пламени составляла около 2 мм/с. Численными расчетами по простой одномерной модели установлено, что скорость распространения пламени составляет около 1,5 мм/с, т.е. близка к экспериментальному результату.

В данной работе представлена математическая модель горения слоя газогидрата в замкнутом объеме. На основе численного решения методом крупных частиц представленной системы уравнений исследуются поля температур, давлений и концентраций компонент газовой смеси.

Показано, что в зависимости от значений коэффициентов переноса интенсивность горения метана может сильно увеличиваться, что, в свою очередь, может приводить к более быстрому израсходованию кислорода и, как следствие, прекращению процесса горения. Кроме того, исследовано влияние исходной концентрации кислорода на время горения гидрата и на давление газовой смеси.

Постановка задачи

На рисунке 1 представлен цилиндрический объем длины L ($0 \leq x \leq L$), в который в исходном состоянии помещается слой гидрата метана толщины a_0 ($0 \leq x \leq a_0$). При этом другая часть данного объема ($a_0 < x \leq L$) содержит смесь газов и разделена на две области.

Область ($a_0 + h < x \leq L$) содержит кислород, азот, водяной пар и углекислый газ. Область длины h ($a_0 < x \leq a_0 + h$) помимо вышеперечисленных газов содержит в своем

составе метан для инициирования процесса горения согласно следующей схеме:



Здесь Q - теплота реакции окисления, направленная на разложение гидрата метана.

Будем полагать, что исходные температура и давление газовой смеси равны соответственно T_{g0} и p_0 . При этом начальная температура газогидрата Th_0 соответствует условиям стабильного существования гетерогенной смеси метана и воды, т.е. $Th_0 > Ts(p_0)$, где $Ts(p)$ - равновесная температура, соответствующая давлению p .

При описании процесса горения газовой смеси, сопровождающегося разложением газогидрата метана, примем следующие допущения: гидрат является несжимаемым и неподвижным, газы - идеальные; массовое содержание газа в составе гидрата примем равным G .

При этом газовая смесь подчиняется закону Дальтона:

$$p = R_g T \sum_{i=1}^5 \frac{\rho_i}{\mu_i} \quad (1)$$

Здесь R_g - универсальная газовая постоянная;

T - температура;

ρ_i и μ_i - соответственно парциальная плотность и молярная масса i -го компонента газовой смеси;

нижние индексы $i = 1, 2, \dots, 5$ соответствуют метану, кислороду, углекислому газу, водяному пару и азоту.

Содержание каждого компонента описывается массовой концентрацией C_i , которая определяется следующим образом:

$$C_i = \rho_i / \rho$$

где $\rho = \sum_{i=1}^5 \rho_i$ - плотность газовой смеси.

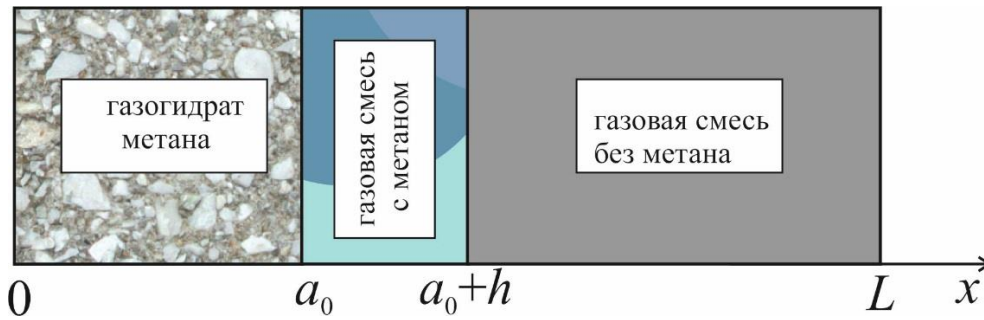


Рисунок 1. Постановка задачи

Система основных уравнений для газовой фазы, включающая в себя уравнения сохранения масс (для смеси в целом и ее компонентов), импульсов и притока тепла имеет вид [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_i v) &= D \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\rho C_i) + n_i J, \\ (i = 1, \dots, 5), \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) &= \nu \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\rho u) - \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho CT) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho CT u) &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + rJ. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь u - скорость газовой смеси;

D , λ и ν - соответственно коэффициенты диффузии, теплопроводности и кинематической вязкости газовой смеси;

n_i - стехиометрические коэффициенты для i -го компонента смеси;

r - удельная теплота сгорания метана.

При этом величина $c = \sum_{i=1}^5 c_i \cdot \frac{\rho_i}{\rho}$ представляет собой удельную теплоемкость газовой смеси, где c_i - удельная теплоемкость ее i -го компонента.

Скорость химической реакции J представим в виде [8]:

$$J = \rho \frac{A}{\tau} \min \left(C_1, \frac{C_2 \mu_1}{|n_2| \mu_2}, \frac{C_3 \mu_1}{n_3 \mu_3}, \frac{C_4 \mu_1}{n_4 \mu_4} \right). \quad (3)$$

Здесь τ - время турбулентного перемешивания;

A - эмпирическая постоянная.

При этом скорость горения определяется минимальной концентрацией компонентов газовой смеси, участвующих в химической реакции.

Скорости реакции горения от температуры непосредственно не приводятся. При этом ее увеличение с ростом температуры осуществляется за счет увеличения концентрации продуктов сгорания (C_3 и C_4), входящих в данное уравнение.

Тепломассообмен в газовой смеси при горении осуществляется за счет турбулентного перемешивания компонентов.

Следовательно, эти процессы должны описываться некоторыми моделями турбулентного переноса, такими как $k\varepsilon$ - или $k\omega$ -модели [9].

В данной работе для упрощенного анализа теплопередачи в установившемся процессе горения коэффициенты ν , D и λ принимаются постоянными.

Уравнение теплопроводности в гидратном слое представим в виде:

$$\rho_h c_h \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_h \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

Здесь ρ_h , c_h и λ_h - соответственно плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности газогидрата.

Кроме того, систему уравнений (1)-(4) необходимо дополнить условиями баланса массы и тепла на границе фазового перехода $x = x_{(s)}$ между поверхностью газогидрата и газовой смеси.

Из закона сохранения массы, записанного для всей системы «газогидрат - газовая смесь», следует:

$$v_{(s)} = \dot{x}_{(s)} \left(1 - \frac{\rho_h}{\rho_{(s)}} \right) \quad (5)$$

Здесь $\dot{x}_{(s)} = \frac{dx_{(s)}}{dt}$ - скорость движения границы $x = x_{(s)}$;

нижний индекс s соответствует значениям параметров на данной границе.

Учитывая, что массовое содержание газа в составе гидрата равно G (воды, соответственно, $1 - G$) из закона сохранения массы для воды и метана можно получить:

$$\begin{aligned} \rho_{(s)} D \frac{\partial C_4}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= \rho_h \left((1-G) - C_{4(s)} \right) \dot{x}_{(s)} \\ \rho_{(s)} D \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= \rho_h \left(G - C_{1(s)} \right) \dot{x}_{(s)} \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогичным образом можно записать соотношения для кислорода, диоксида углерода и азота:

$$\rho_{(s)} D \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} = -\rho_h C_{2(s)} \dot{x}_{(s)}$$

$$\begin{aligned} \rho_{(s)} D \frac{\partial C_3}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= -\rho_h C_{3(s)} \dot{x}_{(s)} \\ \rho_{(s)} D \frac{\partial C_5}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= -\rho_h C_{5(s)} \dot{x}_{(s)} \end{aligned} \quad (7)$$

Кроме того, запишем условия отсутствия скачка температур и баланса тепла на границе $z = z_{(s)}$ как:

$$\begin{aligned} T^{(-)} &= T^{(+)} = T_{(s)} \\ -\lambda_h \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}}^- + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}}^+ &= (\rho_h l_h + (1-G) \rho_w l_w) \dot{x}_{(s)} \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь ρ_h и ρ_w - соответственно плотности гидрата и воды;

l_h и l_w - соответственно удельные теплоты разложения гидрата и парообразования.

При этом знаки (-) и (+) означают, что значения параметров соответствуют газогидрату и газовой смеси. Отметим, что, поскольку вода, выделившаяся при разложении газогидрата, сразу переходит в состояние пара, уравнение баланса тепла записано с учетом затрат на разложение газогидрата и на испарение воды.

Кроме того, на границе $x = x_{(s)}$ парциальное давление пара $p_{4(s)}$ и температура $T_{(s)}$ удовлетворяют уравнению Клапейрона-Клаузиуса, которая может быть записана как [7]:

$$p_{4(s)} = p_* \exp(-T_* / T_s) \quad (9)$$

Положим, что на этой границе для пара выполняется уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$p_{4(s)} = \rho_{4(s)} R_4 T_{(s)}, \quad (R_4 = R_g / \mu_4) \quad (10)$$

Уравнение состояния для всей газовой смеси на этой же границе в виде:

$$p = \rho_{(s)} R_{(s)} T_{(s)} \cdot (R_{(s)} = R_g \sum_{i=1}^5 \frac{C_{i(s)}}{\mu_i}). \quad (11)$$

Разделив (10) на (11), получим уравнение, связывающее массовую концентрацию пара $C_{4(s)}$ с температурой $T_{(s)}$ и давлением в смеси в целом:

$$p_{4(s)} = p C_{4(s)} R_4 / R_{(s)}. \quad (12)$$

Начальные условия ($t = 0$) представим в виде:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq a_0: \quad T &= T_{h0}; \\ a_0 < x \leq L: \quad T &= T_{g0}, \\ p &= p_0, \quad v = 0, \\ C_i &= C_{i0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Условия на границах замкнутого объема ($x = 0$ и $x = L$) для $t > 0$ представим в виде:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \\ (i = 1, \dots, 5). \end{aligned} \quad (14)$$

Полученная система уравнений (1)-(14) является замкнутой. Для ее решения используется метод крупных частиц.

Анализ результатов расчетов

Для воспламенения гидрата некоторое количество тепла должно выделяться вблизи поверхности гидрата. В качестве источника тепла может быть использован ближний слой газовой смеси толщиной h ($a_0 < x \leq a_0 + h$), содержащий газообразный метан. Начальная массовая концентрация $C_{1,10}$ для метана в этой области выбирается в интервале горения воздушной смеси. Толщина слоя h определяет начальную массу метана и, следовательно, энергию воспламенения.

В первом приближении значения коэффициента переноса берутся для молекулярного переноса. Однако при горении акти-

вируется конвективный поток газа, вызванный разницей температур и давлений между областью пламени и областью окружающего газа. За этим следует генерация турбулентных вихрей.

Модели турбулентного переноса предполагают, что значения переменных коэффициентов переноса массы, импульса и теплоты приблизительно равны $D = \nu = \lambda / \rho c$. Это соответствует числу Льюиса и числу Прандтля $Le = Pr = 1$. Поэтому в нашем численном моделировании мы использовали постоянные коэффициенты переноса, значения которых варьировались, начиная с коэффициентов молекулярного переноса и заканчивая коэффициентами турбулентного переноса в диапазоне от 0,001 до 1 м²/с. Это позволяет анализировать эволюцию турбулентного переноса без усложнения моделирования турбулентности.

Следует отметить, что в дальней области газовой смеси ($a_0 + h < x \leq L$) в начальный момент времени метан отсутствует, т.е. $C_{1,20} = 0$.

Численное исследование процесса горения гидрата метана, основанное на методе крупных частиц [10], осуществлялось при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} L &= 1 \text{ м}, \quad a_0 = 0,05 \text{ м}, \quad h = 0,02 \text{ м}, \\ T_{h0} &= 280 \text{ К}, \quad T_{g0} = 300 \text{ К}, \quad p_0 = 105 \text{ Па}, \\ c_1 &= 913 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad c_2 = 837 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_3 &= 1146 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad c_4 = 2020 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_5 &= 2483 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad c_h = 2000 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ \lambda &= 0,0469 \text{ Вт/(м·К)}, \quad \lambda_h = 0,45 \text{ Вт/(м·К)}, \\ R_g &= 8,31 \text{ Дж/(моль·К)}, \\ \mu_1 &= 0,032 \text{ кг/моль}, \quad \mu_2 = 0,044 \text{ кг/моль}, \\ \mu_3 &= 0,028 \text{ кг/моль}, \quad \mu_4 = 0,018 \text{ кг/моль}, \\ \mu_5 &= 0,016 \text{ кг/моль}, \quad T^* = 4616 \text{ К}, \\ p^* &= 27542 \text{ МПа}, \quad \rho_h = 900 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_w &= 1000 \text{ кг/м}^3, \quad G = 0,12, \\ l_h &= 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}, \quad l_w = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \\ A &= 4, \quad \tau = 10^{-4} \text{ с}. \end{aligned}$$

Удельная теплота горения метана предполагалась равной $r = 50$ МДж/кг.

Для начальных значений объемных концентраций компонентов газовой смеси приняты следующие значения: $C_{1,0} = 0,05$, $C_{2,0} = 0,2$, $C_{3,0} = 0,01$, $C_{4,0} = 0,01$, $C_{5,0} = 0,78$.

На рисунке 2 представлено моделирование процесса горения газогидрата с коэффициентами переноса в газовой смеси, соответствующими турбулентному перемешиванию $D = v = \lambda/\rho c = 0,001; 0,01; 0,1; 1,0 \text{ м}^2/\text{с}$.

Из рисунка 2 следует, что результаты расчета со значением $D = v = \lambda/\rho c = 0,001 \text{ м}^2/\text{с}$ аналогичны ре-

зультатам, соответствующим коэффициентам молекулярного переноса $D = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

При значении $D = v = \lambda/\rho c = 0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ наблюдается устойчивое горение, и максимальная температура газа поддерживается приблизительно постоянной на уровне 900 К.

При значениях $D = v = \lambda/\rho c = 0,1$ и $1,0 \text{ м}^2/\text{с}$ извлечение метана происходит настолько интенсивно, что общее значение кислорода в расчетной области расходует в течение 7,8 и 0,8 с соответственно (рисунок 3).

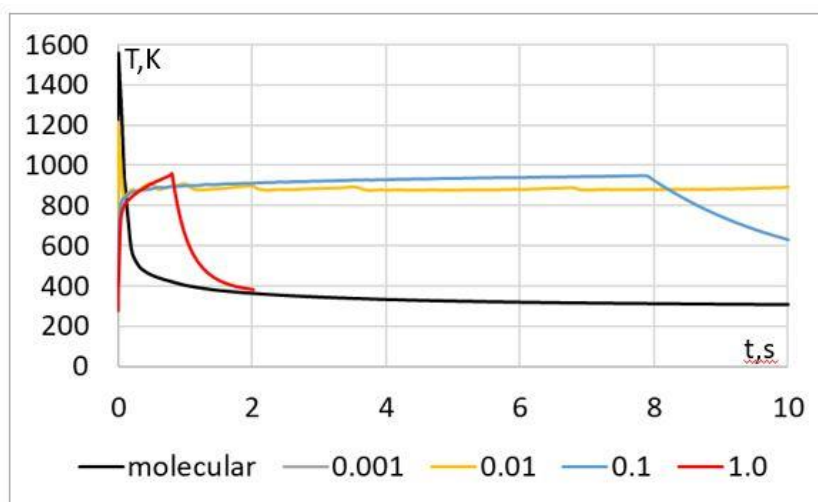


Рисунок 2. Эволюция максимальной температуры в газовой смеси при различных значениях коэффициента переноса $D = v = \lambda/\rho c = 0,001; 0,01; 0,1; 1,0 \text{ м}^2/\text{с}$

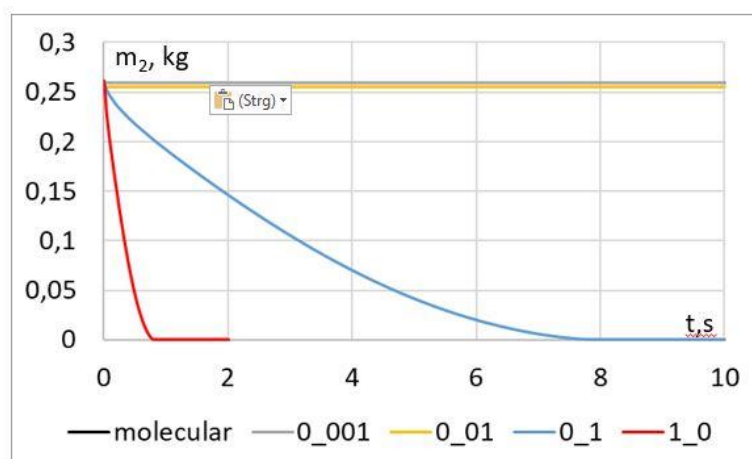


Рисунок 3. Эволюция общей массы кислорода в газовой смеси при различных значениях коэффициента переноса $D = v = \lambda/\rho c = 0,001; 0,01; 0,1; 1,0 \text{ м}^2/\text{с}$

Таким образом, результаты моделирования показывают, что увеличение коэффициентов переноса выше значения $0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ позволяет добиться устойчивого горения гидрата метана. В реальном горении это увеличение вызвано динамикой пламени из-за повышения температуры с последующим образованием турбулентных вихрей.

Процесс горения может быть продолжен, если будет обеспечен дополнительный перенос кислорода в пламя. Этот случай моделируется более высокой начальной кон-

центрацией кислорода в газовой смеси. Для моделирования принято объемное содержание кислорода в газовой смеси 20 %, 30 % и 40 % с коэффициентами переноса $D = \nu = \lambda/\rho c = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ (рисунок 4, а). Были найдены значения времени горения 7,8; 8,6 и 9,5 с соответственно. После тушения пламени температура снижается, вызванная теплопередачей из области пламени в гидрат и в другую газовую область. Давление газа (рисунок 4, б) увеличивается и уменьшается пропорционально температуре.

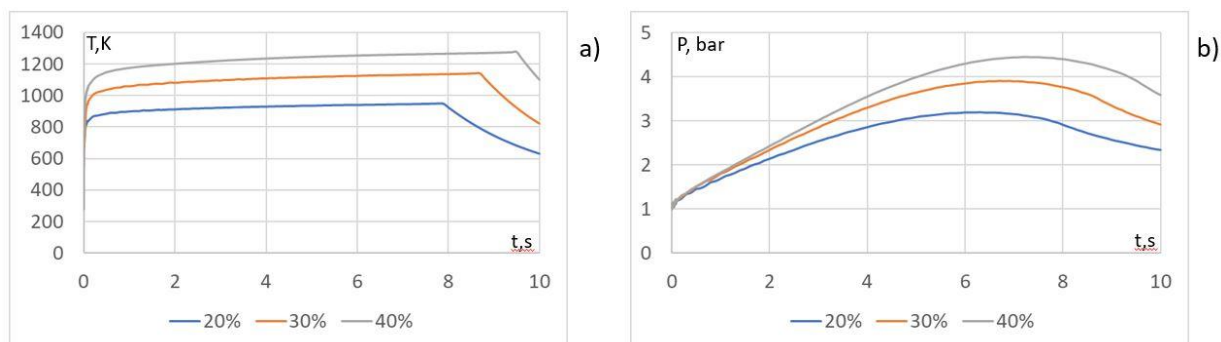


Рисунок 4. Максимальная температура (а) и максимальное давление (б) в газовой смеси при горении гидрата для $D = \nu = \lambda/\rho c = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$

Выводы

Рассмотрен случай, когда газовая область, окружающая гидрат, разделена на две области. При этом ближняя область, примыкающая к гидрату, содержит горючее (метан) и окислитель для инициирования процесса горения; в дальней области горючее отсутствует. Представленная система основных уравнений включает в себя уравнения импульсов, сохранения масс для всей газовой смеси, а также для каждого ее компонента; уравнения притока тепла (для газогидрата и газовой смеси). Кроме того, представленная

система уравнений дополнена условиями баланса масс и тепла на границе разложения газогидрата, а также начальными условиями и условиями на границах замкнутого объема. Решение представленной системы осуществлено методом крупных частиц. На основе численных решений установлено, что при низких значениях коэффициентов переноса наблюдается устойчивое горение и максимальная температура газа поддерживается приблизительно постоянной на уровне 900 К. При высоких значениях коэффициентов переноса быстрота разложения гидрата увели-

чивается. Вследствие этого интенсивность горения метана увеличивается, что приводит к быстрому израсходованию кислорода и, как следствие, прекращению процесса горения. Установлено, что с увеличением исходной концентрации кислорода время горения, как

и максимальное давление в объеме увеличиваются.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00526.

Список литературы

1. Cranganu C. In-Situ Thermal Stimulation Of Gas Hydrates // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. Vol. 65. Issue 1-2. P. 76-80. DOI: 10.1016/j.petrol.2008.12.028.
2. Nakroyakov V.E, Misyura S.Y., Elistratov S.L., Manakov A.Y., Sizikov A.A. Methane Combustion in Hydrate Systems: Water-Methane and Water-Methane- Isopropanol // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2013. Vol. 22. No. 3. P. 169-173. DOI: 10.1134/S1810232813030016.
3. Roshandell M., Santacana-Vall J., Karnani S., Botimer J., Taborek P., Dunn-Rankin D. Burning Ice-Direct Combustion of Methane Clathrates // *Combustion Science and Technology*. 2016. Vol. 188. No. 11-12. P. 2137-2148. DOI: 10.1080/00102202.2016.1211874.
4. Kitamura Y., Nakajo K., Ueda T. Numerical Calculation of a Diffusion Flame Formed in the Laminar Boundary Layer over Methane-Hydrate // *Gas Hydrate: Materials of the 4-th International Conference*. Yokohama, Japan. 2002. Vol. 4. P. 1055-1058.
5. Maruyama Y., Fuse M.J., Yokomori T., Ohmura R., Watanabe Sh., Iwasaki T., Iwabuchi W., Ueda T. Experimental Investigation of Flame Spreading over Pure Methane Hydrate in a Laminar Boundary Layer // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2013. Vol. 34. Issue 2. P. 2131-2138. DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.179.
6. Nakamura Y., Katsuki R., Yokomori T., Ohmura R., Takahashi M., Iwasaki T., Uchida K., Ueda T. Combustion Characteristics of Methane Hydrate in a Laminar Boundary Layer // *Energy Fuels*. 2009. Vol. 23. P. 1445-1449. DOI: 10.1021/ef800814f.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред: В 2 Ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
8. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Modelling of Turbulent combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion // *Symposium (International) on Combustion*. 1977. Vol. 16. Issue 1. P. 719-729. DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80366-4.
9. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Cañada Flintridge: DCW Industries, 1998. 540 p.
10. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.

References

1. Cranganu C. In-Situ Thermal Stimulation Of Gas Hydrates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, Vol. 65, Issue 1-2, pp. 76-80. DOI: 10.1016/j.petrol.2008.12.028.
2. Nakroyakov V.E, Misyura S.Y., Elistratov S.L., Manakov A.Y., Sizikov A.A. Methane Combustion in Hydrate Systems: Water-Methane and Water-Methane- Isopropanol. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, Vol. 22, No. 3, pp. 169-173. DOI: 10.1134/S1810232813030016.
3. Roshandell M., Santacana-Vall J., Karnani S., Botimer J., Taborek P., Dunn-Rankin D. Burning Ice-Direct Combustion of Methane Clathrates. *Combustion Science and Technology*, 2016, Vol. 188, No. 11-12, pp. 2137-2148. DOI: 10.1080/00102202.2016.1211874.
4. Kitamura Y., Nakajo K., Ueda T. Numerical Calculation of a Diffusion Flame Formed in the Laminar Boundary Layer over Methane-Hydrate. *Materials of the 4-th International Conference «Gas Hydrate»*. Yokohama, Japan, 2002, Vol. 4, pp. 1055-1058.
5. Maruyama Y., Fuse M.J., Yokomori T., Ohmura R., Watanabe Sh., Iwasaki T., Iwabuchi W., Ueda T. Experimental Investigation of Flame Spreading over Pure Methane Hydrate in a Laminar Boundary Layer. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, Vol. 34, Issue 2, pp. 2131-2138. DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.179.
6. Nakamura Y., Katsuki R., Yokomori T., Ohmura R., Takahashi M., Iwasaki T., Uchida K., Ueda T. Combustion Characteristics of Methane Hydrate in a Laminar Boundary Layer. *Energy Fuels*, 2009, Vol. 23, pp. 1445-1449. DOI: 10.1021/ef800814f.
7. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred: V 2 Ch.* [Dynamics of Multiphase Media: In 2 Parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Part 1. 464 p. [in Russian].
8. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Modelling of Turbulent combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 1977, Vol. 16, Issue 1, pp. 719-729. DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80366-4.
9. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Cañada Flintridge, DCW Industries, 1998. 540 p.
10. Belotserkovskii O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoi dinamike* [Coarse Particle Method in Gas Dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 392 p. [in Russian].

Авторы

• Столповский Максим Владимирович, канд.
физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-14
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

• Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р
физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-56
e-mail: changelina@rambler.ru

• Давлетшина Миляуша Рафаэлевна, канд.
физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-56
e-mail: davletshina@yandex.ru

The Authors

• Stolpovsky Maxim V., Candidate of Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-14
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

• Chiglintseva Angelina S., Doctor Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-56
e-mail: changelina@rambler.ru

• Davletshina Milyausha R., Candidate of Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-56
e-mail: davletshina@yandex.ru