

**Тема: Разработка технологии
разложения газовых гидратов в
пористых средах**
**Направление: Комплексная переработка
сырья**

Руководитель: Мухамбетжанов С.Т. – д.ф.-м.н.

Организация соисполнитель: БашНИПИнефть

Предполагаемая сумма финансирования: 270 млн. т.

нагрева за счет теплопроводности и конвекции. Все вышесказанное повышает уровень требований к теоретическим построениям, которые должны детально учитывать движения многофазных смесей в пластах, внешнее воздействие, кинетические, тепло- и электрофизические особенности разложения и образования гидратов и которые могут быть основой при компьютерном моделировании процесса эксплуатации месторождений газовых гидратов. В настоящее время наблюдается передвижение основных зон добычи углеводородного сырья к прибрежным участкам Мирового океана. источником экологических катастроф. Об этом свидетельствуют недавние аварии в Мексиканском заливе и на шельфе Охотского моря. Наиболее простой способ получения гидрата – барботаж пузырьков в объеме воды. Причем известно, что процесс образования гидратов можно значительно усилить волновыми воздействиями, введением различных ингибиторов. Для создания технологий синтеза гидратов с целью последующей консервации природного метана необходима теоретическая проработка возникающих при этом вопросов и изучение особенностей протекающих при этом процессов. Основными научными результатами предлагаемого проекта представляются получение новых научных данных о разложении и образовании газогидратов в природе и технологиях, теоретическое обоснование принципов и путей разработки газогидратных месторождений, исследование особенностей транспорта и хранения углеводородного газа в газогидратном состоянии.

АВАРИЯ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ 20 АПРЕЛЯ 2010 Г.



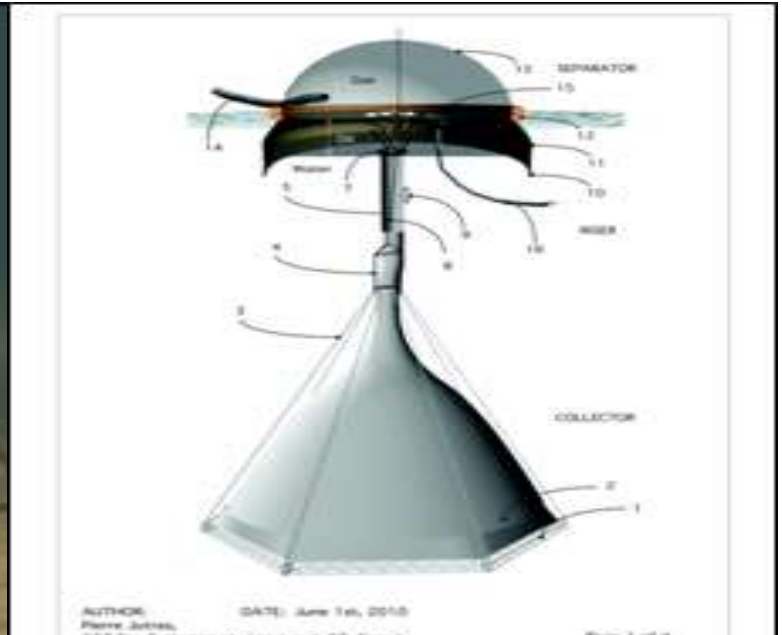
газовых потоков в океане, сопровождаемого образованием и разложением газогидратов, и процесса разложения метастабильных газовых гидратов.

Предлагаемые методы и подходы. Теоретические и прикладные исследования предполагается выполнить методами механики многофазных систем и вычислительной математики. При построении и развитии математических моделей будут использованы подходы механики гетерогенных сред, верификация разрабатываемых моделей и определение модельных констант будет осуществляться на основе сравнения и анализа теоретических решений с имеющимися в литературе опытными данными. Значительная часть работ будет связана с численным моделированием исследуемых процессов. Предлагаемые методы и подходы по всем вопросам не уступают мировому уровню.

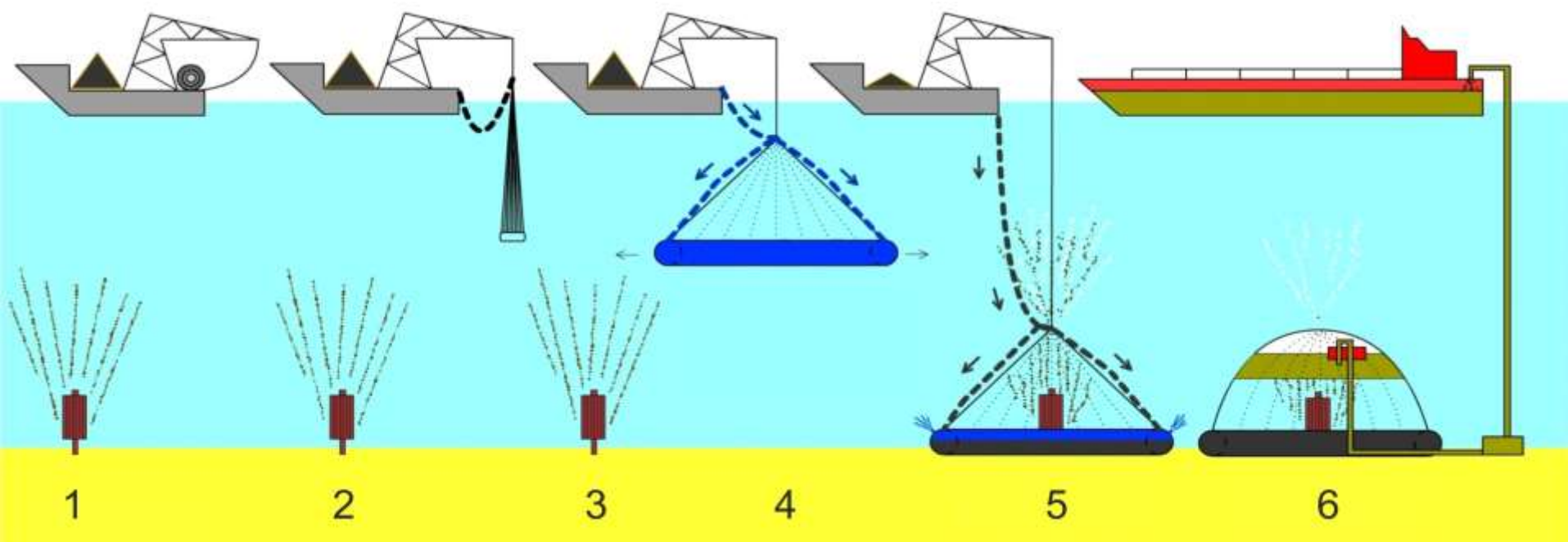
приближений. По результатам работы будет подготовлено не менее четырёх журнальных статей.

2 год. 1. Создание программных продуктов на основе математической модели миграции отдельных газовых пузырьков и системы пузырьков в термобарических условиях образования гидратов, проведение вычислительных экспериментов; 2. Разработка программных продуктов и проведение расчетов процесса распространения нелинейных волн в воде с пузырьками метана в условиях гидратообразования. 3. Численное исследование процесса эксплуатации газогидратного месторождения в условиях теплового взаимодействия с окружающим горным массивом. 4. Создание программных продуктов и расчетов технологических параметров нагрева газогидратных пластов ВЧ электромагнитными волнами. 5. Создание программных продуктов, проведение численного исследования для модели установки «купола-сепаратора» для сбора газогидратных систем в случае аварий скважин и подводных трубопроводов. 6. Создание на основе математической модели взаимодействия тёплой воды и гидратного массива в режимах вынужденной и гравитационной конвекции программных продуктов, проведение вычислительных экспериментов. 7. Численное исследование процесса разложения гидрата в простых пластах при закачке газа и жидких радиоактивных отходов в двумерном приближении. Планируется подготовка не менее пяти статей для публикации в журналах.

Использование купольных технологий при разливах



Процесс установки купола-сепаратора



Динамика многофазной затопленной струи

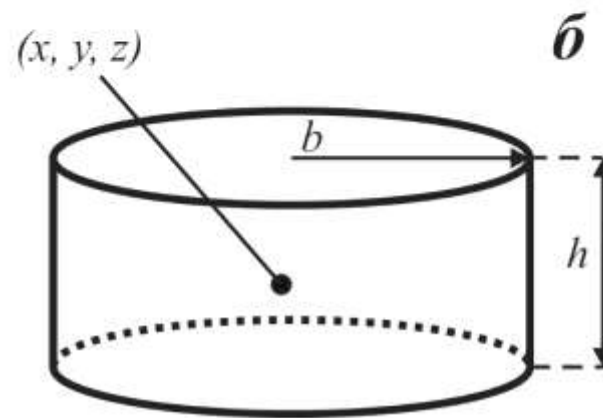
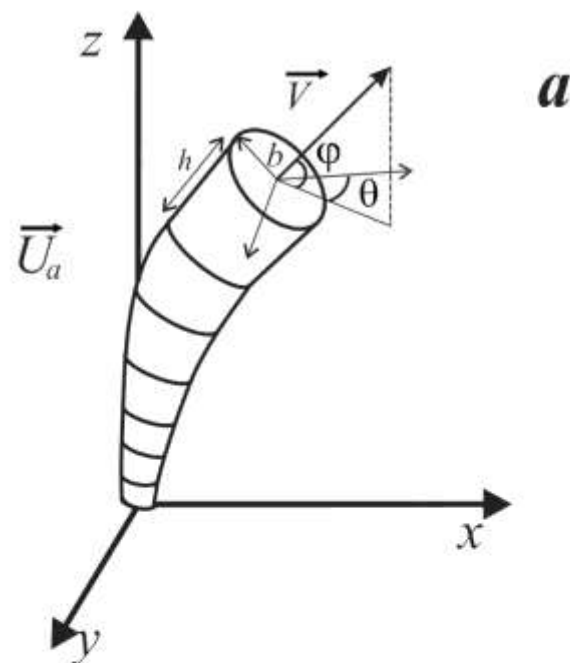
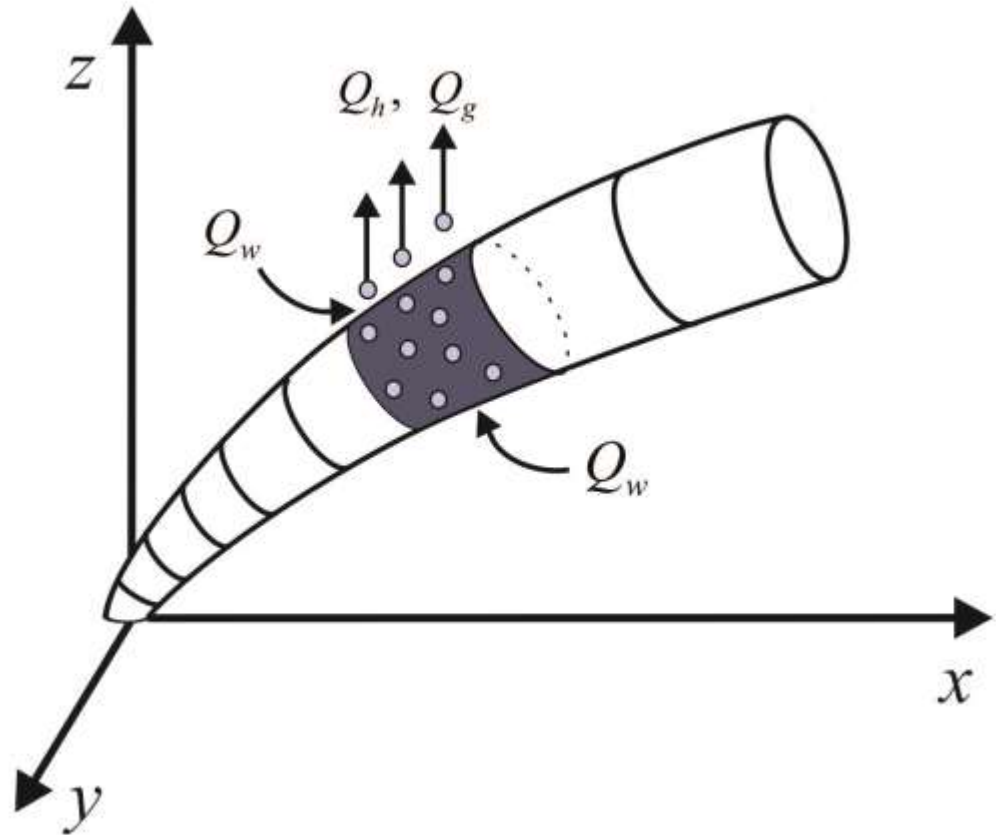


Схема разбиения затопленной струи на контрольные объемы (а),
схема контрольного объема (б)

Основные уравнения

Уравнение сохранения масс

$$\begin{aligned}\frac{dm_w}{dt} &= \rho_w Q_w - J_w^h, \\ \frac{dm_g}{dt} &= -J_g^h - \rho_g Q_g, \\ \frac{dm_o}{dt} &= 0, \\ \frac{dm_h}{dt} &= J_h - \rho_h Q_h.\end{aligned}\quad (1)$$

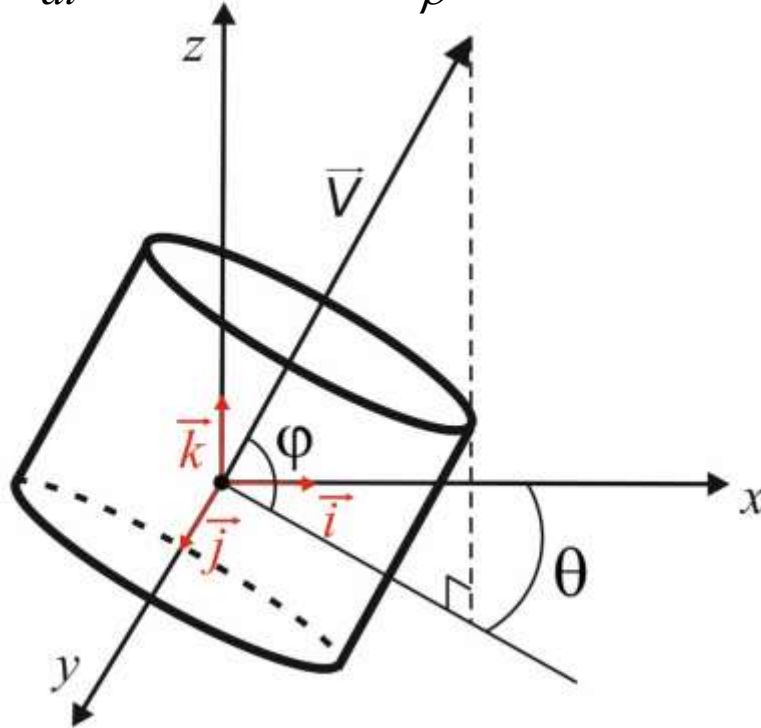


Нижние индексы o, g, h, w соответственно относятся к нефти, газу, гидрату и воде

Основные уравнения

Уравнения импульсов для контрольного объема

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = \vec{V}_a \rho_w Q_w + m \frac{\Delta \rho}{\rho} g \vec{k} - \rho 2\pi b h C_D^b \left(|\vec{V}| - V_a' \right)^2 \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} - \rho_w \pi b^2 C_D^s \left(|\vec{V}| - V_a' \right)^2 \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}, \quad (2)$$



$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k},$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2},$$

$$V_1 = (u^2 + v^2)^{1/2},$$

$$\sin \phi = \left(\frac{w}{V} \right), \quad \cos \phi = \left(\frac{V_1}{V} \right),$$

$$\sin \theta = \left(\frac{v}{V_1} \right), \quad \cos \theta = \left(\frac{u}{V_1} \right),$$

Уравнение сохранения энергии в контрольном объеме

$$\frac{d}{dt}(cmT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L \quad (3)$$

Вовлечение воды в струю

Вовлечение окружающей жидкости в контрольный объем

$$Q_w = Q_s + Q_f \quad (4)$$

$$Q_s = 2\pi b h \alpha \left| \|\vec{V}\| - V_a' \right|, \quad \alpha = \sqrt{2} \left(0.057 + \frac{0.554 \sin \varphi}{F^2} \right) \left(1 + 5 \frac{V_a'}{\left| \|\vec{V}\| - V_a' \right|} \right)^{-1}$$

$$F = E \left(\left| \|\vec{V}\| - V_a' \right| \right) / \left(g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} b \right)^{1/2}$$

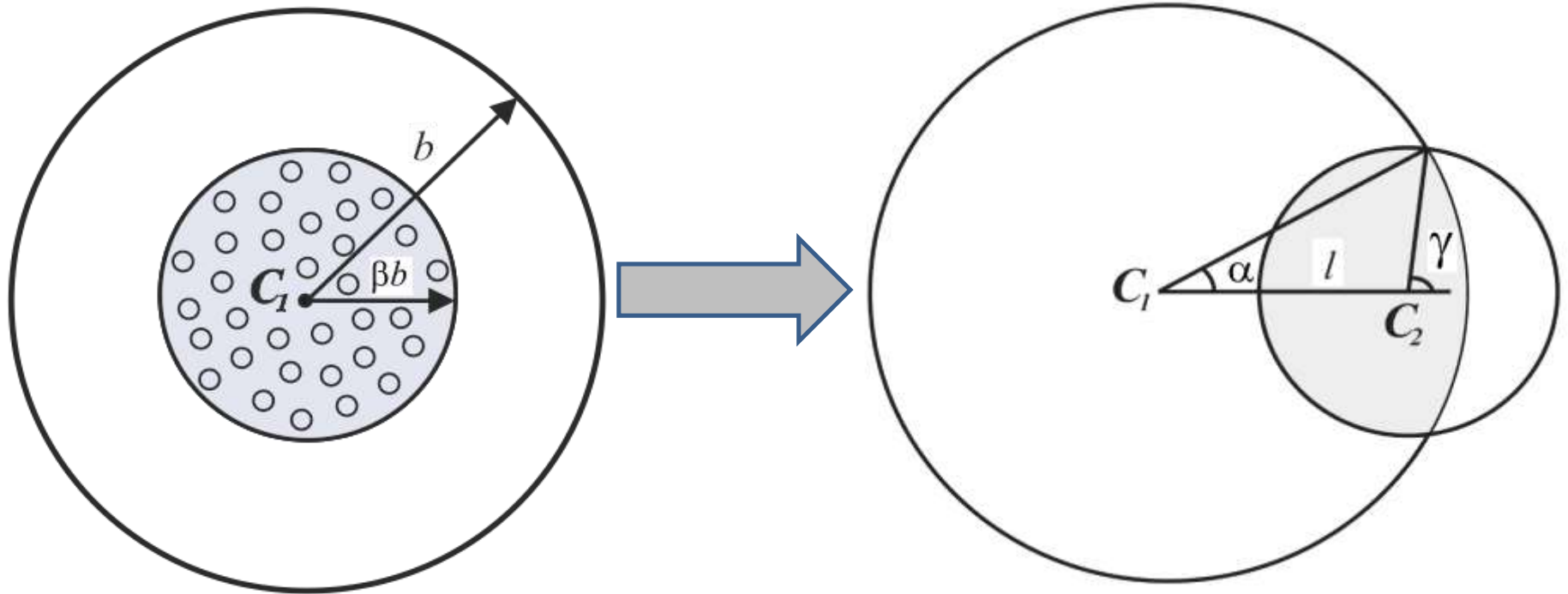
$$Q_f = \sqrt{Q_{fx}^2 + Q_{fy}^2 + Q_{fz}^2}$$

$$Q_{fx} = |U_a| \left[\pi b \Delta b |\cos \varphi \cos \theta| + 2b \Delta s \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \theta} + \frac{\pi b^2}{2} |\Delta (\cos \varphi \cos \theta)| \right]$$

$$Q_{fy} = |V_a| \left[\pi b \Delta b |\cos \varphi \sin \theta| + 2b \Delta s \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \sin^2 \theta} + \frac{\pi b^2}{2} |\Delta (\cos \varphi \sin \theta)| \right]$$

$$Q_{fz} = |W_a| \left[\pi b \Delta b |\sin \varphi| + 2b \Delta s (\cos \varphi) + \frac{\pi b^2}{2} |\Delta (\sin \varphi)| \right]$$

Отделение пузырьков от струи

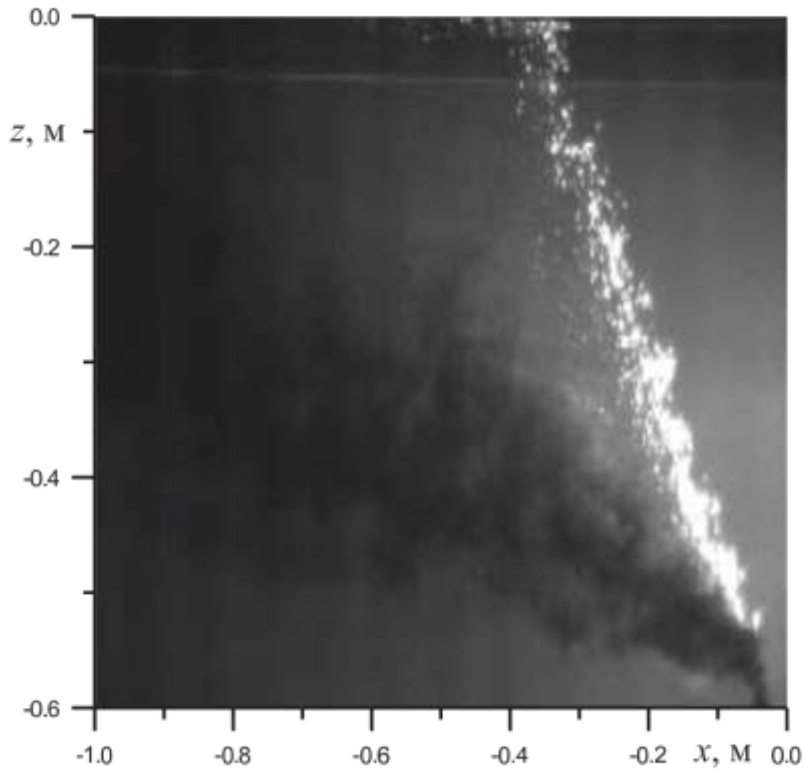


$$\frac{dl}{dt} = (w_b - w) \cos \varphi, \quad b(1 - \beta) < l < b(1 + \beta),$$

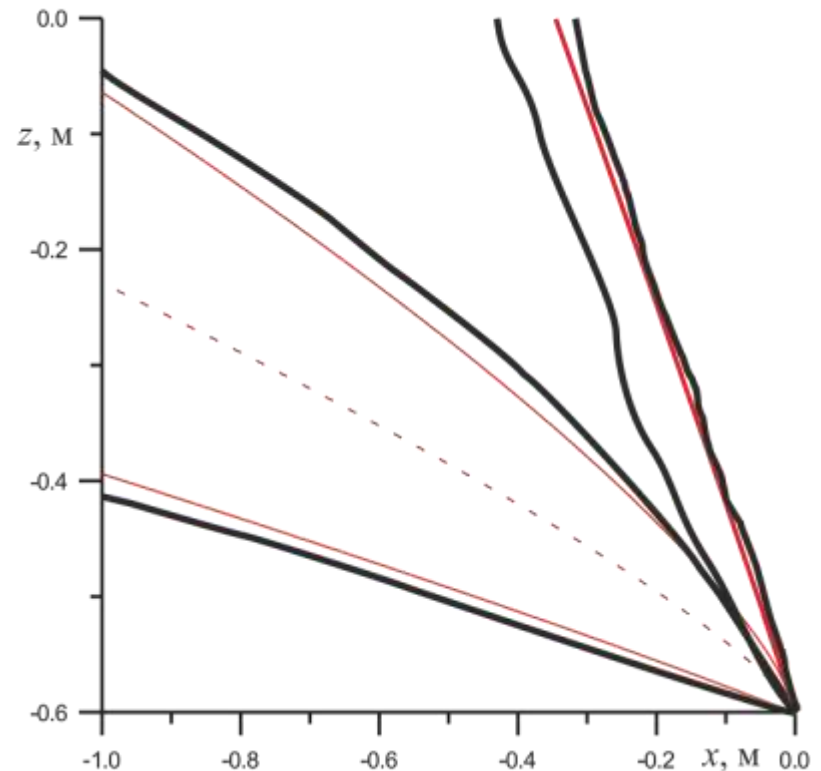
$$\sigma = \frac{S_{bi}}{S_0}, \quad f = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}}, \quad N_i = f N_{i-1} \frac{\tau_i}{\tau_{i-1}}, \quad \tau_i = \frac{h}{V + w_b \sin \phi}$$

Эксперимент и модель КО

$$Q_g^e = 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}, Q_o^e = 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}, T^e = 80^\circ\text{C}, T_w = 4^\circ\text{C}, R = 1.25 \text{ см}$$



Траектория распространения струи, эксперимент:
черным обозначена нефть, белым – газ.

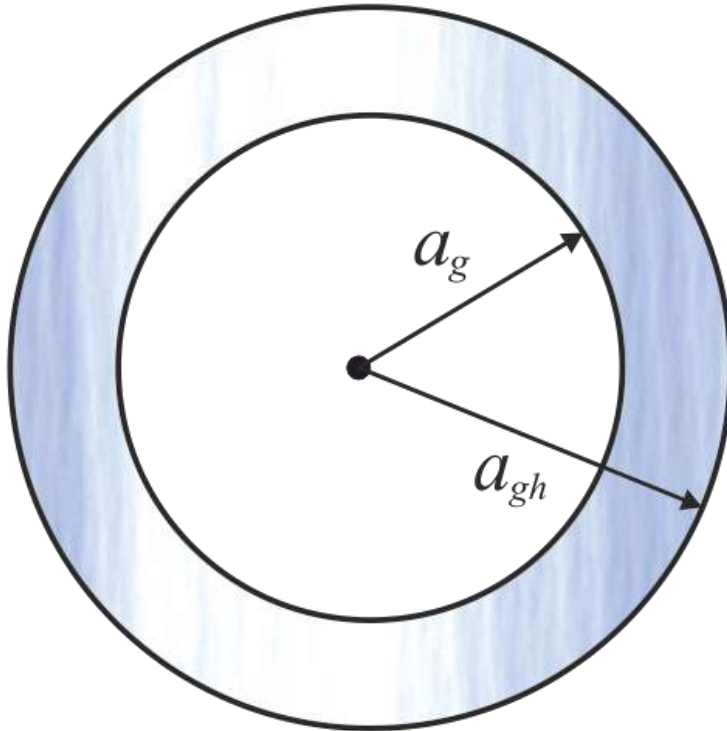


Траектория распространения струи,
эксперимент и расчеты согласно модели

— эксперимент
— модель

S.A. Socolofsky, A. Leos-Urbel, E.E Adams // Draft Final Report: exploratory experiments with droplet plumes in a crossflow (1999)

Процесс гидратообразования



$$\frac{dm_{gh}}{dt} = 4\pi a_{gh}^2 j_l, \quad m_{gh} = m_g + m_h,$$

$$m_g = \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g, \quad m_h = \frac{4}{3}\pi a_h^3 \rho_h,$$

$$\frac{d(w(m_{gh} + \mu_{gh}))}{dt} = f_A + f_T + f_C,$$

$$f_A = \frac{4}{3}\pi a_{gh}^3 \rho_l^0 g,$$

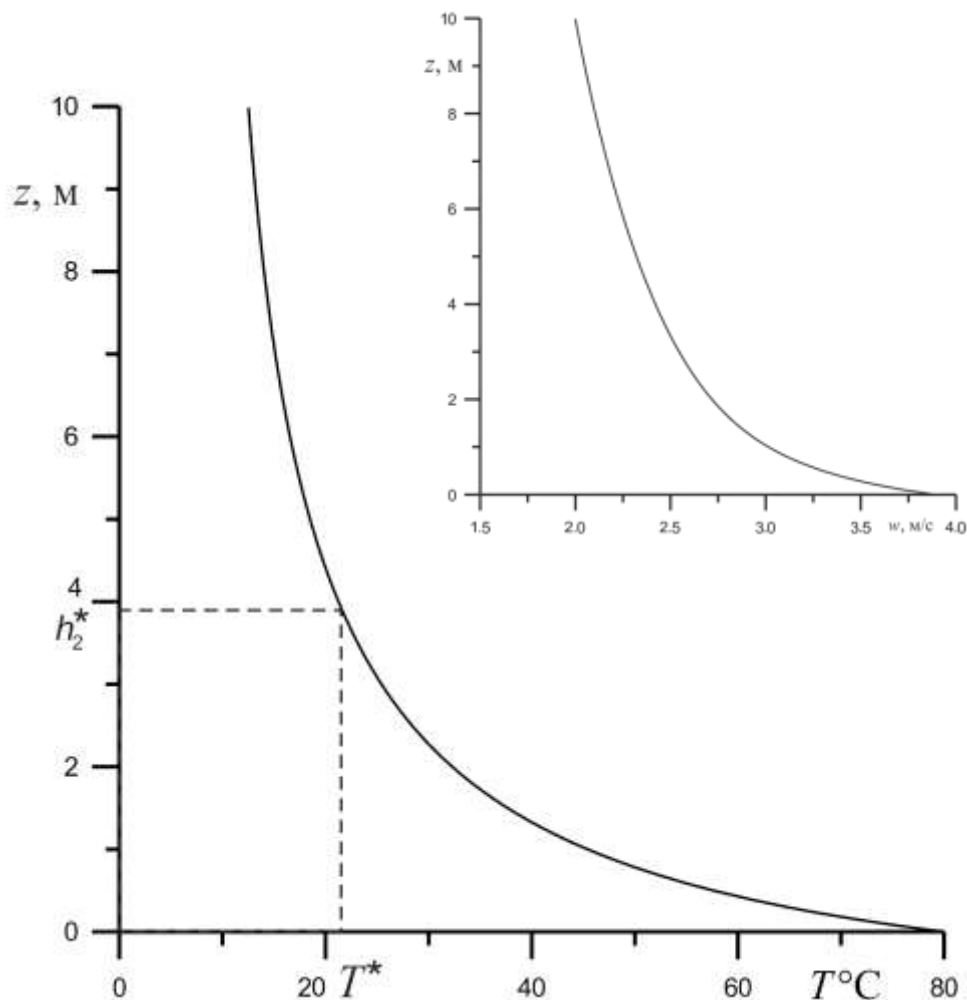
$$f_T = \frac{4}{3}\pi \left((a_{gh}^3 - a_g^3) \rho_h^0 + a_g^3 \rho_g \right) g,$$

$$f_C = \xi \pi a_{gh}^2 \frac{\rho_l^0 w^2}{2},$$

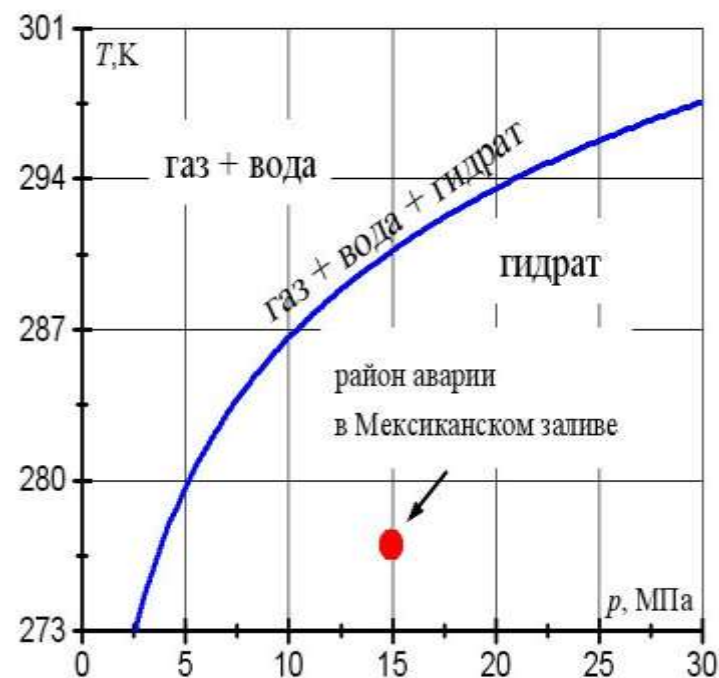
$$m_{gh} = \frac{4}{3}\pi (a_{gh}^3 - a_g^3) \rho_h^0 + \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g, \quad \mu_{gh} = \frac{2}{3}\pi a_{gh}^3 \rho_l^0, \quad m_g = \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g, \quad m_h = \frac{4}{3}\pi a_h^3 \rho_h,$$

$$\xi = \frac{12}{\text{Re}} (1 + 0.0811 \text{Re}^{0.879}), \quad \text{Re} = \frac{a_{gh} \rho_l^0 w}{\mu_l}, \quad j_g = \frac{G}{(1-G)} j_l, \quad j_l = \frac{-D_h^* \rho_l^0}{\left(\frac{1}{a_{gh}} - \frac{1}{a_g} \right) a_g^2}$$

Распределение температуры по высоте струи



Условия образования и разложения гидрата



Зависимость температуры и скорости струи от Z

Математическая модель наполнения нефти и газа в куполе, наполненном теплым дизелем (солядкой)

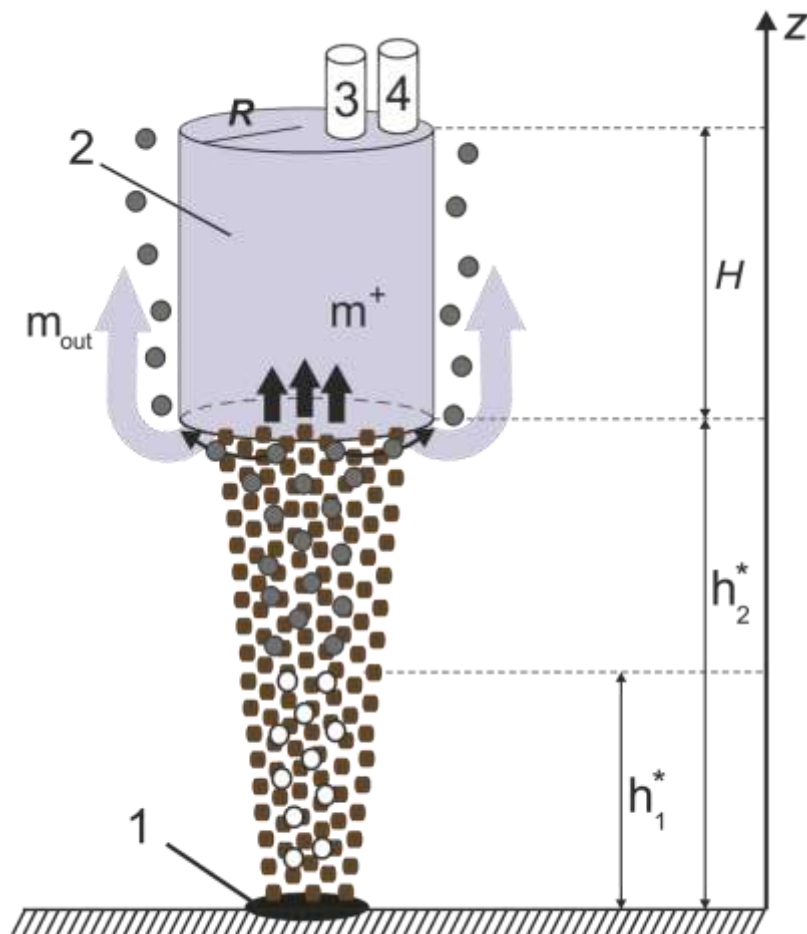


Схема купола:

1 – источник истечения

углеводородов,

2 – купол,

3 – трубка для откачки смеси,

4 – трубка для откачки газа,

h_2^* – высота, при достижении которой открывается нижнее основание купола,

h_1^* – высота, выше которой пузырьки газа покрываются гидратной коркой,

H – общая высота купола,

R – радиус купола,

m_{out} – массовый расход «вытесненной» смеси из купола,

m^+ – массовый расход «поступающей» нефти в купол .

Основные уравнения

Этап 1. Закон сохранения масс для смеси нефти и солянки:
$$\frac{dM_m}{dt} = m_o^+ - m^{out} \quad (2.1)$$

где $M_m = V_t \cdot (k_o \cdot \rho_o + (1 - k_o) \cdot \rho_d)$ – масса смеси, V_t – объем купола,
 k_o – концентрация нефти в смеси.

$$m_o^+ = Q_o^e \rho_o \quad (2.2) \quad m^{out} = Q_o^e \cdot \rho_m \quad (2.3)$$

$$\frac{dM_m}{dt} = (\rho_o - \rho_d) Q_o^e \frac{dk_o}{dt} \quad (2.4)$$

Из уравнения (2.1) с учетом (2.2), (2.3), (2.4) получим:

$$\frac{dk_o}{dt} = -\frac{Q_o^e}{V_t} [k_o + 1], \quad (2.5)$$

$$k_o = \exp\left(-\frac{Q_o^e t}{V_t}\right) - 1. \quad (2.6)$$

Закон сохранения энергии для смеси:

$$\frac{dQ_m}{dt} = c_o m^+ T_o - c_m m^{out} T_m - \pi R^2 q_{mw}, \quad Q_m = c_m T_m M_m \quad (2.7)$$

Основные уравнения

Этап 2. Уравнение для нахождения изменения координаты нижнего основания купола:

$$\frac{dz_n}{dt} = -w_0, \quad (2.8)$$

где w_0 — скорость, с которой опускается купол на этапе 2.

Для численных расчетов используем:

$$\begin{cases} \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{c_m M_m} [m_o^+ (c_o T_o - c_m T_m) - \pi R^2 q_{mw}], \\ \frac{dz_n}{dt} = -w_0 \end{cases} \quad (2.9)$$

При расчетах примем, что $h = h_2^* - w_o t$ $T_o = T_{jet}(z)$

Основные уравнения

Этап 3. Закон сохранения для смеси и газа внутри купола:

$$\frac{dM_g}{dt} = m_g^+, \quad \frac{dM_m}{dt} = m_o^+ - m_{out}, \quad (2.10)$$

Закон сохранения импульсов для пузырьков в безинерционном приближении:

$$\left(\frac{4}{3} \pi a_g^3 \rho_m - m_g^b \right) g - f = 0 \quad f = \xi \pi a_g^2 \rho_m (w_{gm})^2 / 2 \quad (2.11)$$

Скорость пузырьков газа внутри купола:

$$w_g^m = w_{gm} - w_m, \quad (2.12)$$

$$\xi = \frac{12}{Re_{gm}} \left(1 + 0,0811 (Re_{gm})^{0.879} \right), \quad Re_{gm} = \frac{2a_g \rho_m w_{gm}}{\mu_m} \quad (2.13)$$

Закон сохранения энергии для пузырька газа, попадающего в купол из струи и движущегося внутри купола:

$$\frac{dQ_g^m}{dt} = \alpha_g^m S_g^b (T_m - T_g^m), \quad Q_g^m = c_g m_g^b T_g^m \quad (2.14)$$

$$\alpha_g^m = \frac{Nu_g^m \cdot \lambda_m}{2a_g}, \quad S_g^b = 4\pi a_g^2, \quad Nu_g^m = 2 + 0.6 \cdot (Re_g^m)^{0.5} \cdot (Pr_g^m)^{0.33}, \quad (Pr_g^m) = \frac{\nu_m}{\chi_m}$$

Закон сохранения энергии для смеси (2.7):

$$\frac{dQ_m}{dt} = c_o m^+ T_o - c_m m^{out} T_m - \pi R^2 q_{mw} - N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m), \quad Q_m = c_m T_m M_m \quad (2.15)$$

$$N_g = \frac{Q_g^e (H - h_g)}{V_b w_g^m} \quad (2.16)$$

$$V_b = \frac{4}{3} \pi a^3 \quad (2.17)$$

Основные уравнения

Этап 3. Для удобства численных расчетов (2.13) и (2.14) представим в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dT_g^m}{dz} = \frac{\alpha_g^m S_g^b (T_m - T_g^m)}{w_g^m m_g^b c_g}, \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{c_m M_m} \left[m_o^+ (c_o T_o - c_m T_m) - \pi R^2 q_{mw} - N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m) \right]. \end{cases} \quad (2.18)$$

Уравнение сохранения энергии для слоя газа:

$$\frac{dQ_g}{dt} = c_g m_g^+ T_g + \pi R^2 q_{gm}, \quad Q_g = c_g T_g M_g \quad (2.19)$$

С учетом теплообмена смеси со слоем газа, уравнение сохранения энергии для смеси:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_m}{dt} &= c_o m^+ T_o - c_m m^{out} T_m - \pi R^2 q_{mw} - N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m) \\ &\quad - \pi R^2 q_{gm}, \quad Q_m = c_m T_m M_m, \end{aligned} \quad (2.20)$$

Координата раздела слоя газа и смеси:

$$\frac{dz_{gm}}{dt} = - \left(\frac{Q_g^e}{\pi R^2 (z_{gm})} \right) \quad (2.21)$$

Основные уравнения

Этап 3. Для удобства численных расчетов (2.19), (2.20) и (2.21) представим в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{c_g M_g} [\pi R^2 q_{gm}], \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{c_m M_m} [m_o^+ (c_o T_o - c_m T_m) - \pi R^2 q_{mw} - N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m) - \pi R^2 q_{gm}], \\ \frac{dz_{gm}}{dt} = - \left(\frac{Q_g^e}{\pi R^2 (z_{gm})} \right). \end{cases} \quad (2.22)$$

Этап 4. Уравнение для нахождения изменения координаты нижнего основания купола:

$$w_g^m = w_{gm} - v_1, \quad (2.23)$$

С учетом (2.23) (2.21) примет вид:

$$\frac{dz_{gm}}{dt} = - \left(\frac{Q_g^e}{\pi R^2 (z_{gm})} + v_1 \right) \quad (2.24)$$

Основные уравнения

Этап 5. Закон сохранения для смеси и газа внутри купола:

$$\frac{dM_g}{dt} = m_g^+ - m_g^-, \quad \frac{dM_m}{dt} = m_o^+ - m_m^- \quad (2.25)$$

здесь m_g^- – массовый расход откачиваемого газа через трубку в куполе,
 m_m^- – массовый расход откачиваемой смеси из купола
(для простоты положим, что $m_o^+ = m_m^-$).

Закон сохранения энергии для слоев газа и смеси:

$$\frac{dQ_g}{dt} = c_g m_g^+ T_g - c_g m_g^- T_g + \pi R^2 q_{gm}, \quad Q_g = c_g T_g M_g \quad (2.26)$$

$$\frac{dQ_m}{dt} = c_o m^+ T_o - c_m m_m^- T_m - \pi R^2 q_{mgr} - N_g \alpha_m S_g^b (T_m - T_g^m) - \pi R^2 q_{gm}, \quad (2.27)$$

$$Q_m = c_m T_m M_m$$

Для удобства численных расчетов (2.26) и (2.27) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{c_g M_g} [\pi R^2 q_{gm}], \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{c_m M_m} [m_o^+ (c_o T_o - c_m T_m) - \pi R^2 q_{mgr} - N_g \cdot \alpha_m \cdot S_g^b (T_m - T_g^m) - \pi R^2 q_{gm}]. \end{cases} \quad (2.28)$$

Тепловые потоки

Тепловой между смесью и водой, омывающей нижнее основание купола:

$$q_{mw} = \frac{\lambda_w}{\delta_{mw}} \text{Nu}_{mw} (T_m - T_w) \quad \text{Nu}_{mw} = \begin{cases} 2 < \bar{h} \leq 6, \text{Nu}_{mw} = 0,935 \frac{\text{Re}_{mw}^{0.5}}{\bar{h}^{0.11}} (1 + 0,00197 \bar{h}^{1.75} \text{Re}_{mw}^{0.24}) \text{Pr}_{mw}^{0.24} \\ 6 < \bar{h} \leq 16, \text{Nu}_{mw} = 3,06 \frac{\text{Re}_{mw}^{0.5}}{\bar{h}^{0.77}} (1 + 0,0157 \bar{h}^{0.66} \text{Re}_{mw}^{0.24}) \text{Pr}_{mw}^{0.4} \end{cases}$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности воды, Nu_{mw} – число Нуссельта,

$\text{Re}_{mw} = \frac{wD}{\nu}$ – число Рейнольдса, Pr_{mw} – число Прандтля,

ν – динамическая вязкость воды,

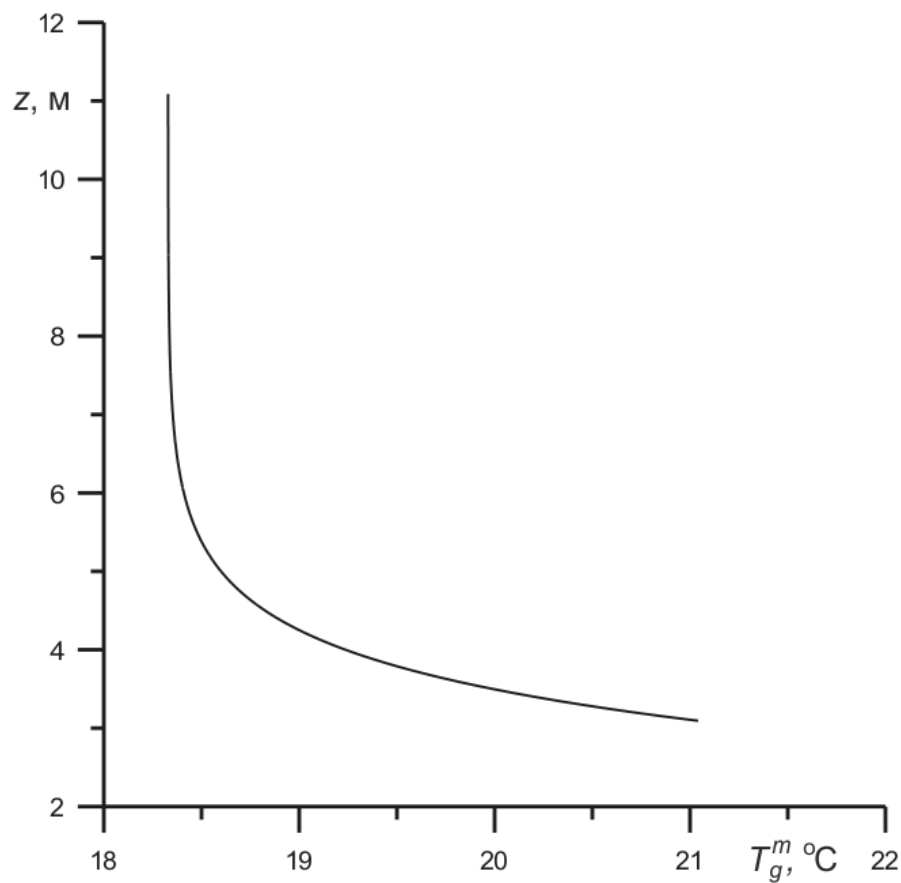
$\bar{h} = \frac{h}{D}$ – расстояние от устья скважины до основания купола.

Тепловой поток от слоя газа к слою смеси:

$$q_{gm} = \alpha_{gm} (T_m - T_g) e^{H_{gm}^2 \lambda_g \tau_g} (1 - \text{erf}(H_{gm} \sqrt{\lambda_g \tau_g}))$$

λ_g – коэффициент теплопроводности для газа, $H_{gm} = h_g/2 + h_m/2$ – сумма полутолщин слоев газа и смеси, τ_g – характерное время, отсчитываемое от момента начала накопления слоя газа t_3 , $\alpha_{gm} = \lambda_g / H_{gm}$ – коэффициент теплообмена.

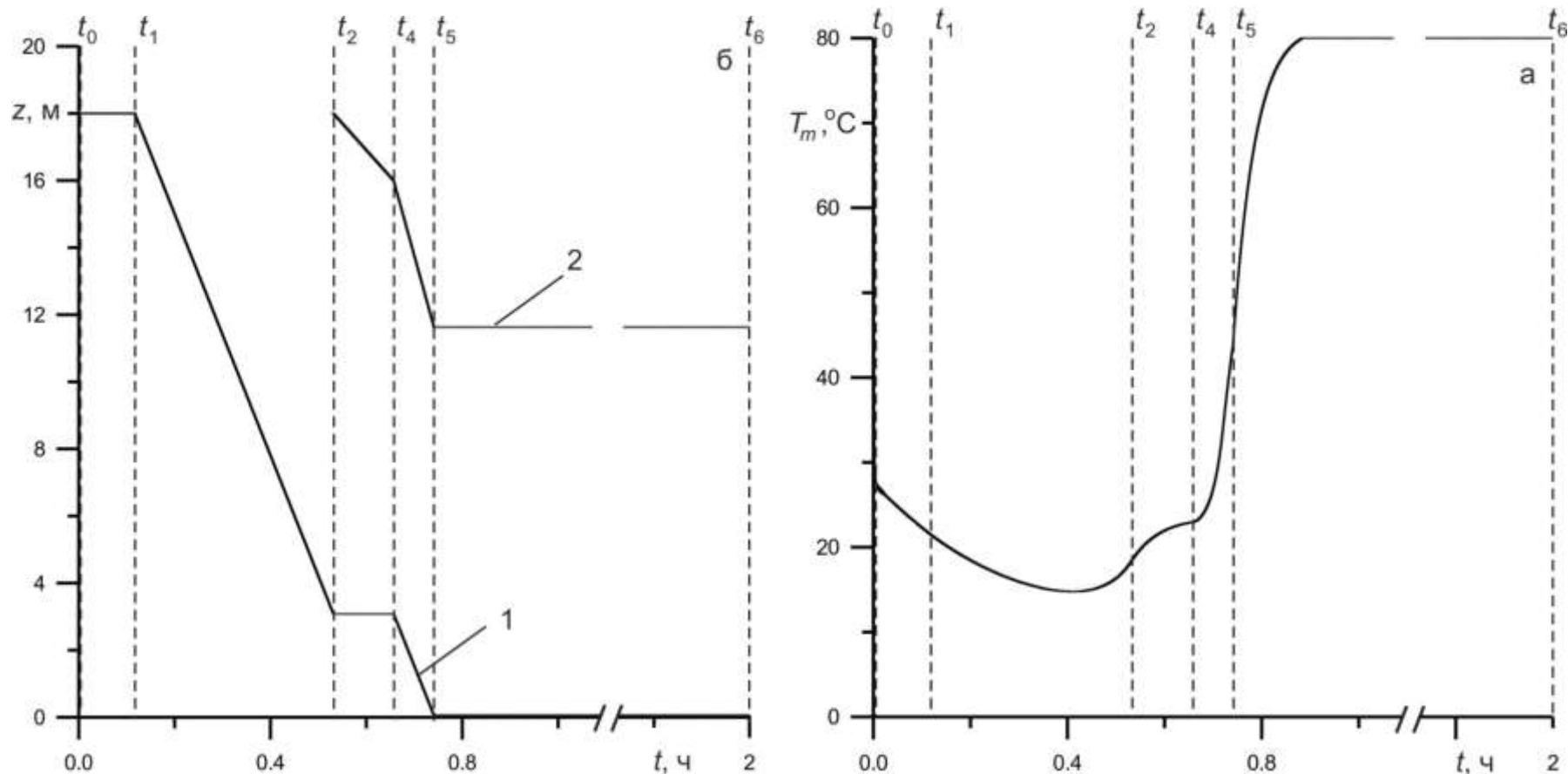
Зависимость температуры пузырька газа от координаты z



Температура струи на высоте $z=3.09$ м $T_g^m = 21$ С,

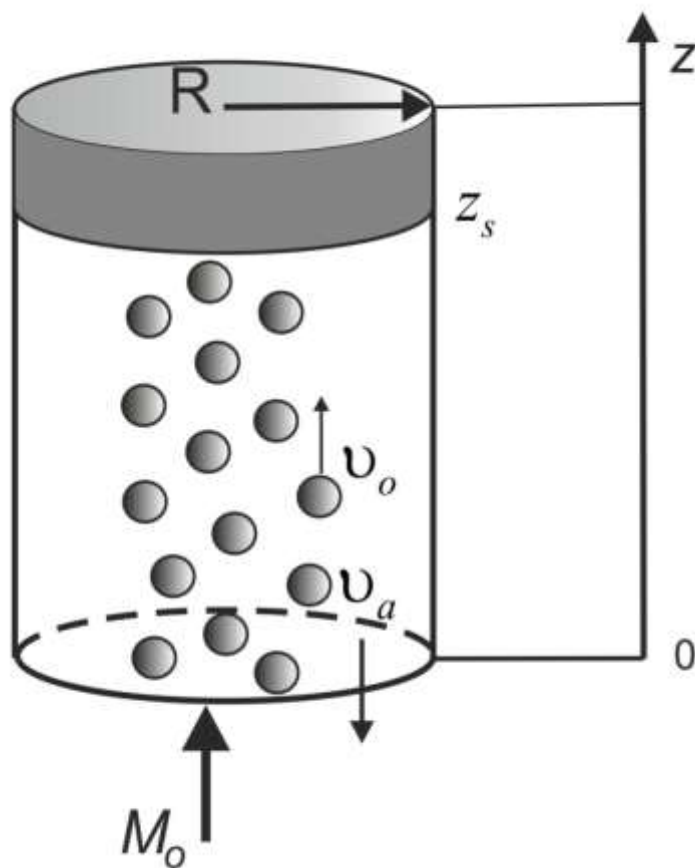
температура смеси $T_m = 18.3$ С.

Зависимость температуры смеси и координат раздела слоев от времени



а) зависимость температуры смеси от времени; б) зависимость координаты нижнего основания купола z_n (1), координаты раздела слоев газа и смеси z_{gn} (2) от времени. Начальные и граничные условия: массовые расходы нефти и газа $Q_o^e=0.8$ м³/с, $Q_g^e=0.5$ м³/с, теплоемкость нефти $c_o=2090$ Дж/К, коэффициент теплопроводности воды $\lambda_w=0.7$ Вт/(м·К), динамическая вязкость воды $\nu = 0.5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, скорость посадки купола $v_1=0.01$ м/с, высота и радиус купола $H=8$ м, $R=6$ м, высота $h_1^*=10$ м, толщина слоя газа на 3 этапе $h_g^1=2$ м. Время начала и окончания каждого этапа: $t_1=7$ мин, $t_2=9.6$ мин, $t_4=17.1$ мин, $t_5=17.5$ мин, $t_6=2$ ч.

Миграция капель нефти и накопление слоя нефти внутри купола



Уравнение сохранения числа капель нефти

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n v_o}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4}{3} \pi a_o^3 n, \quad (2)$$

Уравнения сохранения масс для нефти и спирта

$$\frac{\partial \alpha \rho_o^0}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_o^0 v_o}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_a^0}{\partial t} + \frac{\partial (1-\alpha) v_a \rho_a^0}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

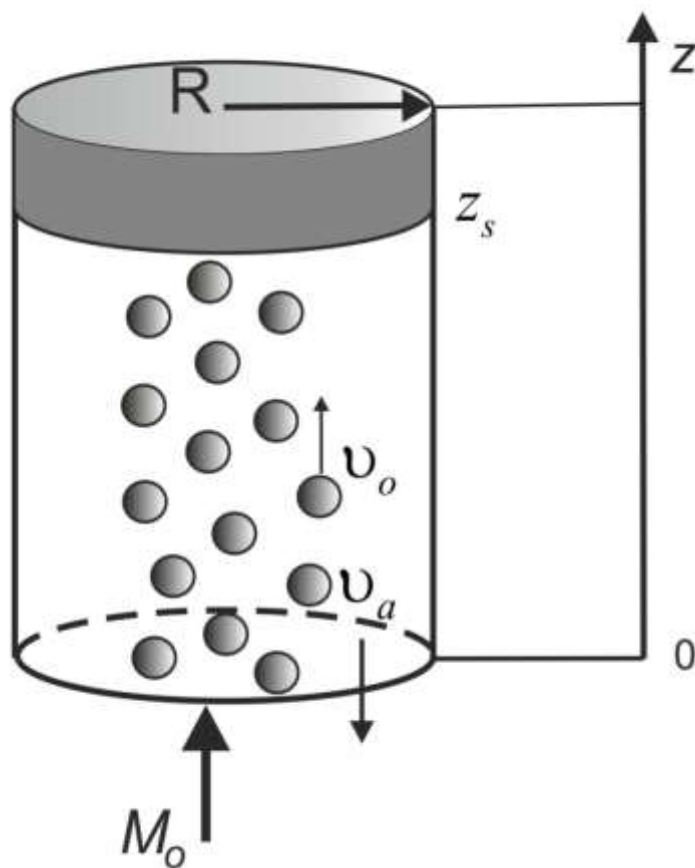
Уравнения импульсов для капель нефти и спирта

$$-\alpha \frac{\partial p}{\partial z} - n f - \alpha \rho_o^0 g = 0, \quad (5)$$

$$-(1-\alpha) \frac{\partial p}{\partial z} + n f - (1-\alpha) \rho_a^0 g = 0. \quad (6)$$

* Нижние индексы *o* и *a* соответственно относятся к нефти и спирту.

Миграция капель нефти и накопление слоя нефти внутри купола



Сила сопротивления с учетом деформации капель :

$$= C'_\mu \frac{\rho_a w_d^2 \pi a_o^2}{2}, \quad C'_\mu = C_\mu + \lambda \frac{3(\mu^*)^2 - \mu^* + 8}{5(\mu^* + 1)^2} \frac{\text{Re}^2}{4} \frac{\rho_a w_d^2 a_o}{\sigma},$$

$$\text{Re} = \frac{2a_o \rho_a w_d}{\mu_a}, \quad \mu^* = \frac{\mu_o}{\mu_a}. \quad (7)$$

Уравнения сохранения масс для нефти и спирта

$$\frac{\mu^* C_{x\infty} + C_{x0}}{1 + \mu^*}, \quad C_{x\infty} = 18.5 / \text{Re}^{3/5}, \quad C_{x0} = \frac{48}{\text{Re}} \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{\text{Re}}} \right) \quad (8)$$

$$v_o = w_o - v_a, \quad w_o = \frac{w_d}{(1 - \alpha)^{-m}}, \quad m = 3. \quad (9)$$

$$v_a = \dot{z}_s, \quad v_a = -\alpha w_o \quad (10)$$

$$v_o = w_o + v_a = (1 - \alpha) w_o \quad (11)$$

Миграция капель нефти и их накопление внутри купола

Уравнение для изменения температуры спирта внутри купола:

$$\rho_a^0 c_a (1 - \alpha) \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = -nQ - q_{aw} S, \quad Q = 4\pi a_o^2 q. \quad (12)$$

Уравнение, описывающее изменение температуры капель нефти за счет нагревания в растворе спирта:

$$\rho_o c_o \alpha \left(\frac{\partial T_o}{\partial t} + v_o \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) = nQ. \quad (13)$$

Интенсивности теплового потока между спиртом в куполе и поверхностью капли:

$$q = \beta(T_a - T_o), \quad \beta = \frac{\lambda_a \text{Nu}}{2a_o}, \quad \text{Nu} = 2 + 0.46 \text{Re}_{oa}^{0.55} \text{Pr}^{0.3}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu_a c_a}{\lambda_a}. \quad (14)$$

Процесс накопления слоя нефти:

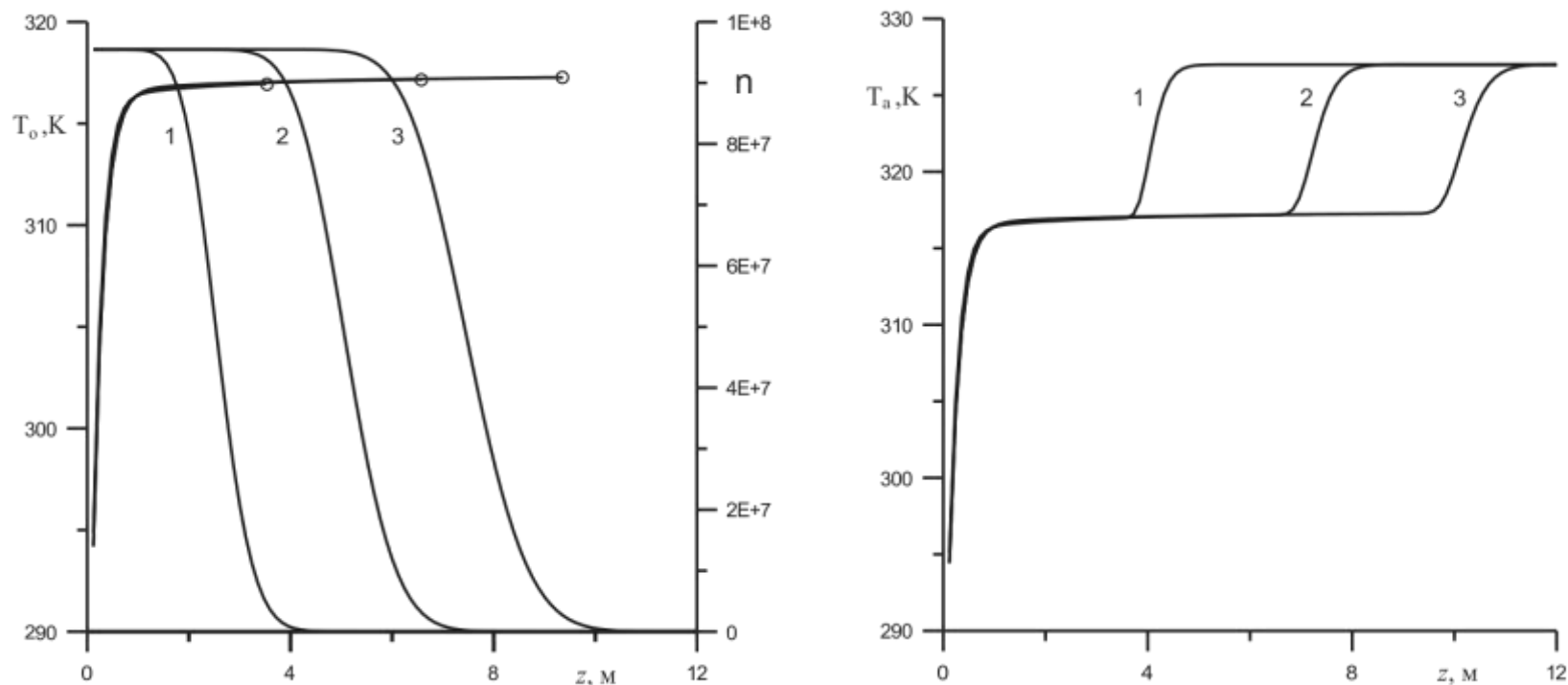
$$\frac{dM_o^l}{dt} = m^+ \quad , \quad m^+ = \rho_o \alpha w_o S \quad (15)$$

Начальные и граничные условия:

$$p = p_0 - \rho_a g z \quad M_o = \rho_o \alpha v_o \quad (16)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial n v_o}{\partial z}, \quad \frac{\partial T_o}{\partial t} = \frac{nQ}{\rho_o c_o \alpha} - v_o \frac{\partial T_o}{\partial z}, \quad \frac{\partial T_a}{\partial t} = -\frac{nQ}{\rho_a c_a (1 - \alpha)} - v_a \frac{\partial T_a}{\partial z}, \quad \frac{dz_s}{dt} = -\alpha w_o. \quad (17)$$

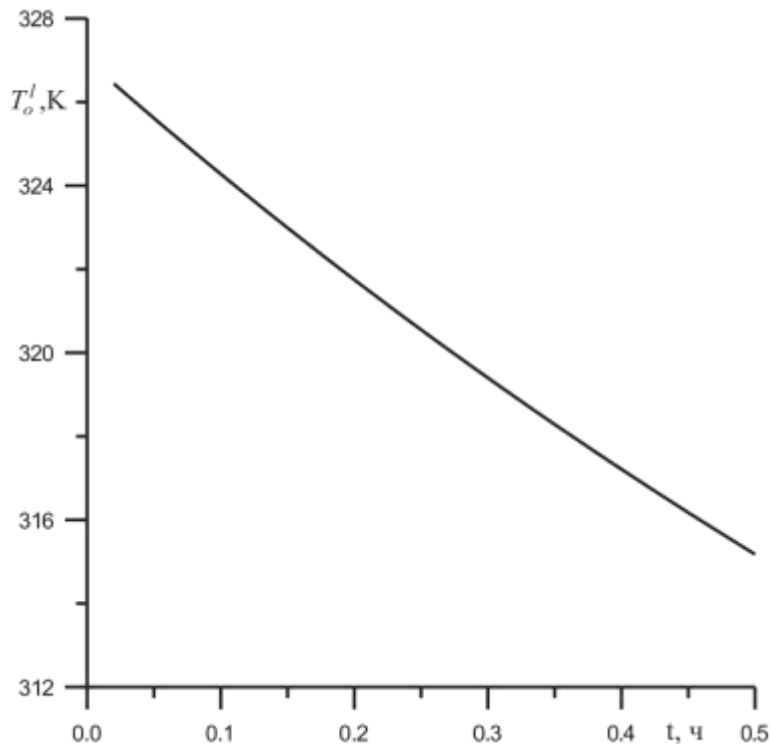
Миграция капель нефти и накопление слоя нефти внутри купола



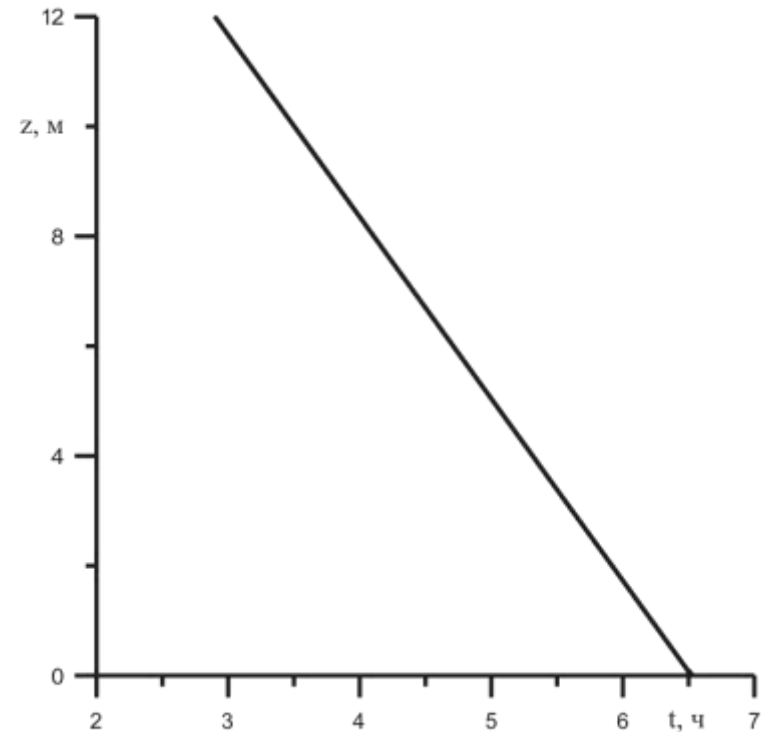
Распределение температуры капель нефти (а), температуры слоя раствора спирта (б)
внутри купола и концентрации капель нефти (б)
от вертикальной координаты z

Цифрами обозначены моменты времени: 1 – 500 с, 2 – 1000 с, 3 – 1375 с

Миграция капель нефти и накопление слоя нефти внутри купола



Зависимость температуры слоя нефти от различных начальных значений объемного содержания нефти.



Зависимость координаты раздела слоев нефти и раствора спирта z_s от времени.

*Назар қойып тыңдағандарыңызға
РАХМЕТ!*

