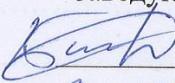


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК
Кафедра фундаментальной математики и механики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В
ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

Заведующий кафедрой
к.ф.-м.н.

 К.Ю. Басинский
7 июля 2019 г.

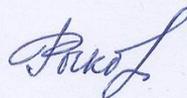
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКЕ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ. АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

01.04.01 Математика

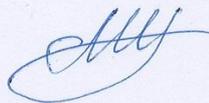
Магистерская программа «Вычислительная механика»

Выполнил работу
Студент 2 курса
очной формы обучения



Рыков
Родион
Олегович

Научный руководитель
к.ф.-м.н.



Шевелев
Александр
Павлович

Рецензент
заведующий лаборатории
поточковых исследований
«ООО Кэрэтест-Сервис»



Голуб
Павел
Павлович

г. Тюмень, 2019

Содержание

Введение.....	3
1. Кинетика процесса.....	6
2. Моделирование процесса.....	7
3. Решение системы уравнений.....	12
3.1.Обезразмеривание.....	12
3.2.Метод характеристик.....	15
4. Результаты аналитического решения.....	17
4.1.Упрощенная задача.....	17
4.2.Полная задача.....	18
5. Результаты эксперимента.....	19
Заключение.....	20
Список источников.....	21
Приложения.....	22

Введение

Особое место в нефтяной отрасли занимает совершенствование технологий добычи нефти, включая внедрение современных методов увеличения нефтеотдачи, для увеличения коэффициента извлечения нефти. Это связано с тем, что большое количество месторождений, разрабатываемых в прошлом веке, было погублено за счет неправильного эксплуатирования скважин.

Ныне разработано огромное количество методов повышения нефтеотдачи пласта. Рассмотрим классификацию:

- газовые методы - закачка воздуха в пласт; воздействие на пласт углеводородным газом, двуокисью углерода;
- тепловые методы - нагнетание в пласты теплоносителей - горячей воды или пара и др.;
- гидродинамические методы - барьерное заводнение на газонефтяных залежах, нестационарное (циклическое) заводнение, форсированный отбор жидкости;
- химические методы - вытеснение нефти водными растворами химических реагентов (полимеров, поверхностно-активных веществ, кислот, щелочей), мицеллярными растворами и др.

Физические методы, на мой взгляд, самые интересные. В данной группе потенциал вытесняющего нефть агента реализуется за счет использования естественной энергии пласта, подобные методы приводят лишь к временному увеличению продуктивности. К таким методам относят: разрыв пласта; горизонтальные скважины; электромагнитное воздействие; волновое воздействие на пласт; другие аналогичные методы.

На сегодня, наиболее доступным способом повышения нефтеотдачи скважины является ГРП, осуществимый несколькими способами:

- гидроразрыв при помощи насосов создающих высокое давление, с последующей закачкой пропантов;

- применение взрывчатых снарядов на забое скважин. В таком процессе сначала возникает ударная волна, затем волна роста давления и самая медленная волна - тепловая. Применение взрывчатых снарядов сопряжено с рядом трудностей, таких как разрушение конструкции скважины или разрушение породы. Проблемы обусловлены сложностью влияния на процесс протекания реакции.

Решение возможно путём использования жидких взрывчатых веществ на забой скважины.

В данной работе рассматривается метод термохимической обработки пласта бинарной смесью, суть которого состоит в протекании в пласте химической реакции с выделением газа и тепла. В результате чего в пласте образуется ударная волна, которая разрушает породу. В итоге возможно образование системы микротрещин в зависимости от скорости реакций и интенсивности воздействия.

Данный метод может оказаться очень эффективным методом увеличения продуктивности скважины, вследствие одновременного уменьшения вязкости нефти за счет повышения температуры, и интенсификация добычи путем разрыва пласта.

Следует отметить, что метод имеет и большие риски повреждения оборудования скважины, избежать их можно, правильно руководствуясь скоростью протекания реакции, то есть параметрами, управляющие процессом.

Целью данной работы является построение математической модели процесса, которая достаточно точно и достоверно опишет физические процессы, происходящие в пласте при термохимической обработке, и определение параметров закачки бинарной смеси для получения положительного результата.

Технология процесса проста и реализуема. В призабойную зону по разным каналам закачиваются компоненты бс. Основным является аммиачная селитра, которая является энерговыделителем в реакции разложения при взаимодействии с инициатором, нитритом натрия. Бинарная смесь взаимодействует в пласте, при этом выделяется газ и растет температура, в следствие чего растет давление в самом пласте. Основная реакция процесса:

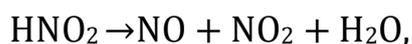
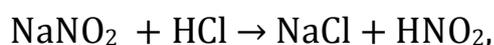


$$\Delta H = -314,7 \text{ кДж/моль.}$$

Следует отметить, что реакция протекает в среде, где $\text{pH} < 6,9$, создание кислой среды в раствор обеспечивается добавлением раствора малой концентрации HCl в энергосодержащую компоненту бинарной смеси.

В результате химической реакции должен произойти заметный рост температуры и давления в пласте, которое приведёт к разрыву пласта. Это является целью данного метода.

В данной работе рассмотрены лишь основные химические реакции, протекающие в пласте. Все продукты реакций безопасны и не причинят вреда окружающей экосистеме:



Данная исследовательская работа является продолжением моей бакалаврской работы. Было получены уравнения, которые точнее описывают физические процессы, происходящие в пласте. Также будут добавлены данные, полученные экспериментально.

1. Кинетика процесса

Рассмотрим основную реакцию процесса



Реакция является гетерогенной, но для получения приближенного значения концентрации бинарной смеси используем закон действующих масс, справедливый для гомогенных реакций [5]:

$$J = K c_e, \quad (1.2)$$

где K - удельная скорость реакции, c_e - массовая энерговыводящего компонента, J - скорость химической реакции [кг/с].

Для определения удельной скорости реакции воспользуемся уравнением Аррениуса:

$$K = A \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right], \quad (1.3)$$

где E_a - энергия активации [Дж], A - константа, характеризующая частоту столкновений реагирующих молекул.

Таким образом, получим уравнение описывающее скорость реакции:

$$J = A \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] c_e. \quad (1.4)$$

Где

$$A = mS^* \rho_w A' = \frac{mS^* \rho_w}{\tau}, \quad (1.5)$$

A' - кинетическая константа, τ - характерное время реакции.

Подставим (4) в (3) получим:

$$J = \frac{mS^* \rho_w}{\tau} \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] c_e. \quad (1.6)$$

2. Моделирование процесса

Основные допущения:

- Плоский одномерный процесс.
- Водная фаза содержит 3 компоненты (вода, бинарная смесь, газ), плотность воды зависит от количества выделяемого газа.
- Нефть не участвует в реакциях.
- Кинетика горения взрывчатого вещества описывается законом Аррениуса, в результате выделяется «газовый компонент», изменяющий плотность воды.
- Пренебрегаем теплопроводностью фаз по сравнению с конвективным переносом.
- Скелет породы в реакции не участвует.
- Перенос тепла осуществляется только водой.

Концентрацию водной фазы представляем в виде:

$$1 = c_w + c_e + c_g \text{ или } 1 = (1 - c_g - c_e) + c_e + c_g .$$

Плотность водной фазы будет определять выражением:

$$\rho = c_g \rho_g + (1 - c_g) \rho_w , \quad (2.1)$$

где ρ_g - подгоночный параметр.

Запишем уравнения неразрывности для трех компонент жидкости (для бинарной смеси, газа и воды), учитывая

$$mS^* c \rho = \frac{M}{V} = M', \quad (2.2)$$

где m - пористость, S^* - средняя водонасыщенность, c - концентрация водной фазы, ρ - плотность водной фазы, M - масса водной фазы, V - объем пласта, M' - приведенная масса водной фазы.

Система уравнений неразрывности:

$$\left\{ \begin{array}{l} mS^* \frac{\partial c_e \rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial c_e \rho v}{\partial x} = -J \end{array} \right. \quad (2.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} mS^* \frac{\partial c_g \rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial c_g \rho v}{\partial x} = kJ \end{array} \right. , \quad (2.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} mS^* \frac{\partial (1 - c_g - c_e) \rho}{\partial t} + mS^* \frac{\partial (1 - c_g - c_e) \rho v}{\partial x} = (k - 1)J \end{array} \right. \quad (2.5)$$

где J - скорость реакции, v - скорость движения водной фазы.

Подставим 2.1 в 2.3, считая, что величина $c_g c_w$ пренебрежимо мало и $\rho_w = \text{const}$, $\rho_g = \text{const}$:

$$\rho_w \frac{\partial c_e}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_e v}{\partial x} = \frac{-J}{mS^*}. \quad (2.6)$$

Аналогично подставим 2.1 в 2.4, считаем, что величина c_g^2 пренебрежимо мала:

$$\rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial c_g v}{\partial x} = \frac{kJ}{mS^*}. \quad (2.7)$$

Сложим 2.3, 2.4, 2., подставляя 2.1:

$$\rho_g \frac{\partial c_g}{\partial t} - \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + \rho_g \frac{\partial c_g v}{\partial x} + \rho_w \frac{\partial v}{\partial x} - \rho_w \frac{\partial c_g v}{\partial x} = 0. \quad (2.8)$$

Сравним 2.8 и 2.7 и получим:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w} \frac{kJ}{mS^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) \quad (2.9)$$

Подставим 2.9 в 2.6:

$$\begin{aligned} \rho_w \frac{\partial c_e}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_e}{\partial x} + c_e \frac{kJ}{\rho_w mS^*} \left(\rho_w - \frac{\rho_w \rho_g}{\rho_w}\right) &= \frac{-J}{mS^*}, \\ \rho_w \frac{\partial c_e}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_e}{\partial x} + c_e \frac{kJ}{mS^*} &= \frac{-J}{mS^*}, \\ \rho_w \frac{\partial c_e}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_e}{\partial x} &= \frac{-J}{\rho_w mS^*} (c_e + 1). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим 2.9 в 2.7:

$$\begin{aligned} \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial x} + c_g \frac{kJ}{\rho_w mS^*} \left(\rho_w - \frac{\rho_w \rho_g}{\rho_w}\right) &= \frac{kJ}{mS^*}, \\ \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \rho_w \frac{\partial c_g}{\partial x} + c_g \frac{kJ}{mS^*} &= \frac{kJ}{mS^*}, \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} &= \frac{kJ}{\rho_w mS^*} (1 - c_g). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Подставив в полученную систему выражение для плотности жидкости, совершили математические преобразования и пренебрегли величинами концентрации второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_e}{\partial t} + v \frac{\partial c_e}{\partial x} = \frac{-J}{\rho_w m S^*} & (2.12) \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} & (2.13) \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) & (2.14) \end{cases}$$

Дополним систему 12-14 уравнением притока тепла [источник?]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial H v}{\partial x} = J Q, \quad (2.15)$$

где U - внутренняя энергия системы, H - энтальпия, Q - теплота, выделяющаяся в результате реакции 1 кг вещества.

Представим внутреннюю энергию пористой среды как суммы энергий породы и флюидов залегающих в ней:

$$U = U_{\text{rock}} + U_{\text{oil}} + U_w, \quad (2.16)$$

$$U = (1 - m) C_r \rho_r (T - T_0) + m(1 - S^*) C_o \rho_o (T - T_0) + m S^* C_w \rho_w (T - T_0), \quad (2.17)$$

где C_r - теплоемкость породы, ρ_r - плотность породы, C_o - теплоемкость нефти, ρ_o - плотность нефти, C_w - теплоемкость воды, ρ_w - плотность воды, $T - T_0$ - изменение температуры.

Подставим 2.17 в 2.15:

$$[(1 - m) C_r \rho_r + m(1 - S^*) C_o \rho_o + m S^* C_w \rho_w] \frac{\partial T - T_0}{\partial t} +$$

$$m S^* C_w \rho_w \frac{\partial (T - T_0) v}{\partial x} = J Q,$$

$$H \frac{\partial T - T_0}{\partial t} + H_w \frac{\partial (T - T_0) v}{\partial x} = J Q,$$

$$H \frac{\partial T}{\partial t} + H_w T \frac{\partial v}{\partial x} + H_w v \frac{\partial T}{\partial x} - T_0 H_w \frac{\partial v}{\partial x} = J Q,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} \frac{\partial v}{\partial x} (T - T_0) + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{J Q}{H},$$

используем 14:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{J Q}{H} - \frac{H_w}{H} \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) (T - T_0). \quad (2.18)$$

Система уравнений 12-14 и 18 описывает образование вещества и изменения температуры в рассматриваемом процессе:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_e}{\partial t} + v \frac{\partial c_e}{\partial x} = \frac{-J}{\rho_w m S^*} \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} - \frac{H_w}{H} \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w}\right) (T - T_0) \end{array} \right. .$$

Определим возникающее давление в пласте. Одномерная фильтрация двухфазной смеси:

$$w = -k \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{dP}{dx} \quad (2.19)$$

где w - скорость фильтрации, k - проницаемость, S - площадь притока, μ_o - вязкость нефти, μ_w - вязкость воды, f_w - относительная фазовая проницаемость водной фазы, f_o - относительная фазовая проницаемость нефти.

$$v = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{dP_l}{dx}, \quad (2.20)$$

v - действительная скорость смеси.

Из 2.9 следует, что скорость не зависит от концентрации газа, тогда следует учесть парциальное давление газа, считаем азот идеальным газом.

$$P_g = R_g \rho T, \quad (2.21)$$

где R_g - газовая постоянная, ρ - плотность газа, T - температура.

Учитывая 2.2 и определение массового расхода

$$\frac{M}{t} = \rho_o v_o S_p, \quad (2.22)$$

где t - время закачки, ρ_o - начальная плотность взрывчатой смеси, v_o - скорость закачки, S_p - площадь сечения потока (площадь сечения пор),

$$m S^* c_p V = \rho_o v_o S_p t,$$

$$\rho = \frac{\rho_o v_o S_p t}{m S^* c S_x} = \frac{\rho_o v_o t}{S^* c x},$$

$$\rho = \frac{\rho_o}{S^* c}. \quad (2.23)$$

Подставим 2.23 в 2.21:

$$P_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} T. \quad (2.24)$$

Таким образом давление в пласте - сумма давления 2.20 и 2.24:

$$P = P_g + P_l \quad (2.25)$$

Конечная система:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_e}{\partial t} + v \frac{\partial c_e}{\partial x} = \frac{-J}{\rho_w m S^*} \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + v \frac{\partial c_g}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{JQ}{H} - \frac{H_w}{H} \frac{kJ}{\rho_w m S^*} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) (T - T_0) \cdot \\ v = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{dP_l}{dx} \\ P_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} T \\ P = P_g + P_l \end{array} \right.$$

3. Решение системы уравнений

3.1. Обезразмеривание

Подставив 1.6 в конечную систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_e}{\partial t} + v \frac{\partial C_e}{\partial x} = - \frac{\exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] C_e}{\tau_0} \\ \frac{\partial C_g}{\partial t} + v \frac{\partial C_g}{\partial x} = \frac{\exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] C_e k}{\tau_0} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] C_e \lambda}{\tau_0} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{H_w}{H} v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{m S^* \rho_w Q \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] C_e}{\tau_0 H} - (T - T_0) \frac{H_w k \lambda \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] C_e}{H \tau_0} \\ v = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{dP_l}{dx} \\ P_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} T \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Введем безразмерные параметры:

$$\bar{V} = \frac{v}{v_0}, \quad \bar{t} = \frac{t}{\tau_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{v_0 \tau_0}, \quad \bar{T} = \frac{T - T_0}{T}, \quad \bar{P} = \frac{P}{P_0}$$

Тогда:

$$\exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] = \exp\left[-\frac{E_a(1 - \bar{T})}{RT_0}\right] = \exp\left[-\frac{E_a}{RT_0}\right] \times \exp\left[\frac{E_a \bar{T}}{RT_0}\right] = \varphi \exp[\alpha \bar{T}]$$

Первое уравнение системы 3.1:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_0} \frac{\partial C_e}{\partial \bar{t}} + \frac{\bar{V} v_0}{v_0 \tau_0} \frac{\partial C_e}{\partial \bar{x}} &= - \frac{\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e}{\tau_0}, \\ \frac{\partial C_e}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial C_e}{\partial \bar{x}} &= - \varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Второе уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_0} \frac{\partial C_g}{\partial \bar{t}} + \frac{\bar{V} v_0}{v_0 \tau_0} \frac{\partial C_g}{\partial \bar{x}} &= \frac{\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e k}{\tau_0}, \\ \frac{\partial C_g}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial C_g}{\partial \bar{x}} &= \varphi k \exp[\alpha \bar{T}] C_e. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Третье:

$$\frac{V_0}{V_0 \tau_0} \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{x}} = \frac{\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e \lambda}{\tau_0},$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{x}} = \varphi \lambda \exp[\alpha \bar{T}] C_e. \quad (3.4)$$

Рассмотрим уравнение притока тепла:

$$\frac{T^2}{T_0} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \frac{H_w}{H} \frac{T^2}{T_0} \frac{V_0 \bar{V}}{V_0 \tau_0} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \frac{m S^* \rho_w Q \varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e}{\tau_0 H} - (T - T_0) \frac{H_w k \lambda \varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e}{H \tau_0}$$

Пренебрежем \bar{T}^2 :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{H_w}{H} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e (1 - \beta \bar{T}). \quad (3.5)$$

Уравнение Дарси принимает вид:

$$\bar{V} = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{P_0}{V_0^2 \tau_0} \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} = \varepsilon \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} \quad (3.6)$$

Уравнение парциального давления газа

$$P_0 \bar{P}_g = R_g \frac{\rho_0}{S^* c} \frac{T_0}{P_0 (1 - \bar{T})} = \gamma \frac{1}{1 - \bar{T}} \quad (3.7)$$

В конечном счете, система приобретает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_e}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial C_e}{\partial \bar{x}} = -\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e \\ \frac{\partial C_g}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial C_g}{\partial \bar{x}} = \varphi k \exp[\alpha \bar{T}] C_e \\ \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{x}} = \varphi \lambda \exp[\alpha \bar{T}] C_e \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{H_w}{H} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = \varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e (1 - \beta \bar{T}) \\ \bar{V} = \varepsilon \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} \\ \bar{P}_g = \frac{\gamma}{(1 - \bar{T})} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Где безразмерные параметры:

$$\lambda = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_w},$$

$$\alpha = \frac{E_a}{RT_0},$$

$$\varphi = \exp \left[- \frac{E_a}{RT_0} \right],$$

$$l = \frac{mS^* \rho_w Q}{HT_0},$$

$$\beta = \frac{2mS^* \rho_w Q}{HT_0} + \frac{k\lambda H_w}{H},$$

$$\varepsilon = \frac{-k}{m} \left(\frac{f_o}{\mu_o} + \frac{f_w}{\mu_w} \right) \frac{P_o}{V_o^2 \tau_o},$$

$$\gamma = R_g \frac{\rho_o T_o}{S^* c P_o}.$$

3.2. Метод характеристик

Метод характеристик – метод, используемый для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Обычно применяется к решению уравнений в частных производных первого порядка. Метод заключается в приведении уравнения в частных производных к семейству обыкновенных дифференциальных уравнений. Для этого требуется найти кривые, вдоль которых уравнения в частных производных превращаются в обыкновенный диффуры, их можно решить вдоль характеристик и найденное решение превратить в решение исходного уравнения в частных производных.

Решим полученную систему 3.8 методом характеристик.

Рассмотрим первое уравнение:

$$\frac{\partial C_e}{\partial \bar{t}} + \bar{V} \frac{\partial C_e}{\partial \bar{x}} = -\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e \quad (3.9)$$

Считаем что $C_e = C_e(\bar{x}, \bar{t})$. Возьмем производную:

$$\frac{dC_e}{d\bar{t}} = \frac{\partial C_e}{\partial \bar{x}} \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} + \frac{\partial C_e}{\partial \bar{t}} \quad (3.10)$$

Сравнивая (3.9) и (3.10) уравнения получим:

$$\frac{dC_e}{d\bar{t}} = -\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e, \quad \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{V} \quad (3.11)$$

Проводя аналогичные действия для остальных уравнений, получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_e}{d\bar{t}} = -\varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e \\ \frac{dC_g}{d\bar{t}} = \varphi k \exp[\alpha \bar{T}] C_e \\ \frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} = \varphi \lambda \exp[\alpha \bar{T}] C_e \\ \frac{d\bar{T}}{d\bar{t}} = \varphi \exp[\alpha \bar{T}] C_e (1 - \beta \bar{T}) \\ \bar{V} = \varepsilon \frac{d\bar{P}_1}{d\bar{x}} \\ \bar{P}_g = \frac{\gamma}{(1 - \bar{T})} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{V} \\ \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{V} \\ \frac{d\bar{t}}{d\bar{x}} = 0 \\ \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \frac{H_w \bar{V}}{H} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

В результате была получена система характеристик. Первое из них решается аналитически, методом разделения переменных, остальные - методом конечных разностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{\bar{c}} = c_0 e^{\rho_B n \Delta t} \\ c_{\Gamma_i}^n = c_{\Gamma_{i-1}}^{n-1} + \Delta t k c_{\bar{c}_{i-1}}^{n-1} \\ \Delta \bar{x}_i^n = \Delta t \bar{v}_{i-1}^n \\ \bar{v}_i^n = \bar{v}_{i-1}^n + \Delta \bar{x}_i^n k \lambda c_{\bar{c}_{i-1}}^n \\ \bar{x}_i^n = \bar{x}_i^{n-1} + \Delta t \frac{H_B}{H} \bar{v}_i^n \\ \bar{T}_i^n = e^{\alpha \bar{T}_i^n} c_{\bar{c}_i}^n (1 - \beta \bar{T}_i^n) \Delta t + \bar{T}_i^{n-1} \end{array} \right. , \quad (3.13)$$

где Δt - шаг по времени.

Начальные и граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t = 0,1 \\ k = 2 \\ \lambda = -0,25 \\ C(t=0) = 0 \\ C_0 = 1 \\ V_0 = 1 \end{array} \right. .$$

4. Результаты аналитического решения

Кривая, описывающая линию фронта закачки, изображена на рис.1, ниже данной кривой концентрации и температура равны своим начальным значениям.

На рис.2. изображен график, отражающие зависимость концентрации смеси, газа и температуры от координаты - глубины проникновения в пласт, для различных моментов времени.

Проанализируем изменение температуры - испытываем довольно резкий скачок в начале, она достигает определенного значения и перестает возрастать, увеличивается только размер высокотемпературной области. Эта зона также характеризуется резким падением концентрации, таким образом, реакция тут протекает с наибольшей скоростью.

Падения концентрации смеси, наблюдается протяженная зона, где значение становится минимальными, а затем постепенно начинает возрастать. Это связано с тем, что фронт на котором происходит реакция, не успевает за передним фронтом смеси, то есть смесь выгорает только в середине, потому что движется с относительно большой скоростью.

Концентрация газа возрастает равномерно и нелинейно.

4.1. Упрощенная задача

При решении упрощенной задачи, в уравнении тепла было допущение ($T=\text{const}$) . Графики полученных зависимостей можем видеть на следующих графиках.

Рассмотрим изменение концентрации бинарной смеси с течением времени в каждой координате пласта (Рис.3.). Очевидно, что по мере проникновения в пласт концентрация бинарной смеси падает. Достигая пересечения с кривой переднего фронта закачки, концентрация становится равной начальному значению (т.е. $C=0$).

На рис.4. видно возрастание температуры, происходящее за счет протекания химической реакции. Также следует отметить, что температурная волна отстает от фронта закачки, что видно на рис.5.

На рис.6. представлена зависимость концентрации газа от длины проникновения в пласт. Как показывалось ранее, по мере проникновения в пласт бинарной смеси, в нем начинает происходить химическая реакция, сопровождаемая выделением газа. Соответственно его концентрация должна расти, что и соответствует получившимся результатам. Далее достигая переднего фронта закачки, концентрация принимает начальное значение.

4.2. Полная задача

В случае решения полной системы уравнений, картина поведения рассматриваемых величин меняется.

До фронта температура принимает значение выше, чем температура в упрощенной задаче, так же спад температуры за фронтом происходит не равномерно, а скачкообразно (Рис.7.).

Рассмотрим изменение концентрации бинарной смеси на рис.8. В некоторый момент фронт концентрации начинает продавливаться под действием температуры. Поскольку температура неравномерно распределена по пласту, то в разных участках количество прореагирующей бинарной смеси будет разным. Наблюдается максимальное продавливание концентрации на участке максимальной температуры.

6. Результаты эксперимента

На базе «ООО Корэтест Сервис» совместно с коллегами из Нефтемаш был проведен опыт по определению коэффициента вытеснения нефти водой после воздействия бинарной смеси на пласт. Была отобрана модель из 6 30-ти миллиметровых образцов общей длиной 18,5 см. Преимущественно песчаник. Проницаемость варьировалась в диапазоне 130 – 150 мД. Ход эксперимента мы можем видеть на рис.9.

Опыт проходил следующим образом. Сначала модель насыщалась нефтью. В каждой стадии необходимо было добиться стабилизации. После чего нефть из образцов вытеснялась пластовой водой и замерялся коэффициент проницаемости по воде. Закачивалась бинарная смесь и активатор. Выдержка эксперимента на протяжении суток. Далее довытесняли нефть и вновь снимали проницаемость по воде. Я принимал непосредственное участие в проведении опыта и что я из этого увидел.

При разгрузке установки было замечено, что из системы обильно выделялся газ. Это было ожидаемо, поскольку в этом вся суть эксперимента. К сожалению, замерить объём выделившегося газа не имелось возможности, да и не ставилось первоначальной целью.

Во время выдержки, на входе и выходе выросло давление. Примечательным был то, что давление на выходе было несколько больше по величине. Из этого можно говорить о том, что газ распределился не равномерно. Почему? Я пришел к выводу, что неудачно был выбран режим закачки. Основная порция бинарной смеси с активатором прореагировала не в середине, а в конце модели.

Поговорим о вытесненной нефти. Во время опыта, когда проходили стадии с вытеснением пластовой водой, со входа был собран флюид. Положительным результаты является то, что после бинарной смеси было до

вытеснено еще треть объема нефти, вытесненной до бс. Теперь можно с уверенностью говорить о том, что метод действительно работает и его эффективность в районе 33%.

Заключение

Полученное решение описывает поведение концентрации бинарной смеси, концентрации газа и температуры в пласте в различные моменты времени.

Полученные данные являются основой для дальнейшего, более приближенного к реальным условиям, описания физического процесса, происходящего в пласте в результате химической реакции. В дальнейшем планируется получить зависимость давления газа, образующегося в пласте, от управляемых параметров, так как именно под действием определенных значений давления возможно растрескивание пресабавно зоны. Также есть договоренность о проведении дальнейших опытов по изучению бс.

Список источников

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 22.06.2016).
2. Обзор современных методов повышения нефтеотдачи пласта [электронный ресурс]. URL: <http://www.petros.ru/rus/news/?action=show&id=267> (дата обращения: 22.06.2016).
3. Laspe C.G., Roberts L.N. A Mathematical Analysis of Oil and Gas Well Stimulation by Explosive Fracturing. //SPE 3355, 1971 - 4.
4. Young C., Barker D.B., Clark H.C. Field Tests of the Stem-Induced Explosive Fracturing Technique. //SPE Production Engineering, 1986, July - 13.
5. Well Stimulation/ Completion Using High Explosives. //JPT, Feb., 2006 /SPE 0206-0022 6
6. Александров Е.Н., Кузнецов Н.М., Леменовский Д.А., Петров А.Л., Лиджи-Горяев В.Ю. Технология термохимического стимулирования добычи нефти и битумов с уменьшением количества воды в нефтяном пласте. // Георесурсы, 2009, № 1(29), с.2-7.
7. Патент РФ № 2002112264/03, 13.05.2002. Александров Е.Н., Леменовский Д.А., Дараган Е.В., Каширин А.Н., Фомин П.Г. Способ термохимической обработки продуктивного пласта // Патент России № 2219332. 2003].
8. Неорганическая химия: в 3 т. / под ред. Ю.Д. Третьякова. Т. 1: Физико-химические основы неорганической химии: учебник для студентов высших учебных заведений / М.Е. Тамм, Ю.Д. Третьяков. -М.: Издательский центр «Академия».
9. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1./ Л.И. Седов - М.: Наука, 1970.

Приложения



Рис.1. Линия фронта закачки.

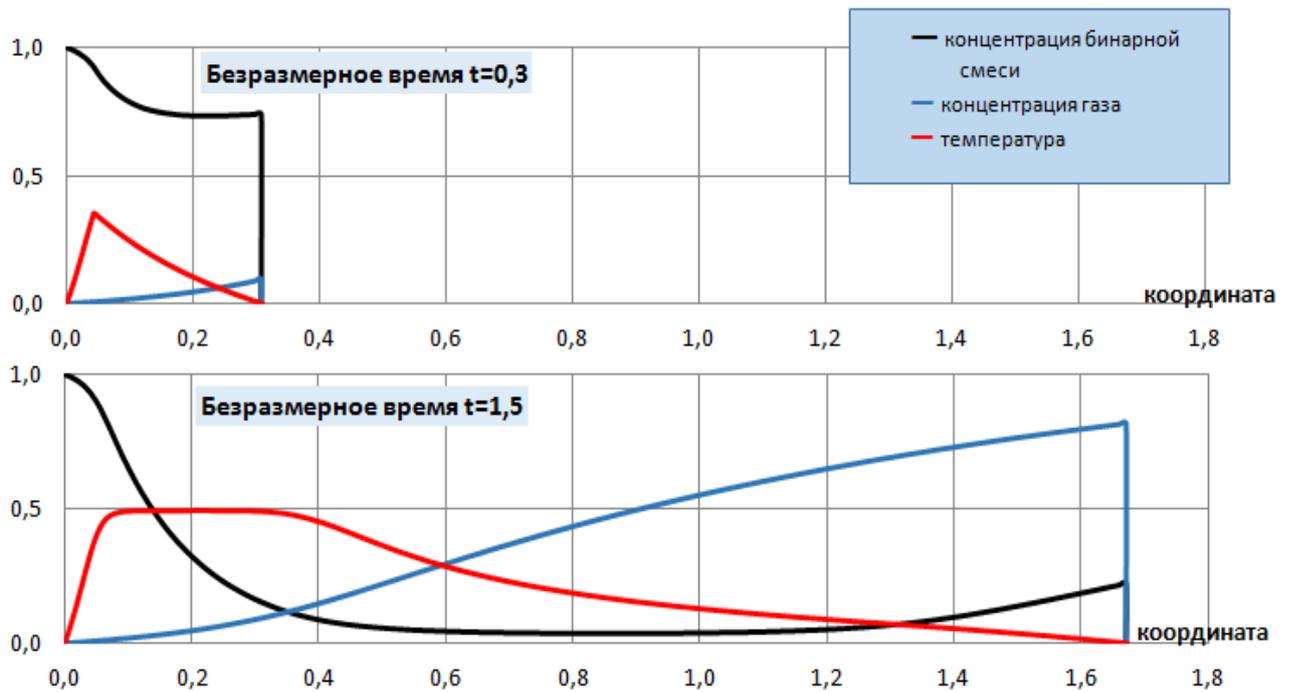


Рис. 2. Зависимость концентрации смеси, газа и температуры от глубины проникновения в пласт

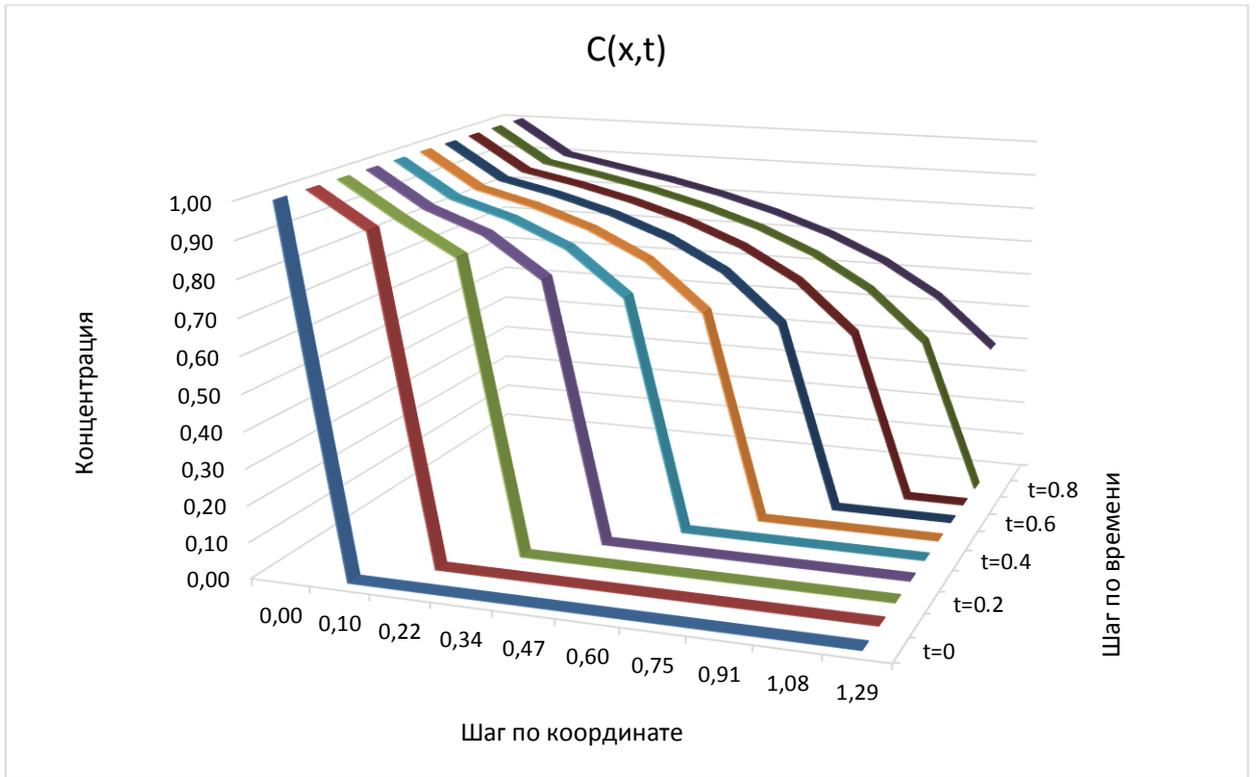


Рис.3. Зависимость концентрации бинарной смеси от длины проникновения в пласт в разные моменты времени.

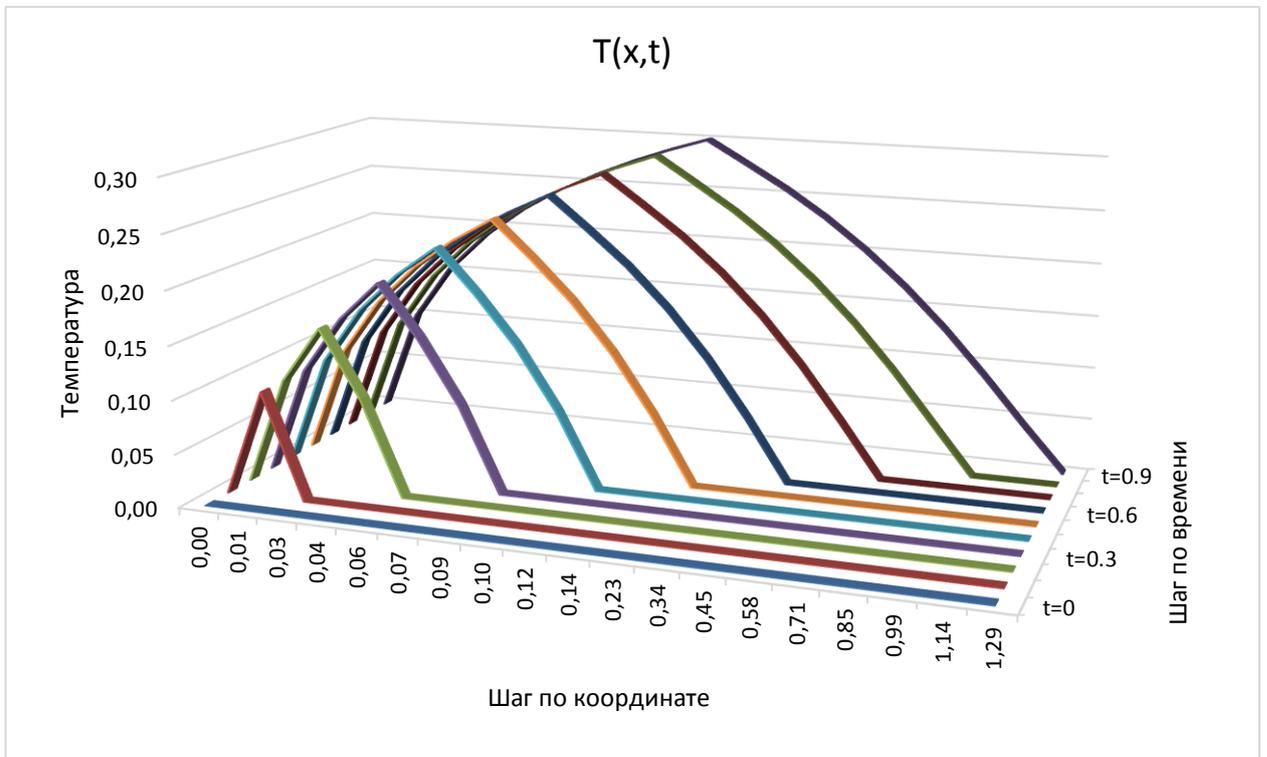


Рис.4. Зависимость температуры от длины проникновения в пласт в разные моменты времени.

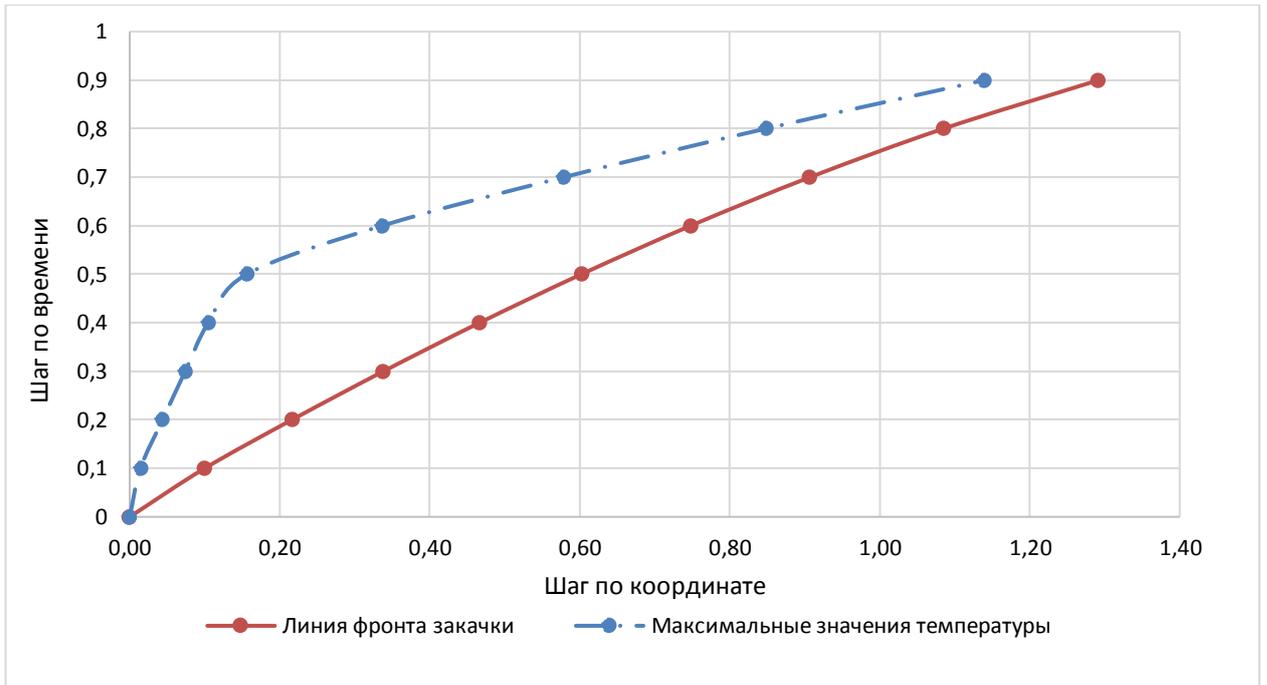


Рис.5. Сравнение линии фронта закачки и линии максимальных значений температуры.

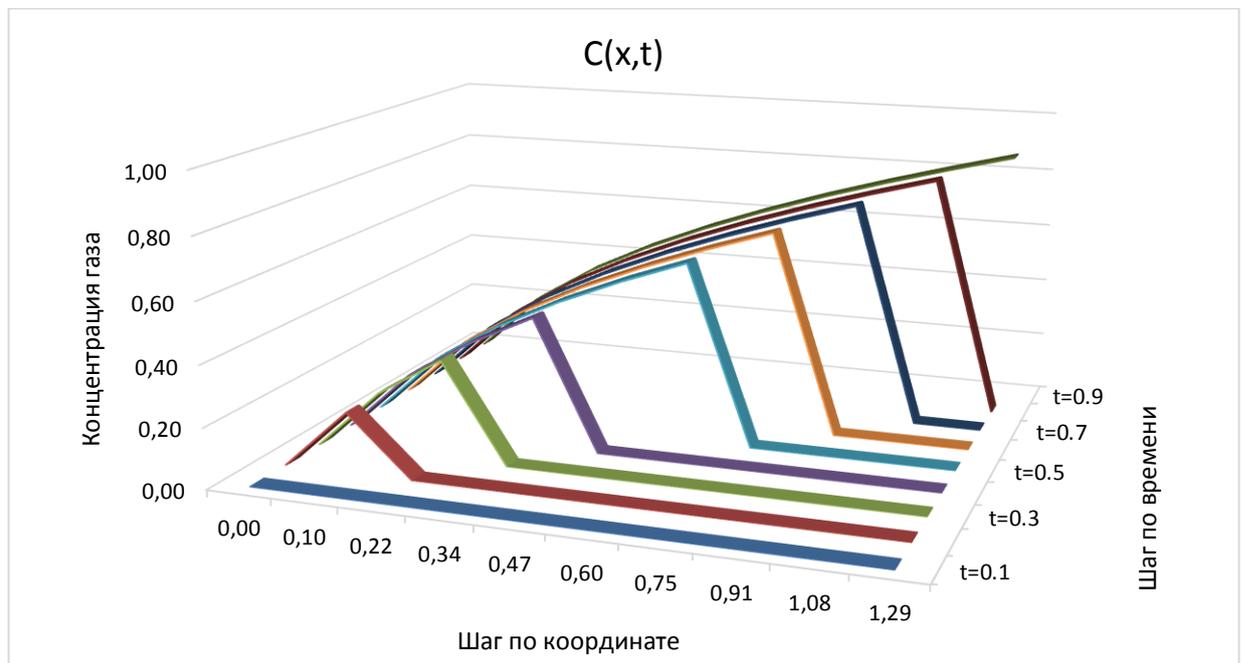


Рис.6. Зависимость концентрации газа от длины проникновения в пласт в разные моменты времени.

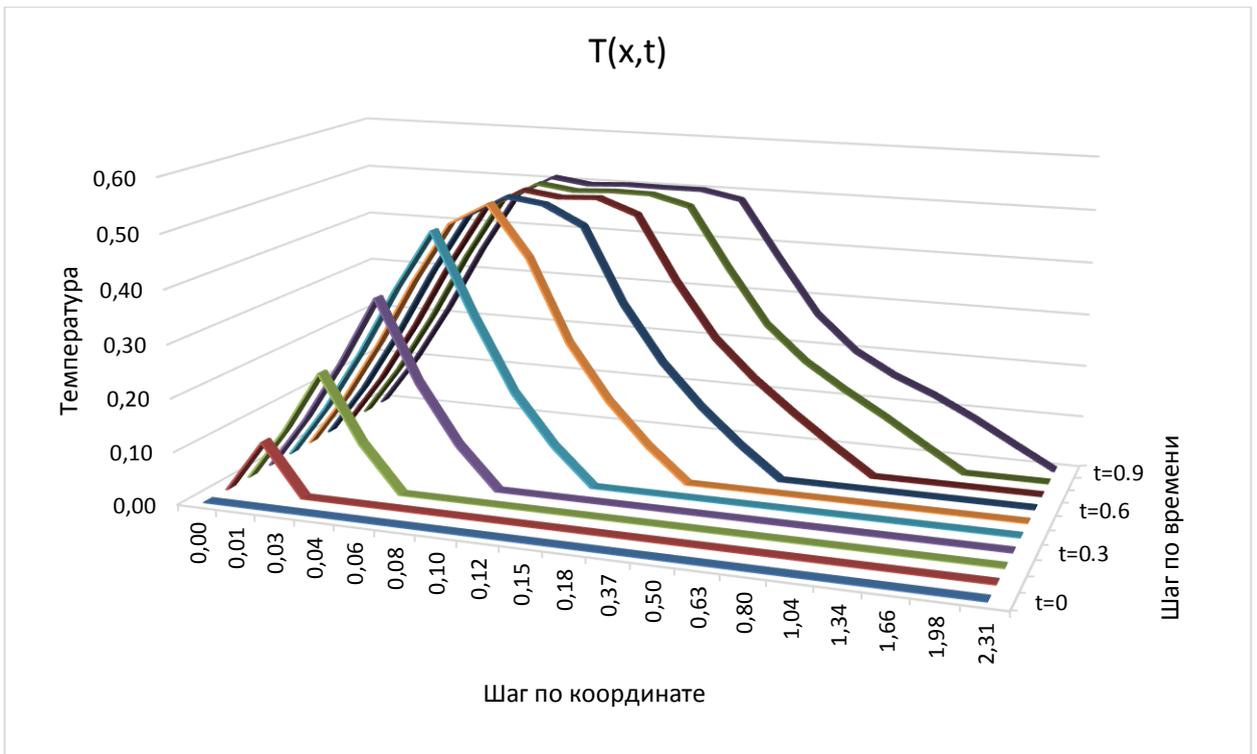


Рис.7. Зависимость температуры от длины проникновения в пласт в разные моменты времени.

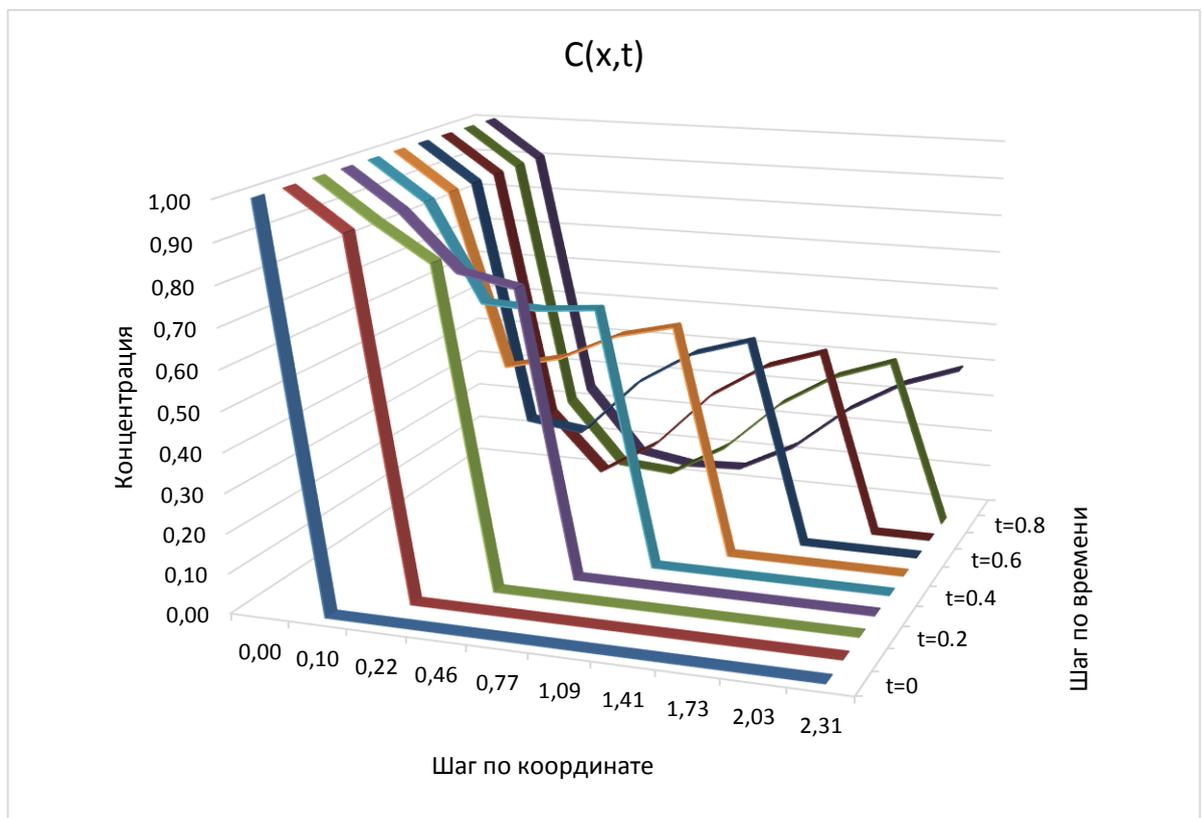
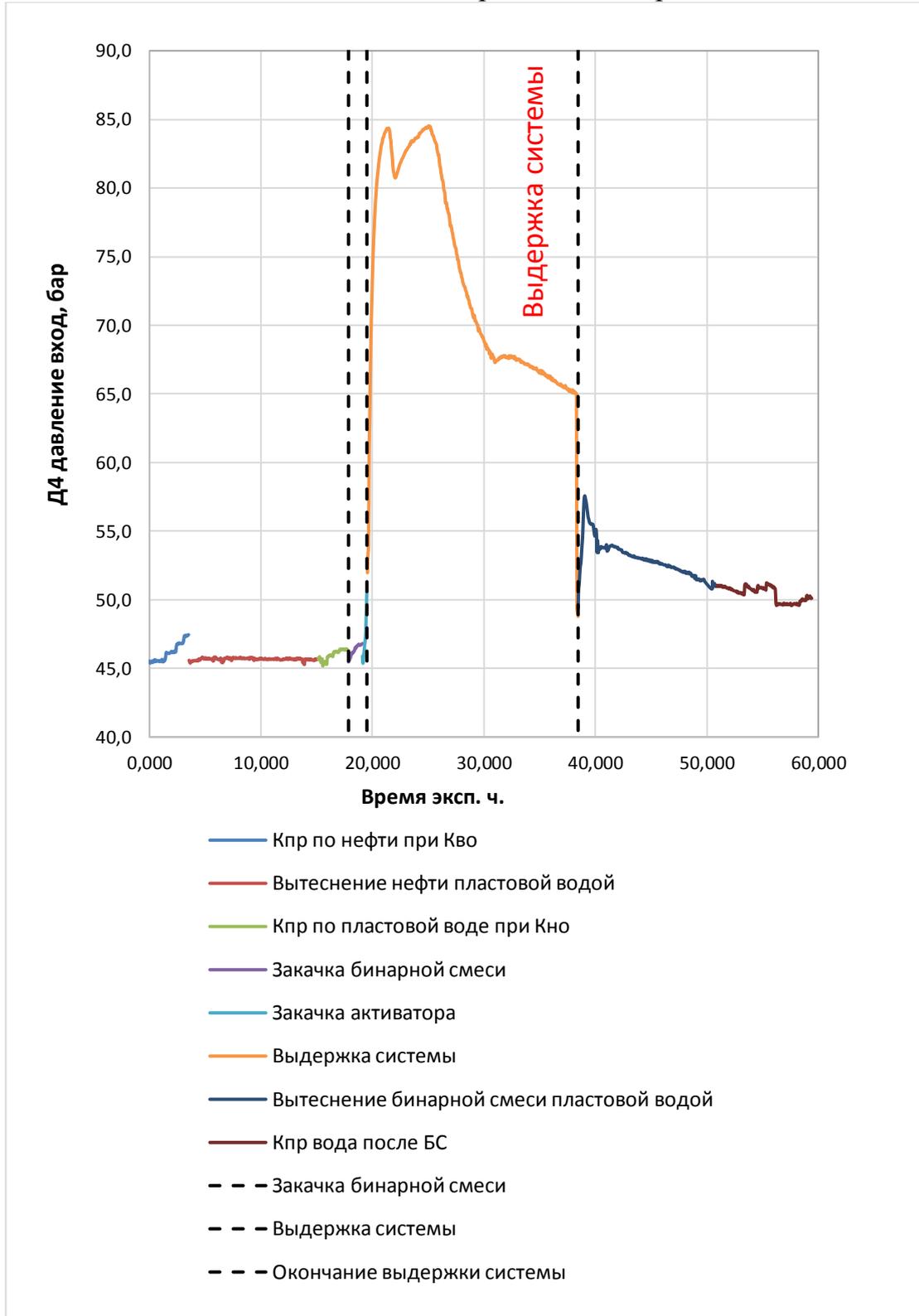


Рис.8. Зависимость концентрации бинарной смеси от длины проникновения в пласт в разные моменты времени.

Рис.9. Зависимость давления на входе от времени эксперимента



Приложение 1. Программный код, реализованный в среде Borland Delphi 7, для численного решения системы уравнений о закачке бинарной смеси в пласт. Использован итерационный метод Ньютона.

program Project1;

```
{$APPTYPE CONSOLE}
```

```
uses
```

```
  SysUtils,  
  Math;
```

```
const
```

```
  tau=7200;  
  Voo=1E-4;  
  porosity=0.25;  
  dimension=1000;  
  Tempo=0;  
  Co=1;  
  Vo=1;  
  Po=150*1E5;  
  dt=0.01;  
  lyamda=0.8125;  
  Hw=1;  
  H=7;  
  alfa=4;//26.65;  
  l=1;//122.5;
```

```
function TempConc(x1,S1,x2,x3,S3:real):real;
```

```
// S-enneaaoaiay aae?eia(O eee N)
```

```
begin
```

```
  Result:=(S3*(x1-x2)-S1*(x3-x2))/(x1-x3);
```

```
end;
```

```
function alfaq():real;
```

```
begin
```

```
  Result:=3*ln(tau);
```

```
end;
```

```
function lq():real;
```

```
const
```

```
  m=0.15;    {porosity}  
  S=0.5;    {water saturation}  
  ro=1000; {density water}  
  Q=3800*1000; {}  
  Cw=4200;  {heat capacity water}  
  Csi=678;  {heat capacity silicon}  
  H=m*Cw+(1-m)*Csi;  
  T0=60+273; {formation temperature}
```

```

begin
  Result:=(m*S*ro*Q)/(H*T0);
end;

function beta():real;
const k=0.16;
begin
  Result:=2*1+k*lyamda*Hw/H;
end;

function k():real;
begin
  Result:=0.16;
  //round((beta-2*1)/(lyamda*Hw/H));
end;

function MU(C,Cg:real):real;
const
  MUc=1*1E-3;
  MUg=0.01*1E-3;
begin
  Result:=MUc*MUg/power((MUc*MUc*MUc*Cg+MUg*MUg*MUg*C),(1/3));
end;

type
  massive = array of real;

var
  {array's}
  Ci,Ti,ViC,ViT,xiC,xiT,dxiC,dxiT,CTi,TCi,Cgi,SumConc,Pi:array of massive;
  {step's}
  i,t,n:integer;
  x1,x2:real;
  {file}
  f:textfile;
  {yiea}
  found:boolean;
  shag:integer;
begin
  {add file}
  AssignFile(f,'Result.txt');
  Rewrite(f);
  {Length Array's}
  SetLength(SumConc,dimension+1,dimension+1);

```

```

SetLength(Ci,dimension+1,dimension+1);
SetLength(Cgi,dimension+1,dimension+1);
SetLength(Ti,2*dimension+1,dimension+1);
SetLength(TCi,dimension+1,dimension+1);
SetLength(CTi,2*dimension+1,dimension+1);
SetLength(ViC,dimension+1,dimension+1);
SetLength(ViT,2*dimension+1,dimension+1);
SetLength(xiC,dimension+1,dimension+1);
SetLength(xiT,2*dimension+1,dimension+1);
SetLength(dxiC,dimension+1,dimension+1);
SetLength(dxiT,2*dimension+1,dimension+1);
SetLength(Pi,dimension+1,dimension+1);

```

```

{Ia?aeuiua oneiaey}
for t:=0 to (dimension-1) do begin
  Ci[0,t]:=Co;
  CTi[0,t]:=Co;
  Ti[0,t]:=Tempo;
  TCi[0,t]:=Tempo;
  xiC[0,t]:=0;
  xiT[0,t]:=0;
  ViC[0,t]:=Vo;
  ViT[0,t]:=Vo;
  dxiC[0,t]:=0;
  dxiT[0,t]:=0;
  Cgi[0,t]:=0;
  Pi[0,t]:=1;
end;
for t:=1 to (dimension-1) do begin
  Ti[2*t,t]:=Tempo;
  TCi[t,t]:=Tempo;
end;
{.}

```

```

{I?ia?aiiue eia}
for t:=1 to (dimension-1) do begin
  {C}
  for i:=1 to (t) do begin
    Ci[i,t]:=Ci[i-1,t-1]-Ci[i-1,t-1]*exp(alfa*TCi[i-1,t-1])*dt;
    xiC[i,t]:=xiC[i-1,t-1]+dt*ViC[i-1,t-1];
    dxiC[i,t]:=xiC[i,t]-xiC[i-1,t];
  end;
  {T}
end;
{.}

```

```

for i:=1 to (2*t-1) do begin
  Ti[i,t]:=Ti[i-1,t-1]+CTi[i-1,t-1]*(1-beta*Ti[i-1,t-1])*exp(alfa*Ti[i-1,t-1])*dt;
  xiT[i,t]:=xiT[i-1,t-1]+(Hw/H)*ViT[i-1,t-1]*dt;
  dxiT[i,t]:=xiT[i,t]-xiT[i-1,t];
end;
{.}
xiT[2*t,t]:=xiC[t,t];
CTi[2*t,t]:=Ci[t,t];
{T(C)}
for n:=1 to (2*t) do begin
  x1:=xiT[n-1,t];
  x2:=xiT[n,t];
  for i:=1 to (t-1) do begin
    if (x1<=xiC[i,t]) and (x2>=xiC[i,t]) then begin
      TCi[i,t]:=TempConc(x1,Ti[n-1,t],xiC[i,t],x2,Ti[n,t]);
    end;
  end;
end;
end;
{.}
{C(T)}
for n:=1 to (t) do begin
  x1:=xiC[n-1,t];
  x2:=xiC[n,t];
  for i:=1 to (2*t-1) do begin
    if (x1<=xiT[i,t]) and (x2>=xiT[i,t]) then begin
      CTi[i,t]:=TempConc(x1,Ci[n-1,t],xiT[i,t],x2,Ci[n,t]);
    end;
  end;
end;
end;
{.}
{V}
for i:=1 to t do begin
  ViC[i,t]:=ViC[i-1,t]+k*lyamda*Ci[i-1,t]*exp(alfa*TCi[i-1,t])*dxiC[i,t];
end;
for i:=1 to (2*t-1) do begin
  ViT[i,t]:=ViT[i-1,t]+k*lyamda*CTi[i-1,t]*exp(alfa*Ti[i-1,t])*dxiT[i,t];
end;
{.}
ViT[2*t,t] := ViC[t,t];
end;

{Cg}
for t:=1 to (dimension-1) do begin
  for i:=1 to t do begin

```

```

    Cgi[i,t]:=Cgi[i-1,t-1]+k*CTi[i-1,t-1]*exp(alfa*Ti[i-1,t-1])*dt;
end;
end;
{.}
{SumConc}
//writeln('SumConc[i,t]');
for t:=0 to (dimension-1) do begin
  for i:=0 to t do begin
    SumConc[i,t]:=Ci[i,t]+Cgi[i,t];
    //writeln(SumConc[i,t]);
  end;
//writeln;
end;
{.}
{Iiene yiee eiioaio?aoee}
found:=false;
shag:=-1;
for t:=0 to (dimension-1) do begin
  for i:=1 to t do begin
    if (Ci[i-1,t]<Ci[i,t]) and (Ci[i,t]<1E-10) then begin
      found:=true;
      shag:=t;
      break;
    end;
  end;
  if (found=true) then break;
end;
//writeln('shag=',shag);
//readln;
for i:=0 to shag do begin
  //writeln(f,xiC[i,shag], ' ',Ci[i,shag]);
end;
{.}
{Aaaeaiea}
for t:=0 to (dimension-1) do
  begin
    Pi[t,t]:=1;
  end;
for t:=1 to (dimension-1) do begin
  for i:=t downto 1 do begin
    //D=0.004032 //D=2/3!
    Pi[i-1,t]:=Pi[i,t]+(ViC[i,t]*dxiC[i,t])/(2/3);
  end;
end;
end;

```

```

{.}
{Auaia aaiuo}
//writeln(xiCg[i,t], ' ', 'Cgi[i,t]);
//writeln(ViC[i,t]);
{
for t:=0 to (dimension-1) do begin
  for i:=0 to t do begin
    //writeln(xiC[i,t], ' ', Pi[i,t]);
    //writeln(xiT[i,t], ' ', ViT[i,t]);
    //writeln(xiC[i,t], ' ', Cgi[i,t]);
    //writeln(ViC[i,t]);
    //writeln(f,xiC[i,t], ' ', Ci[i,t]);
  end;
  writeln;
end;
{.}
{Auaia a?aiiio oi?ae}
t:=20;
for i:=0 to (dimension-1) do
  //writeln(f,xiC[i,t], ' ', Ci[i,t]);
  //writeln(f,Cgi[i,t]);
  //writeln(f,xiT[i,t], ' ', Ti[i,t]);
  writeln(f,xiC[i,t], ' ', Pi[i,t]);
writeln;
{.}

{
for t:=0 to dimension-1 do begin
  for i:=0 to t do
    writeln(MU(Ci[i,t],Cgi[i,t]));
  writeln;
end;
}

//readln;
end.

```

Приложение 2. Программный код, реализованный в среде Borland Delphi 7, для численного решения системы уравнений о закачке бинарной смеси в пласт. Использован итерационный метод Зейделя Гаусса.

```
program Project1;
```

```
{$APPTYPE CONSOLE}
```

uses

SysUtils, Math;

type

array1 = array of Real;
array2 = array of array1;
array3 = array of array2;

const

E = 1E-4; //точность
{Вводные данные}
H = 4E-4; //высота
L = 15*H; //длина
nu = 1.006E-6; //кинематическая вязкость воды
g = 9.8; //ускорение свободного падения
Tokr = 293; //температура окр среды
beta = 3.02E-4; //коэф объемного расширения воды
ro = 1000; //плотность воды
Rb = 0.395E-3; //радиус пучка
hi = 0.143e-6; // температуропроводность воды
lyambda1 = 0.6; //теплопроводность воды
h1 = 40; //коэф теплообмена вода-воздух
W = 0.2; //мощность лазера
{/}
{Кол-во точек сетки}
X = 150; //Round(L/dx)+1;
Y = 10; //Round(H/dy)+1;
{/}
{Шаг сетки}
dy = H/(X-1);
dx = L/(Y-1);
{/}
{Комплексы}
//V = g*beta*T0*H*H/nu;
Qo = W/(3.14*(Rb+3.66E-4)*(Rb+3.66E-4));
T0 = Qo*H/lyambda1;
Temp = T0;
P = ro*g*beta*T0*H;
Gr = g*beta*T0*H*H*(nu*nu);
Pr = nu/hi;
Nus = H*h1/lyambda1;
{/}
{Константы для формул}
A = dy/(Pr*Gr*dx);

```

B = dx/(Pr*Gr*dy);
C = dy/(Gr*dx);
D = dx/(Gr*dy);
{/}

```

```

function Qrad(x:Real):Real;
begin
  Result:=Exp(-2*x*x/(Rb+3.66E-4)/(Rb+3.66E-4));
end;

var
  Fi, Omega, T:array3; //массивы решений
  i,j:Integer; //счетчики
  kolvo,k:LongInt; //счетчики контроля сходимости
  f:TextFile; //для записи в файл
begin
  {Задаем размерности массивов}
  SetLength(Fi,X,Y,2); // "0" - новые, "1" - старые расчетные данные
  SetLength(Omega,X,Y,2);
  SetLength(T,X,Y,2);
  {/}
  {Задаем начальные значения во всей сетке в "новых"}
  for j:=0 to (Y-1) do
  begin
    for i:=0 to (X-1) do
    begin
      Fi[i,j,0]:=0;
      Omega[i,j,0]:=0;
      T[i,j,0]:=Tokr/T0;
    end;
  end;
  {/}
  {Граничные}
  {for i:=0+1 to (X-1)-1 do
  begin
    //Omega[i,0,0]:=0.5;
    T[i,0,0]:=1.05;
  end;
  {/}
  k:=0;
  repeat
    kolvo:=0;
    {Перезаписываем в "старые" данные}
    for j:=0 to (Y-1) do

```

```

begin
  for i:=0 to (X-1) do
    begin
      Fi[i,j,1]:=Fi[i,j,0];
      Omega[i,j,1]:=Omega[i,j,0];
      T[i,j,1]:=T[i,j,0];
    end;
  end;
  {/}
  {Расчет новых}
  for j:=0 to (Y-1) do
    begin
      for i:=0 to (X-1) do
        begin
          if (i>0) and (i<(X-1)) and (j>0) and (j<(Y-1)) then //середина
            begin
              Fi[i,j,0]:=(1/(2*(dy*dy)+2*(dx*dx)))*(Fi[i+1,j,1]*(dy*dy)+
                Fi[i-1,j,0]*(dy*dy)+Fi[i,j+1,1]*(dx*dx)+Fi[i,j-
1,0]*(dx*dx)+Omega[i,j,1]*(dy*dy));
              Omega[i,j,0]:=(1/(Fi[i+1,j,1]-
Fi[i,j+1,1]+2*C+2*D))*(Omega[i+1,j,1]*(Fi[i,j,1]-Fi[i,j+1,1]+C)+
                Omega[i-1,j,0]*C+Omega[i,j,1]*(Fi[i+1,j,1]-Fi[i,j,1]+D)+Omega[i,j,0]*D+
                (T[i+1,j,1]-T[i,j,1])*dy/Gr);
              T[i,j,0]:=(1/(Fi[i+1,j,1]-Fi[i,j+1,1]+2*A+2*B))*(T[i,j,1]*(Fi[i,j,1]-
Fi[i,j+1,1]+A)+
                T[i-1,j,0]*A+T[i,j+1,1]*(Fi[i+1,j,1]-Fi[i,j,1]+B)+T[i,j-1,0]*B );
            end;
          if (i>0) and (i<(X-1)) and (j=0) then //низ
            begin
              Fi[i,j,0]:=0;
              Omega[i,j,0]:=-2/sqr(dy)*Fi[i,j+1,1];
              T[i,j,0]:=(1/(-Fi[i,j+1,1]+2*A+2*B+2*dy*Nus*B))*(T[i+1,j,1]*(-
Fi[i,j+1,1]+A)+
                T[i-1,j,0]*A+T[i,j+1,1]*2*B+(2*dy*h1*Tokr/Qo+2*dy*Qrad(i*dx))*B);
            end;
          if (j>0) and (j<(Y-1)) and (i=0) then //лево
            begin
              Fi[i,j,0]:=0;
              Omega[i,j,0]:=0;
              T[i,j,0]:=(1/(Fi[i+1,j,1]+A+2*B))*(T[i+1,j,1]*A+T[i,j+1,1]*(Fi[i+1,j,1]+B)+T[i,j-
1,0]*B);
            end;
          if (i>0) and (i<(X-1)) and (j=(Y-1)) then //верх

```

```

begin
  Fi[i,j,0]:=0;
  Omega[i,j,0]:=0;
  T[i,j,0]:=(1/(2*A+2*B+2*dy*Nus*B))*(T[i+1,j,1]*A+T[i-1,j,0]*A+T[i,j-
1,0]*2*B+2*dy*h1*Tokr/Qo*B);
  end;
  if (j>0) and (j<(Y-1)) and (i=(X-1)) then //право
  begin
    Fi[i,j,0]:=0;
    Omega[i,j,0]:=-2/sqr(dx)*Fi[i-1,j,0];
    T[i,j,0]:=(1/(A+2*B))*(T[i-1,j,0]*A+T[i,j+1,1]*B+T[i,j-1,0]*B);
  end;
  if (i=0) and (j=(Y-1)) then //верхний левый угол
  begin
    Fi[i,j,0]:=0;
    Omega[i,j,0]:=0;
    T[i,j,0]:=(1/(A+2*B+2*dy*Nus*B))*(T[i+1,j,1]*A+T[i,j-
1,0]*2*B+2*dy*h1*Tokr/Qo*B);
  end;
  if (i=(X-1)) and (j=(Y-1)) then //верхний правый угол
  begin
    Fi[i,j,0]:=0;
    Omega[i,j,0]:=0;
    T[i,j,0]:=(1/(A+2*B+2*dy*Nus*B))*(T[i-1,j,0]*A+T[i,j-
1,0]*2*B+2*dy*h1*Tokr/Qo*B);
  end;
  if (i=0) and (j=0) then //нижний левый угол
  begin
    Fi[i,j,0]:=0;
    Omega[i,j,0]:=0;
    T[i,j,0]:=(1/(A+2*B+2*dy*Nus*B))*(T[i+1,j,1]*A+T[i,j+1,1]*2*B+2*dy*h1*Tokr/Qo
*B+2*dy*Qrad(i*dx)*B);
  end;
  if (i=(X-1)) and (j=0) then //нижний правый угол
  begin
    Fi[i,j,0]:=0;
    Omega[i,j,0]:=0;
    T[i,j,0]:=(1/(A+2*B+2*dy*Nus*B))*(T[i-
1,j,0]*A+T[i,j+1,1]*2*B+2*dy*h1*Tokr/Qo*B+2*dy*Qrad(i*dx)*B);
  end;
end;
end;
{/}

```

```

{Проверяем на сходимость}
for j:=0+1 to (Y-1)-1 do begin
  for i:=0+1 to (X-1)-1 do begin
    if (Abs(Fi[i,j,0]-Fi[i,j,1])<=E) then Inc(kolvo);
    if (Abs(Omega[i,j,0]-Omega[i,j,1])<=E) then Inc(kolvo);
    if (Abs(T[i,j,0]-T[i,j,1])<=E) then Inc(kolvo);
  end;
end;
{/}
Inc(k);
until (k>1E2) or (kolvo>(3*X*Y));
{/}
{Вывод контроля сходимости}
Writeln('e = ',e:2:4);
Writeln('k = ',k,' > ',1E2:2:0);
Writeln('kolvo = ',kolvo,' > ',3*X*Y);
{/}
{Запись данных в блокноты}
AssignFile(f,'Fi.txt');
Rewrite(f);
for j:=(Y-1) downto 0 do begin
  for i:=0 to (X-1) do begin
    write(f,Fi[i,j,0],',');
  end;
  writeln(f,' ');
end;
CloseFile(f);
AssignFile(f,'Omega.txt');
Rewrite(f);
for j:=(Y-1) downto 0 do begin
  for i:=0 to (X-1) do begin
    write(f,Omega[i,j,0],',');
  end;
  writeln(f,' ');
end;
CloseFile(f);
AssignFile(f,'T.txt');
Rewrite(f);
for j:=(Y-1) downto 0 do begin
  for i:=0 to (X-1) do begin
    write(f,T[i,j,0],',');
  end;
  writeln(f,' ');
end;
end;

```

```
    CloseFile(f);  
    {/}  
    Readln;  
end.
```