

4. Показано удовлетворительное соответствие разработанных расчетных моделей и алгоритмов экспериментальным данным по мощности и КПД для двигателей в диапазоне от 50% до 100% от номинальной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 280 с.
2. Зарицкий С.П., Лопатин А.С. Диагностика газоперекачивающих агрегатов. Ч. 1-5. М.: Изд. РГУ им И. М. Губкина, 2003.
3. Сиротин Н.Н., Коровин Ю.М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 272 с.
4. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Елисеев Ю.С., Крылов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. М.: Высшая школа, 2002. 335 с.
5. Бондин Ю.Н. Зоря-Машпроект / Николаев: Изд. Юг-Информ, 2004. 120 с.
6. Вакулин А.А., Шабаров А.Б. Диагностика тепловых параметров в нефтегазовых технологиях. Новосибирск.: Наука, 1998. 384 с.
7. Микаэлян Э.А. Эксплуатация газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций газопроводов. М.: Недра, 1994. 304 с.
8. Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е. и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000. 640 с.
9. Бекнев В.С., Шабаров А.Б., Михальцев В.Е. Турбомашины газотурбинных и комбинированных установок / М.: Машиностроение, 1983. 392 с.
10. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 609 с.
11. Бекнев В.С., Леонтьев А.И., Шабаров А.Б. и др. Газовая динамика: Учебник для вузов / М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 1997. 671 с.
12. Топунов А.М. Теория судовых турбин. Л.: Судостроение, 1985. 472 с.

*Станислав Владимирович БУЧИНСКИЙ —
ведущий инженер
ООО «Нефтегазовый научный центр»,
аспирант Тюменского государственного университета*

*Александр Борисович ШАБАРОВ —
зав. кафедрой механики и многофазных систем
Тюменского государственного университета,
доктор технических наук, профессор*

*Андрей Николаевич БУРБАСОВ —
генеральный директор ОАО «Сибнефтегаз»*

УДК 624.139

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА МЕТАНОЛА
ПРИ СБОРЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

АННОТАЦИЯ. В результате проведенных исследований режимов работы реального газопровода Берегового газоконденсатного месторождения (Ямал)

предлагается использовать для регулирования расхода метанола на данном месторождении компьютерную программу, основанную на уточненной модели движения многофазной среды при наличии гидратообразования.

In case of researches have been made on conditional gas pipeline of Beregovoe raw gas field (Yamal), requires new computer program to use on, based on accurated liquid-flow model consist gas hydrates appears.

Промысловый транспорт газа от устья скважин до УКПГ на Береговом месторождении осуществляется посредством сети сборных газопроводов, имеющей такие особенности, как наличие или отсутствие теплоизоляции, наличие защитных кожухов при переходах через реки и автодороги, а также прокладка газопровода совместно с метанолпроводом. Исходя из этого, в рамках регулирования расхода ингибитора, предлагается использование интегрированной к промысловым условиям управляющей компьютерной программы, в основе которой лежит динамическая модель процессов движения и теплообмена многокомпонентной среды в продуктопроводах (газ, вода, стабильный конденсат, летучий и нелетучий ингибитор), учитывающая теплопередачу во всех реально применяемых типах конструкций.

Довольно большое внимание в существующей литературе уделено проблеме гидратообразования. Однако, в большинстве опубликованных работ проблема гидратообразования рассмотрена не достаточно полно и, в основном, носит обобщающий характер, как например в работах Истомина В.А. и Якушева В.С. [5, 8]. Математическое моделирование гидратообразования в трубопроводе в большинстве научных трудов на эту тему базируется на составлении и решении систем уравнений, описывающих движение газа. В работе [9] рассмотрена система нелинейных уравнений в частных производных гиперболического типа для одномерного изотермического течения газа с постоянным распределением параметров по длине трубопровода. Данная система уравнений составляется на основе законов сохранения массы, энергии и количества движения. Для упрощения исходной системы плотность газа принимается постоянной во всем пространстве, так как скорость течения газа значительно ниже скорости звука. Система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial x} - \lambda \frac{\rho w^2}{2D}; \\ -\frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ — плотность газа, w — скорость течения газа, p — давление в газопроводе, λ — коэффициент гидравлического сопротивления, D — диаметр трубопровода. В работе также предложены модификации данной системы уравнений:

параболического типа — для длинных газопроводов (когда $\frac{D}{L} < 5 \cdot 10^4$) и для

плавных течений газа; гиперболического типа — для коротких газопроводов

(когда $\frac{D}{L} > 5 \cdot 10^4$) и в случае малого трения.

Известные опубликованные работы [5, 8-9] не содержат универсального алгоритма расчета гидратообразования, учитывающего реальные типы прокладки трубопроводов в условиях промыслов ЯНАО и других регионов.

Разработанные нами физико-математическая модель и компьютерная программа «Gashydrate» предназначены для анализа течения среды при возможном гидратообразовании в трубопроводах трех конструктивных схем (рис. 1-3), отражающих пять основных типов прокладки трубопровода, существующих на месторождении.

На рис. 1-3 обозначено: D_N — внутренний диаметр канала, образованный слоем газогидрата, м; D_1 — внутренний диаметр трубы газопровода, м; D_2 — внешний диаметр трубы газопровода, м; D_3 — внутренний диаметр кожуха (внутренний диаметр изоляции для 2 схемы), м; D_4 — внешний диаметр кожуха, м; Q_v — удельный тепловой поток от трубы метанолпровода, Вт/м; Q_h — удельный тепловой поток, выделяется при образовании гидрата, Вт/м.

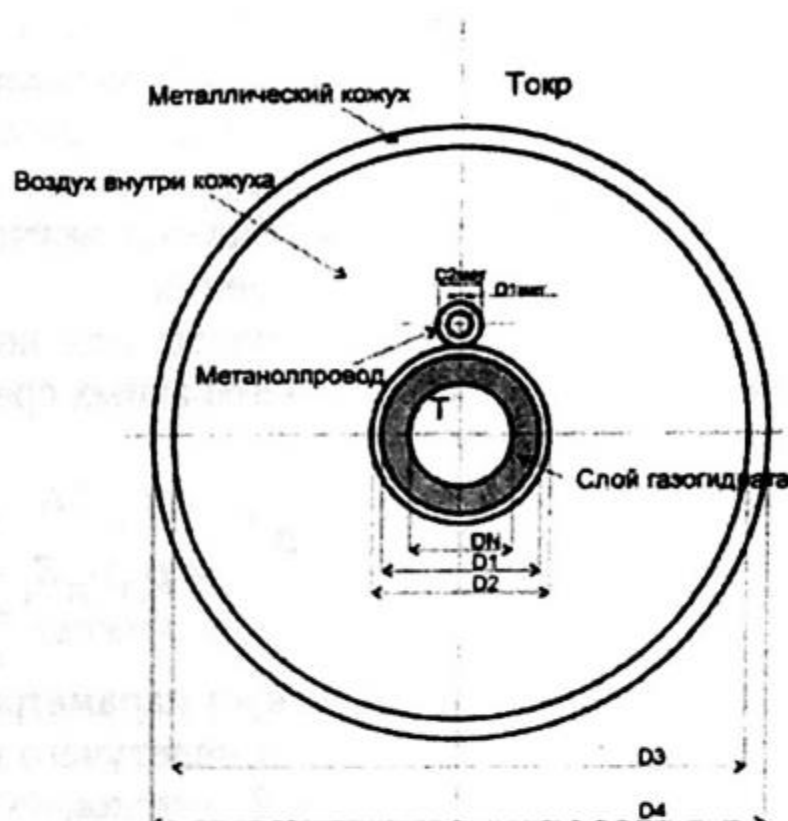


Рис. 1. Схема прокладки трубопровода в кожухе

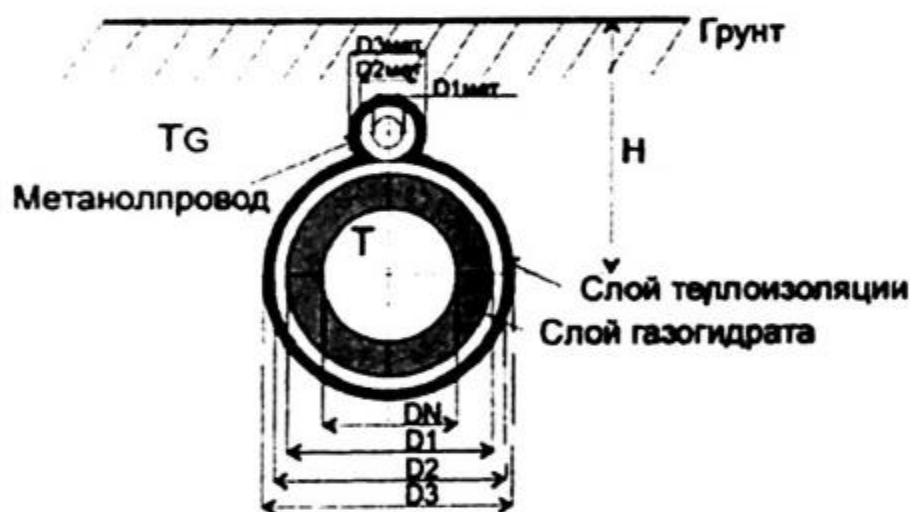


Рис. 2. Схема прокладки трубопровода в грунте с теплоизоляцией

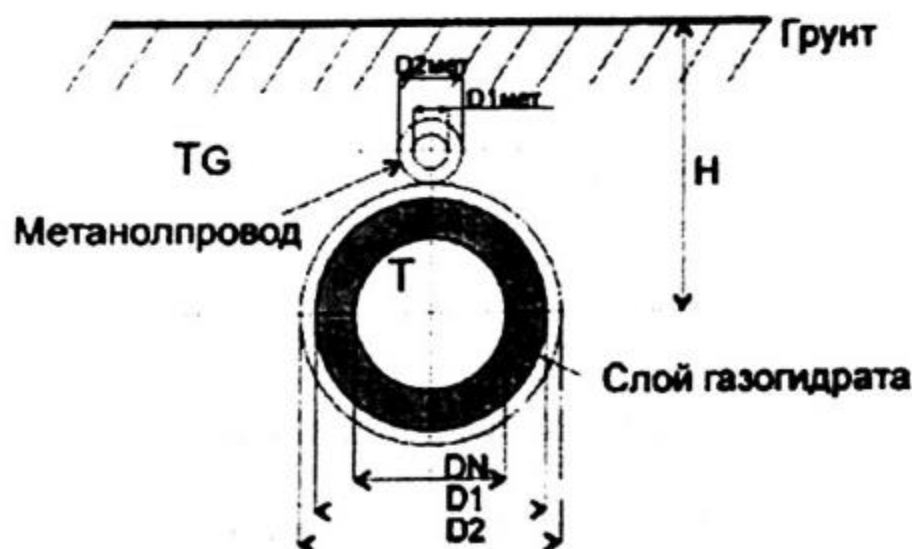


Рис. 3. Подземная прокладка трубопровода без теплоизоляции

Модель основана на системе расчетных уравнений, с помощью которой рассчитываются параметры газа в выходном сечении контрольного объема длиной Δx , на которые разбит участок трубопровода. Систему расчетных уравнений образуют: уравнение баланса массы (расхода), уравнение Бернулли с учетом массообмена, уравнение баланса внутренней энергии и состояния, дополнительные замыкающие соотношения.

Уравнение баланса массы для контрольного объема запишется из общих уравнений динамики многофазных сред применительно к промышленным условиям в следующем виде:

$$V \frac{\rho_i^{(n+1)} - \rho_i^n}{\Delta t} = \rho_{i1} v_{i1} S_1 - \rho_{i2} v_{i2} S_2 - \rho_i v'_i S' + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I_{ji} \cdot V, \quad (2)$$

где $i=1, 2, 3, 4$ соответствует параметрам газа, воды, стабильного и нестабильного конденсата, летучего и нелетучего ингибитора; $\rho_i v_i S_i = G_i$ — массовый расход фазы в потоке через 1 и 2 сечения;

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n I_{ji} \cdot V = G_{\phi i} \text{ — массовый расход среды, поступившей в } i\text{-ю фазу за счет}$$

фазовых переходов и химических реакций в контрольном объеме V ;

$\rho_i v'_i S'_i = G'_i$ — подвод фазы за единицу времени через боковую поверхность;

$$V \frac{\rho_i^{(n+1)} - \rho_i^n}{\Delta t} = \tilde{G}_i \text{ — масса } i\text{-той фазы, накопленной в контрольном объеме}$$

за единицу времени.

Уравнение баланса количества движения в контрольном объеме длиной Δx для модели с общим давлением фаз записывается для смеси в целом:

$$\frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_{cp}} + g \cdot z_2 = \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_{cp}} + g \cdot z_1 + l_{\text{вн}}^* - l_{\text{тр}} + \tilde{l} + l', \quad (3)$$

где $\rho_{cp} = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ — средняя плотность смеси;

v_1, v_2 — скорость потока в 1 и 2 сечении;

P_1, P_2 — давление смеси в 1 и 2 сечении;

$l_g = -gdz$ — работа сил тяжести;

$l_{\text{вн}}^* = \frac{F_{\text{тх}}}{\rho V} dx$ — удельная работа внешних сил (Дж/кг), где $F_{\text{тх}}$ — проекция

массовых сил, действующая на V ;

$l_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v_1^2}{2}$ — удельная работа, затрачиваемая на преодоление сил трения о

стенки и местные сопротивления, где l — длина участка, d — внутренний диаметр, $\lambda(\text{Re}, \Delta r)$ — коэф. трения, зависящий от числа Рейнольдса и относительной шероховатости трубы;

$\tilde{l}_i = \frac{dv}{dt} dx$ — удельная работа сил инерции;

$l' = \frac{G'}{G} \times u_1^2$ — работа сил, связанная с обменом импульсом при подводе или отводе массы через боковую поверхность.

Уравнение энергии с учетом некоторых пренебрежений и допущений запишется следующим образом:

$$T_2 = T_1 = \Delta T_{\text{внеш}} + \Delta T_{\text{тр}} + \Delta' T + \Delta T_R, \quad (4)$$

где изменение температуры $\Delta T_{\text{внеш}} = \frac{Q_{\text{внеш}}}{G_2 c}$ связано с окружающей средой,

$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{тр}}}{G_2 c}$ — определяется вязкой диссипацией,

$\Delta T' = \frac{G'(U_1 - U')}{G_2 c}$ — вызвано массообменом при гидратообразовании,

$\Delta T_R = \frac{1}{G c} (G_g c_{pg} D_{ig})(P_1 - P_2)$ — отражает снижение температуры смеси за счет эффекта Джоуля—Томпсона в реальном несовершенном газе

$$c = \frac{1}{G} (G_g c_{vg} + G_p c_{vp} + G_w c_w + G_m c_m).$$

Интенсивность отложения газогидрата полностью лимитируется процессом поступления влаги к поверхности газогидратного слоя. Пусть к поверхности газогидрата гидратообразователи поступают в достаточном количестве. Тогда интенсивность образования твердого газогидрата ограничивается лишь интенсивностью теплоотвода от поверхности фазовых переходов (поверхности газогидрата). В этом случае считается, что температура поверхности фазовых переходов T_σ (которая является одновременно температурой внутренней стенки трубопровода на участке, где откладывается газогидрат) изотермична и равна равновесной температуре гидратообразования T_s . Следовательно, интенсивность отложения газогидрата в этом режиме будет определяться из условия теплового баланса на поверхности газогидратного слоя.

$$J_h = \frac{\pi}{l_s \sum_{k=2}^N R_k} \left[T - T_G - q_z \sum_{k=1}^N R_k \right]; \quad (5)$$

$$q_z = \alpha_1 \pi d_N (T - T_s), \quad (6)$$

где q_z — тепловой поток, отнесенный к 1 метру трубопровода от газа к газовому гидрату при условии гидратообразования, Вт/м; R_k — термические сопротивления; l_s — удельная теплота фазового перехода при гидратообразовании;

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 d_N}; \quad R_2 = \frac{\ln \frac{d_1}{d_N}}{2\lambda_h}; \quad R_3 = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\lambda_v}; \quad R_4 = \frac{1}{\alpha_2 d_2} \quad \text{— термические сопротивления}$$

соответственно: при переносе тепла от газа к гидрату, слоя гидрата, стенки трубопровода и при переносе тепла от внешней стенки трубы в грунт;

$$\alpha_2 = \frac{2\lambda_{sp}}{d_2 \ln \left[\frac{2H}{d_2} + \sqrt{\left(\frac{2H}{d_2}\right)^2 - 1} \right]} \quad \text{— коэффициент теплоотдачи от внешней стенки}$$

трубы к грунту; H — глубина залегания трубопровода; $\lambda_h, \lambda_m, \lambda_{sp}$ — коэффициенты теплопроводности газового гидрата, металла и грунта; d_N, d_1, d_2 — внутренний диаметр канала, образуемый гидратом, внутренний и внешний диаметры трубопровода; l_s — удельная теплота фазовых переходов при гидратообразовании; T — текущая температура при данном расстоянии от устья, которая находится из уравнения энергии (4).

Алгоритм расчета выглядит следующим образом: для схем 1-3 находятся термические сопротивления для разных условий гидратообразования: если гидрат не образуется, то D_N принимается равным D_1 . Расчет процесса тепломассопереноса в целом носит итерационный характер. После нахождения термических сопротивлений находится тепловой поток от газа:

$$Q_g = \frac{1}{\sum_{k=1}^N R_k} \left[(T - T_G) \cdot \pi - Q_h \sum_{k=2}^N R_k - Q_v \sum_{k=4}^N R_k \right]; \quad \text{температуры стенок; если гид-}$$

рат в контрольном объеме образуется, то уточняется Q_g :

$$Q_g = \frac{1}{R_1} [(T - T_s) \cdot \pi], \quad \text{если не образуется, то } Q_g = \frac{1}{R_1} [(T - T_{cm1}) \cdot \pi]. \quad \text{Исходя из}$$

этого рассчитываются параметры в выходном сечении. Расчет конструкции 3 отличается от конструкции 2 только отсутствием слоя теплоизоляции, т.е. $D_3 = D_2$.

Созданная компьютерная программа, работающая по изложенной схеме, содержит пользовательский интерфейс, позволяющий организовать диалог пользователя с программой, а также преобразовывать массивы выходных данных в таблицы и графики. Пример окна задания исходных данных приведен на рис. 4.

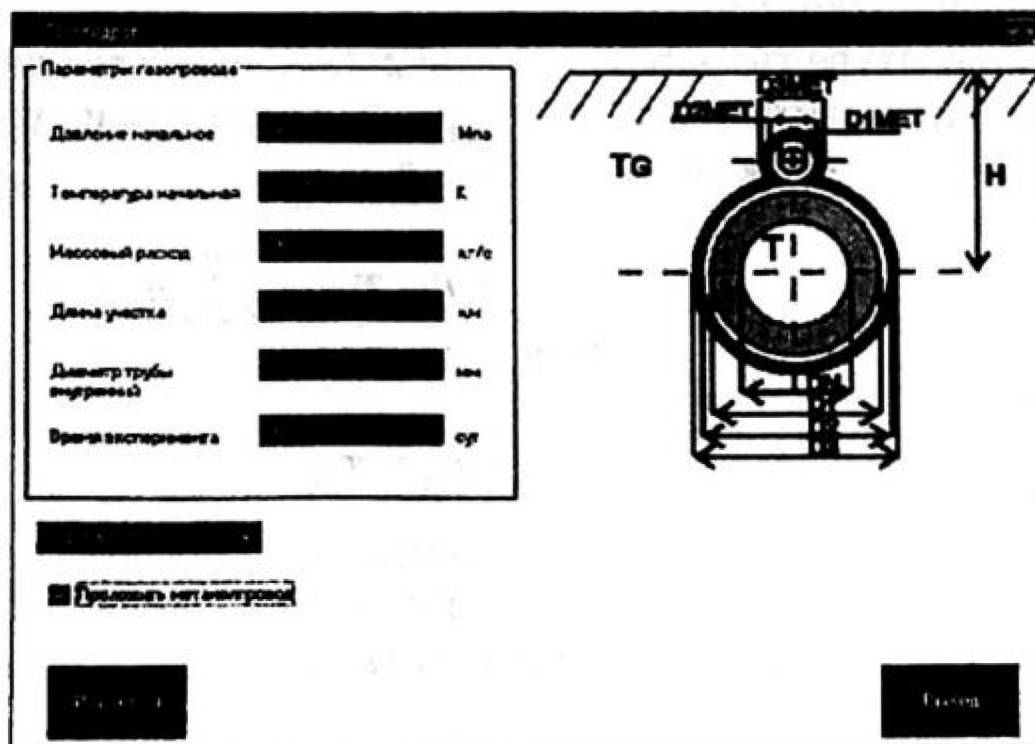


Рис. 4. Окно задания исходных данных

Тестирование разработанной программы «Gashydrate» проведено для условий конструкции 3 путем сопоставления с данными работы [4].

Был произведен расчет реального истечения сырого газа согласно промышленным данным по режиму работы скважины №260 Берегового месторождения для участка трубопровода (от скважины до гидроузла) с диаметром $D=0.22$ м и толщиной стенок $\delta=0.011$ м, температура грунта составляла $T_c=273$ К (0°C). Для подаваемого в трубопровод после сепарации газа из скважины использовались следующие значения удельной теплоемкости, приведенной газовой постоянной, коэффициента теплопроводности и динамической вязкости: $c_g=2911$ Дж/(кг*К); $R_g=490$ Дж/(кг*К); $\lambda_g=0.03$ Дж/(м*с*К); $\mu_g=11 \cdot 10^{-6}$ кг/(с*м). Для коэффициентов кинематической вязкости приняты следующие значения: $\nu_{\text{возд}}=15.5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\nu_w=0.48 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\nu_M=0.48 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для числа Прандля: $Pr_w=7.0$; $Pr_g=0.7$; $Pr_M=7.0$; $Pr_v=0.7$. Для параметров газового гидрата и метанола приняты следующие значения: $\lambda_h=2.2$ Дж/(м*с*К); $\lambda_M=0.659$ Дж/(м*с*К); $\rho_h=917$ кг/м³; $\rho_M=815$ кг/м³; $K_{gh}=0.1$. Для коэффициента теплопроводности металла, грунта, снега и воздуха: $\lambda_{\text{МЕТ}}=74$ Дж/(м*с*К); $\lambda_G=2$ Дж/(м*с*К); $\lambda_{\text{сн}}=2.2$ Дж/(м*с*К); $\lambda_{\text{возд}}=0.0244$ Дж/(м*с*К). Начальная температура гидратообразования $T_{s0}=282.630$ К; эмпирические коэффициенты $T_{w*}=5100$; $T_{h*}=8.28$; $P_{w*}=9.3 \cdot 10^{10}$; Глубина заложения трубопровода $H=1$ м. Для водяного пара и воды приняты следующие значения параметров: $R_v=461$ Дж/(кг*К); $R_w=1000$ Дж/(кг*К); $\lambda_v=0.03$ Дж/(м*с*К); $\lambda_w=0.659$ Дж/(м*с*К); $c_w=4180$ Дж/(кг*К); $c_v=1405$ Дж/(кг*К). Теплота фазового перехода конденсации пара и образования гидрата: $l_v=2.43 \cdot 10^6$ Дж/кг; $l_h=2.3 \cdot 10^6$ Дж/кг. Параметры газа на входе задавались равными: $P_0=3.2$ МПа, $T_0=323.15^\circ\text{K}$, $G=0.683$ кг/с ($V_g=0.89$ м³/с), $k_{w0}=3 \cdot 10^{-3}$.

Важно отметить, что для вышеприведенных параметров смеси точка росы наступает (одновременно в потоке и возле стенки трубопровода) уже в нулевом сечении при температуре газа 50°C .

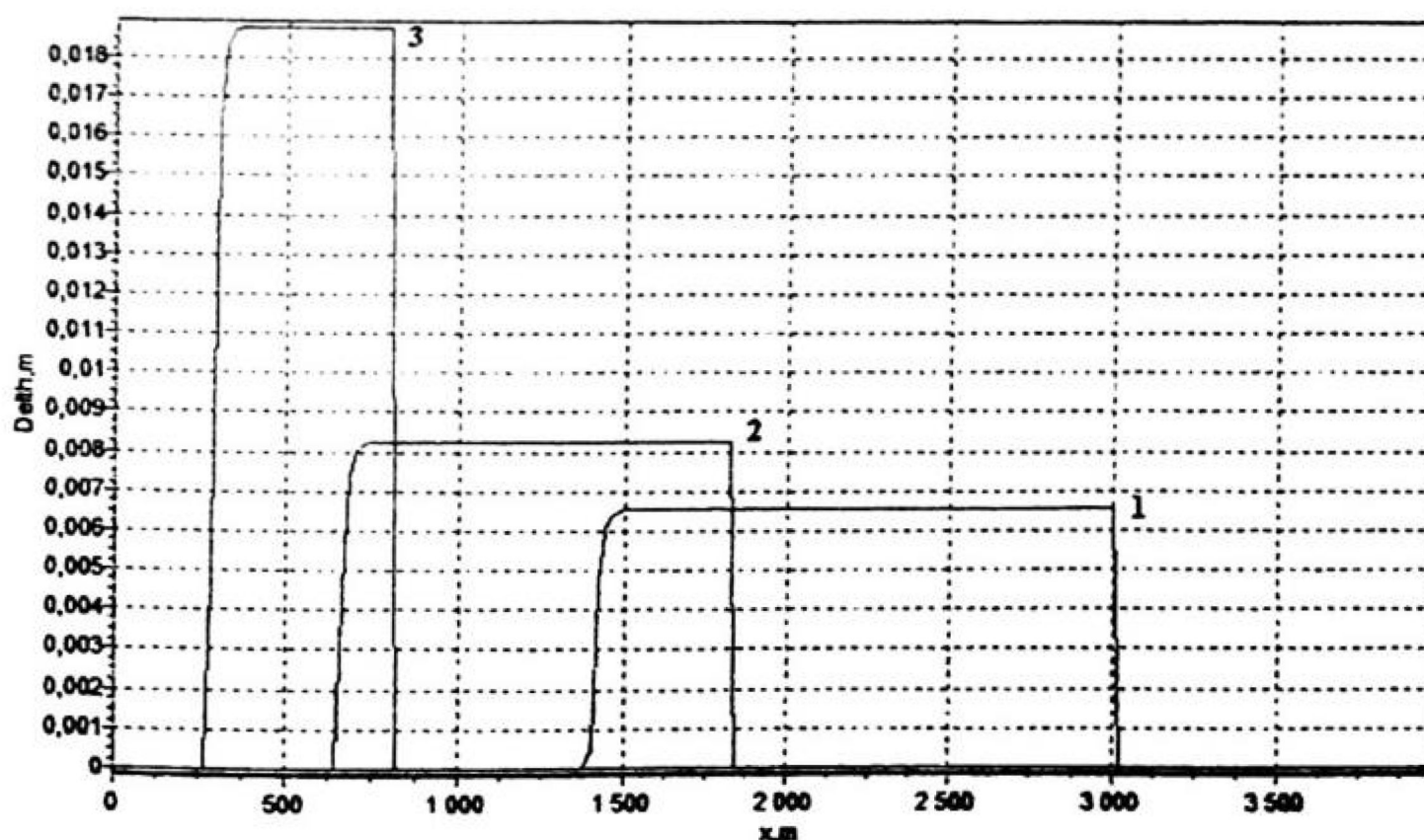


Рис. 5. Изменение толщины гидратной пробки по длине трубопровода (1-3 типы конструкций)

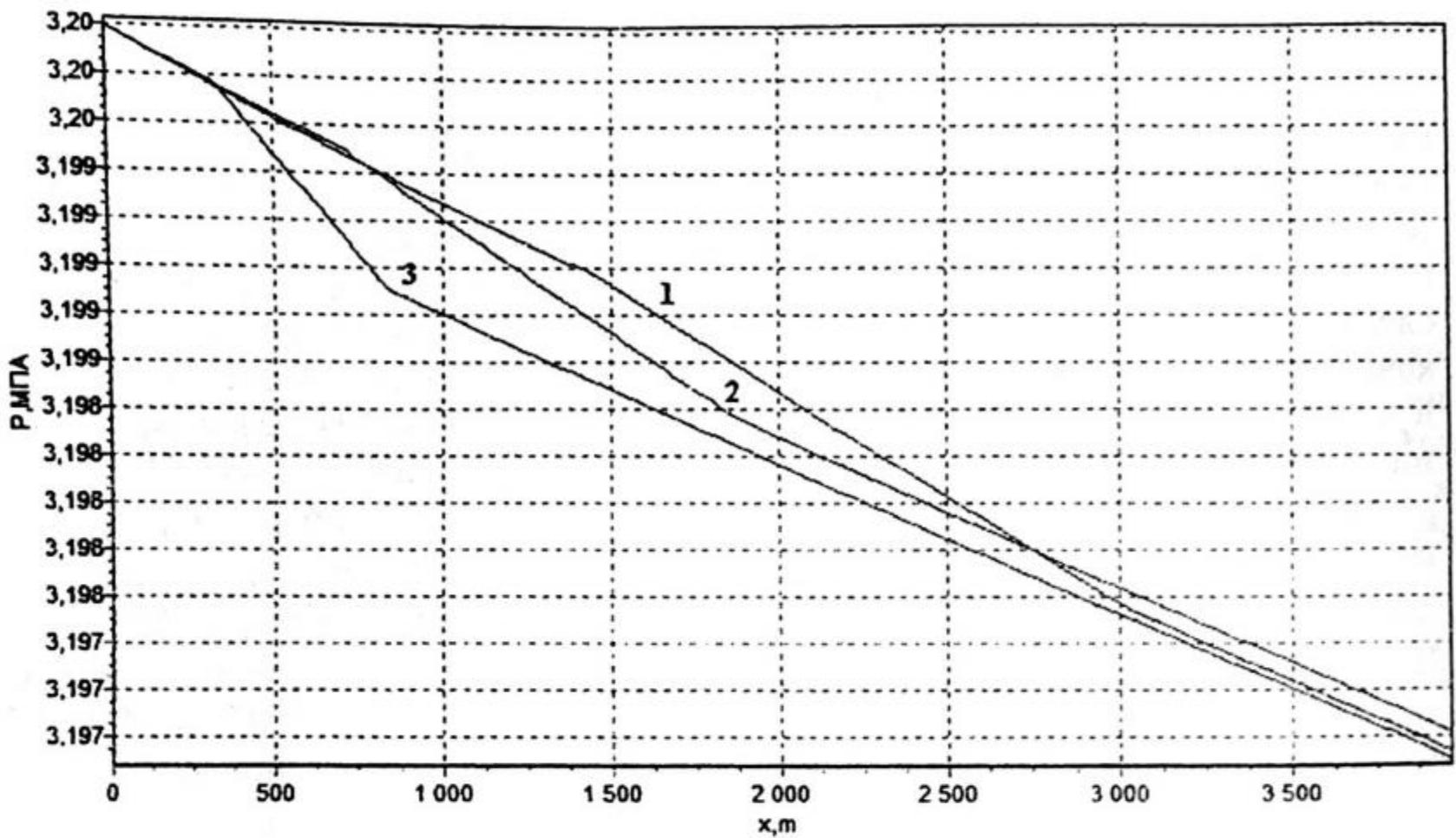


Рис. 6. Изменение давления по длине трубопровода
(1-3 типы конструкций)

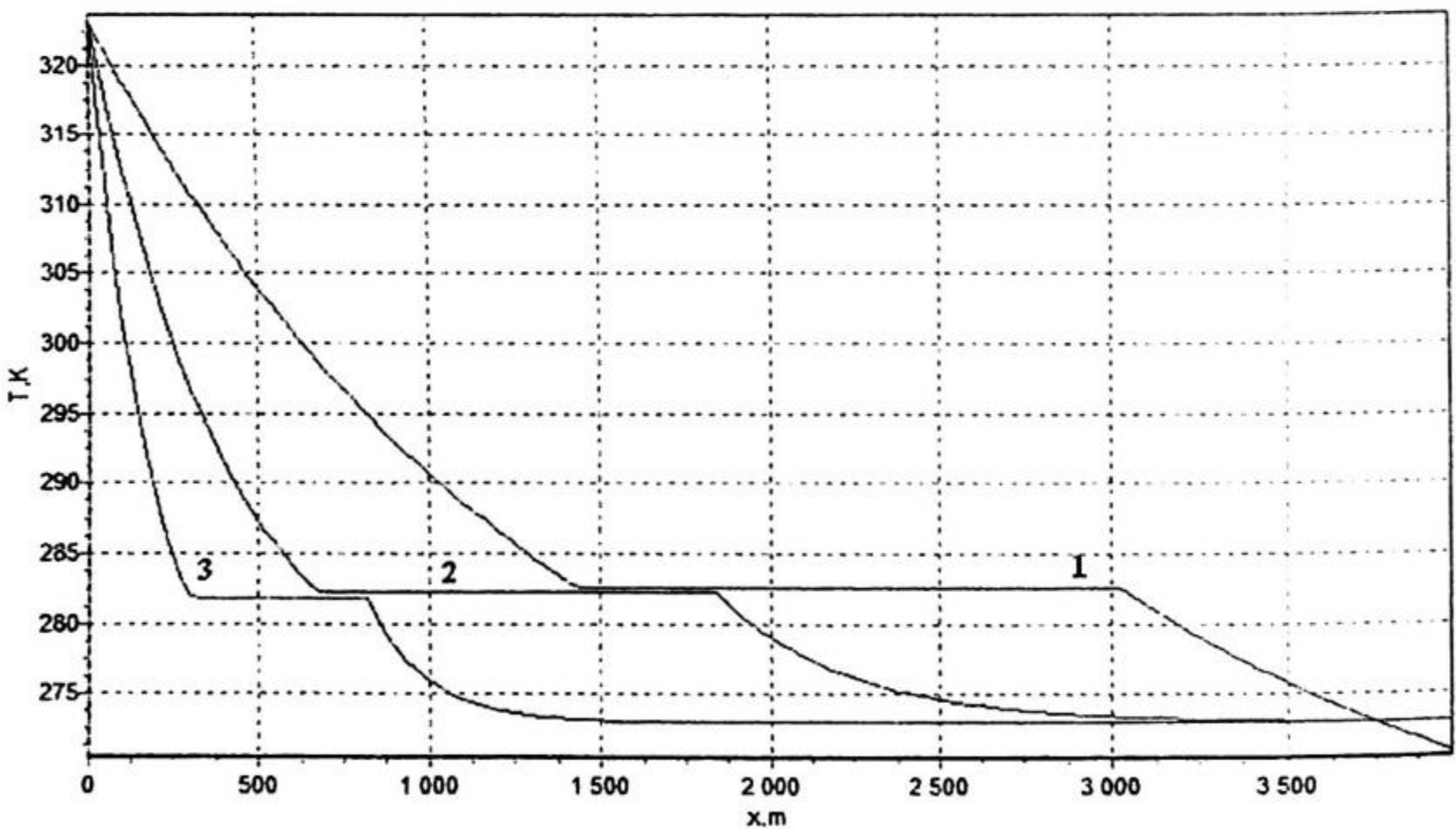


Рис. 7. Изменение температуры по длине трубопровода
(1-3 типы конструкций)

На рис. 8 рассмотрено влияние закачки метанола на толщину гидратного слоя в трубопроводе. В первом случае закачка не ведется, во втором — расход метанола составил 60 кг/сут, в третьем — 120 кг/сут.

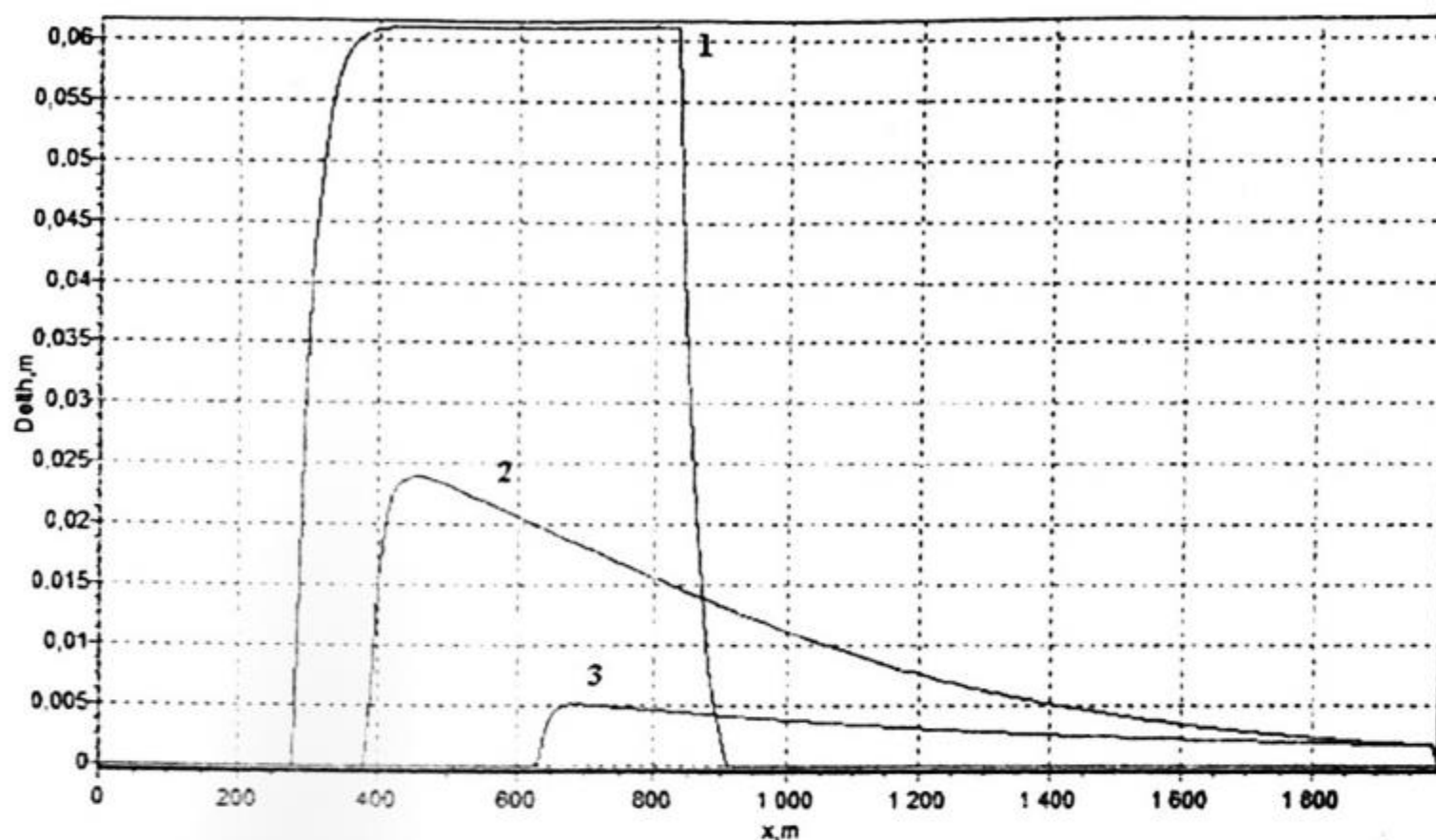


Рис. 8. Изменение толщины гидратного слоя по расходам метанола (1-0 кг/сут, 2-60 кг/сут, 3-120 кг/сут)

Заключение.

1. На основе разработанной физико-математической модели течения многокомпонентной смеси (газ, влага, метанол в различных фазах) созданы алгоритм и компьютерная программа, позволяющие рассчитывать процессы образования и диссоциации газовых гидратов для реальных конструкций, применяемых при прокладке трубопроводов.

2. Установлено, что тип конструкции газопровода оказывает существенное влияние на интенсивность гидратообразования, положения газогидратных пробок, температуры газа в трубопроводе, интенсивность разложения газогидратов, величины необходимых расходов метанола и другие термогазодинамические параметры.

3. Получены данные о распределении давления, температуры, толщины гидратной пробки по длине трубопровода в зависимости от типов конструкций при различных внешних условиях. Определен оптимальный расход метанола, необходимый для предотвращения гидратообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабаров А.Б., Бекнев В.С., Леонтьев А.И. Газовая динамика. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1997.
2. Земенков Ю.Д. Техническая и параметрическая диагностика в трубопроводных системах: Учебное пособие. Тюмень: Вектор Бук, 2002.
3. Гриценко А.И., Истомин В.А., Кульков А.Н., Сулейманов Р.С. Сбор и промысловая подготовка газа на северных месторождениях России. М.: Недра, 1999.
4. Уразов Р.Р. Динамика накопления и диссоциации газогидратных отложений в действующих газопроводах. Дисс. ... канд. физ.-матем. наук, ТюмГУ, 2005.
5. Истомин В.А., Бурмистров А.Г., Дегтярев Б.В., Лакеев В.П., Тихонов В.Т. Предупреждение гидратообразования в системах сбора и внутрипромыслового транспорта углеводородного сырья. М.: ВНИИЭгазпром, 1991.
6. Проект обустройства сеноманской залежи Берегового газоконденсатного месторождения. Саратов: ВНИПИгаздобыча, ОАО «Газпром», 2000.
7. Бухгалтер Э.Б. Метанол и его использование в газовой промышленности. М.: Недра, 1986. 238 с.
8. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 41 с.

9. Александров А.В., Яковлев В.И. Математическое описание и методы анализа нестационарных процессов в газопроводах. М.: ВНИИЭгазпром, 1970. 30 с.
10. Hammersmidt E.G., Ind.Eng.Chem.26 (1934)851.
11. Natural gas hydrates, Energy information administration, International Energy Outlook 1998, DOE/EIA-0484(98) (Washington, DC, April 1998).

Сергей Павлович РОДИОНОВ —
главный научный сотрудник
Тюменского филиала Института теоретической и
прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Любовь Николаевна ОРЕХОВА —
аспирант
Тюменского государственного университета

УДК 532.546

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АПСКЕЙЛИНГЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

АННОТАЦИЯ. В статье предложена методика определения тензоров модифицированных относительных фазовых проницаемостей при преобразовании геологической модели в гидродинамическую (upscaling). Методика основана на решении задачи двухфазной фильтрации внутри крупной ячейки.

The method of evaluation of upscaled tensors of relativity phase permeabilites is presented. A basis of methods is solved of two phase filtration problem in coarse cell.

В настоящее время при моделировании разработки нефтяных месторождений широко применяются трехмерные численные гидродинамические модели многофазной фильтрации. Гидродинамические модели создаются на основе геологических моделей нефтяных месторождений, которые в некоторых случаях могут содержать настолько большое количество ячеек разностной сетки, что время расчетов становится неприемлемым. Поэтому необходимо уменьшить количество ячеек путем объединения мелких ячеек геологической сетки в крупные ячейки гидродинамической сетки. Эквивалентные фильтрационно-емкостные параметры крупных ячеек, которые зависят от параметров составляющих их мелких ячеек, естественно определить таким образом, чтобы различие результатов расчетов на исходной и укрупненной сетках было минимальным. Такая процедура в зарубежной литературе называется up'scaling (ремасштабирование) геологической модели в гидродинамическую. В последнее время теория up'scaling'a интенсивно развивается за рубежом (см., например, [1, 2]). Число отечественных публикаций по этой теме значительно меньше. Как отмечается в [1], завершенная теория up'scaling'a в настоящее время еще не построена.

Эквивалентными параметрами укрупненных ячеек, необходимыми для гидродинамических расчетов, являются пористость горной породы, насыщенности фаз и абсолютная проницаемость пористой среды. Вопросы определения эквивалентных или модифицированных относительных фазовых проницаемостей при up'scaling'e отражены в обзорах [3, 4].