

УДК 532.546

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА*

Н.Г. МУСАКАЕВ¹, Р.Р. УРАЗОВ², В.Ш. ШАГАПОВ²

¹Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

²Стерлитамакская государственная педагогическая академия

На основе уравнений и методов механики многофазных сред моделируются гидродинамические, теплофизические и тепломассобменные процессы, происходящие при течении природного газа в горизонтальном трубопроводе с учетом образующихся на внутренних стенках канала отложений газовых гидратов. Проведено численное исследование влияния некоторых факторов на процесс гидратообразования.

Эксплуатация трубопроводов, транспортирующих влажный природный газ, часто бывает затруднена в силу ряда причин. Одной из таких причин является отложение газовых гидратов — негативное явление, проявляющееся в нарастании газогидратной корки на внутренних стенках трубопровода, что приводит к частичному или полному закупориванию проходного сечения, и как следствие, к снижению дебита или даже аварийной ситуации [1–3]. Несмотря на то, что подобное явление достаточно часто наблюдается на практике, оно и по сей день является не до конца изученным, а на некоторые вопросы до сих пор нет ответов. Так, в частности, с помощью инженерных расчетов можно с большой точностью предсказать в каком трубопроводе и на каком его участке будут образовываться гидраты, но определить, с какой скоростью будет протекать данный процесс, довольно сложно [1, 4]. Мало изученным также является вопрос о степени влияния на динамику гидратообразования различных факторов, например, таких как влагосодержание газа, температура окружающего грунта и т. п.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Влажный природный газ с заданным компонентным составом транспортируется в горизонтальном канале, на внутренних стенках которого образуются газовые гидраты. Вода, содержащаяся в газовом потоке, может находиться в двух агрегатных состояниях: в виде пара и в виде капелек жидкости. Фазовые переходы влаги происходят в равновесном режиме. Основные линейные характеристики трубы: L — длина рассматриваемого трубопровода, a_0 и a_1 — внутренний и внешний радиус, a_2 — радиус трубопровода при наличии теплоизоляции. Гидраты образуют на внутренних стенках трубы радиально-симметричный слой отложений толщиной δ (рис. 1); $a = a_0 - \delta$.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант НШ-7055.20061).

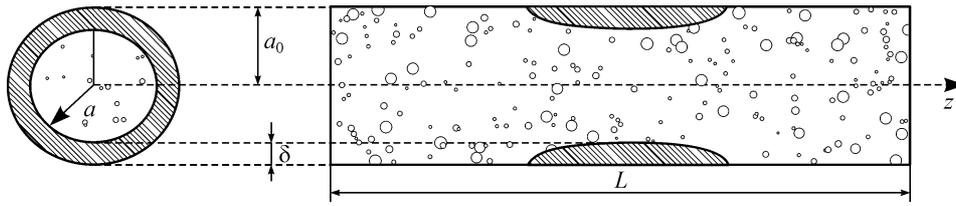


Рис. 1. Схема трубопровода, на внутренних стенках которого образуется газогидратный слой (поперечное и продольное сечения).

Введем ряд упрощающих допущений: потери газа на образование гидратов пренебрежимо малы, поэтому его расход по длине трубы остается постоянным; скорость течения газа гораздо меньше скорости звука; движение газа в трубе рассматривается в гидравлической постановке; значения давления и температуры потока принимаются средними по сечению трубы; температура для каждого сечения канала одинакова для обеих фаз (газа и жидкости); газ считается идеальным. Ось z направим по течению газа, ее начало совпадает с входным сечением трубопровода.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Приведенные выше допущения позволяют для описания движения газа использовать стационарные уравнения неизотермического течения газа в канале в квазиодномерном приближении [5]:

$$m_g \frac{dw_g}{dz} = -S \frac{dp}{dz} - f, \quad (1)$$

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dz} = \frac{m_g}{\rho_g} \frac{dp}{dz} + m_g l_w \frac{dk_l}{dz} - Q_{g\sigma}, \quad (2)$$

где $f = 2\pi a \tau$, $\tau = 0,125 \lambda \rho_g w_g^2$, $\lambda = \{ 1,8 \lg(\text{Re}) - 1,5 \}^{-0,5}$, $\text{Re} = 2a \rho_g w_g / \mu_g$, $Q_{g\sigma} = 2\pi a q_{g\sigma}$, m_g , w_g , ρ_g , c_g и μ_g — массовый расход, скорость, плотность, удельная теплоемкость и коэффициент динамической вязкости газа соответственно; p — давление газа; f и λ — сила и коэффициент гидравлического сопротивления соответственно; S — площадь поперечного сечения канала; T_g — температура газа; l_w — скрытая теплота парообразования воды; $Q_{g\sigma}$ — интенсивность отвода тепла, отнесенная к единице длины трубопровода.

В уравнении сохранения импульсов (1) учтено гидравлическое сопротивление стенок трубопровода, в уравнении сохранения энергии (2) — тепловые эффекты конденсации пара и отвода тепла к внутренней стенке канала.

Вода, содержащаяся в потоке, будет расходоваться на образование газогидратов, поэтому закон сохранения массы для воды можем записать в следующем виде:

$$m_g \frac{dk_w}{dz} = -J_w, \quad J_w = 2\pi a j_w, \quad (3)$$

где j_w — интенсивность расхода воды на гидратообразование.

Примем: влага, содержащаяся в газовом потоке с массовой концентрацией k_w , может находиться в двух агрегатных состояниях — в виде жидких капелек с концентрацией k_l и в виде пара в газовой фазе с массовой концентрацией k_v . Массовое содержание воды k_w связано с k_l и k_v следующим соотношением:

$$k_w = k_l + (1 - k_l) k_v. \quad (4)$$

Уравнения (1)–(4) замыкаются условием постоянства массового расхода газа

$$m_g = m_{g0} = \text{const}, \quad (5)$$

где

$$m_g = \rho_g w_g S, \quad S = \pi a^2,$$

уравнением для распределения равновесной концентрации водяного пара вдоль трубопровода

$$k_v = \frac{p_{v*} R_g}{p R_v} \exp\left(-\frac{T_{v*}}{T_g}\right), \quad (6)$$

условием термодинамического равновесия для гидрата [1]

$$T_s(p) = T_{h*} \ln(p/p_{s0}) + T_{s0} \quad (7)$$

и уравнением состояния для газа $p_g = \rho_g R_g T_g$.

Здесь $T_s(p)$ — равновесная температура гидратообразования, p_{v*} , T_{v*} и T_{h*} — эмпирические параметры, R_g и R_v — приведенные газовые постоянные для газа и водяного пара.

Кроме того, для однозначного решения указанной системы уравнений необходимо записать соотношение, определяющее текущее положение границы газовый поток–газогидрат,

$$\partial \delta / \partial t = j_h / \rho_h, \quad (8)$$

где j_h — интенсивность гидратообразования, ρ_h — плотность гидрата, t — время.

Примем, что отложение газовых гидратов начинается в сечении канала $z = z_s$, где на стенках конденсируется вода и выполняется условие $T_\sigma \leq T_s(p)$ (T_σ — температура внутренней поверхности канала). При этом отложение может происходить в двух режимах, а именно: теплового баланса и дефицита воды.

Первый режим реализуется в тех участках трубы, на которых вода в газовом потоке содержится в достаточном количестве. В этом случае интенсивность образования газогидратов лимитируется отводом тепла от внутренней поверхности трубы и определяется из условия теплового баланса на границе раздела газ–гидрат

$$l_h j_h = q_{\sigma G} - q_{g\sigma} \quad (9)$$

с учетом соотношения, определяющего интенсивность теплоотдачи от потока к внутренней стенке канала:

$$q_{g\sigma} = \alpha_{g\sigma} (T_g - T_\sigma), \quad (10)$$

$$\alpha_{g\sigma} = \lambda_g \text{Nu} (2a)^{-1}, \quad \text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}, \quad \text{Pr} = \mu_g c_g / \lambda_g,$$

здесь l_h — удельная теплота гидратообразования, динамическая вязкость μ_g , теплоемкость c_g и коэффициент теплопроводности газа λ_g определены при средней температуре потока.

Интенсивность теплопередачи между стенкой трубопровода и грунтом примем в виде [2]:

$$q_{\sigma G} = \alpha_{\sigma G} (T_\sigma - T_G), \quad (11)$$

$$\alpha_{\sigma G} = \frac{1}{a} \left\{ \frac{1}{\lambda_h} \ln \frac{a_0}{a} + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{a_i}{a_{i-1}} + \frac{2}{\lambda_G} \ln \left(\frac{h}{a_2} + \sqrt{\left(\frac{h}{a_2} \right)^2 - 1} \right) \right\}^{-1},$$

где $\lambda_h, \lambda_1, \lambda_2$ и λ_G — коэффициенты теплопроводности газогидрата, стенки трубы, теплоизоляционного материала и грунта соответственно, T_G — температура окружающего грунта, h — глубина заложения трубопровода.

Из-за образования твердых отложений происходит обеднение потока влагой, и вследствие этого, начиная с некоторого сечения трубопровода, его “склероз” происходит во втором режиме. Для расчета интенсивности j_h , принимая во внимание стехиометрическое условие $j_w = (1 - k_{gh}) j_h$, запишем следующие выражения:

$$j_w = \rho_g v^{(D)} \text{Sh} k_w,$$

$$\text{Sh} = 0,021 \text{Re}^{0,8} (\text{Pr}^{(D)})^{0,43}, \quad \text{Pr}^{(D)} = \nu / \nu^{(D)}.$$

Здесь k_{gh} — массовое содержание газа в составе гидрата, $v^{(D)}$ — коэффициент диффузии молекул воды к поверхности раздела газ-гидрат, ν — коэффициент кинематической вязкости газа, Sh — число Шервуда, $\text{Pr}^{(D)}$ — диффузионное число Прандтля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Определим изменение пропускной способности подземного горизонтального трубопровода при росте гидратного слоя на его внутренних стенках, а также рассмотрим влияние влагосодержания газа и температуры окружающего грунта на процесс гидратообразования. При численных расчетах использовались следующие промышленные данные и значения теплофизических параметров: $L = 10$ км, $a_0 = 0,11$ м, $d = a_1 - a_0 = 0,011$ м, теплоизоляция отсутствует ($a_2 = a_1$), $T_G = 279$ К, $\lambda_G = 2$ Дж/(м×с×К), $T_0 = 323,15$ К, $c_g = 2911$ Дж/(кг×К), $R_g = 450$ Дж/(кг×К), $\lambda_g = 0,03$ Дж/(м×с×К), $\mu_g = 1,1 \cdot 10^{-5}$ кг/(м×с), $\lambda_h = 2,2$ Дж/(м×с×К), $\lambda_1 = 58,24$ Дж/(м×с×К), $p_{w*} = 3,94 \cdot 10^9$, $T_{w*} = 4228$, $R_v = 461$ Дж/(кг×К), $l_w = 1,7 \cdot 10^6$ Дж/кг, $m_g = 0,683$ кг/с, $k_{w0} = 3 \cdot 10^{-3}$, $p_{s0} = 3,2$ МПа, $T_{s0} = 282,65$ К, $T_{h*} = 8,28$, $\rho_h = 917$ кг/м³, $k_{gh} = 0,1$, $l_s = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг. Для заданного состава газа в трубопроводе значение равновесной температуры гидратообразования составляет $T_s(p) = 282$ К. Температура стенки T_σ достигает данного значения в сечении с координатой $z_s \approx 1,8$ км (рис. 2, b, f).

Проведенные численные расчеты показали, что распределение толщины гидратного слоя δ во времени и по длине трубопровода носит сложный характер (рис. 2, c, g). До некоторого момента времени (в расчетах приблизительно 60 сут) распределение δ по длине трубопровода следующее: на первоначальном участке склеротических отложений гидратный слой быстро растет, затем на среднем участке толщина газогидратного слоя практически не изменяется, а за сечением $z = z_*$ (смена режимов) происходит постепенное уменьшение до нуля гидратного слоя. Такое поведение профиля гидратного слоя на среднем участке, на наш взгляд, объясняется тем, что интенсивность гидратообразования определяется исключительно оттоком тепла в грунт, величина которого постоянна.

В последующем характер гидратоотложений изменяется: профиль газогидратного слоя со временем вырождается в пикообразную форму (около 85 сут). Данную форму можно объяснить тем, что место, в котором достигается максимальная

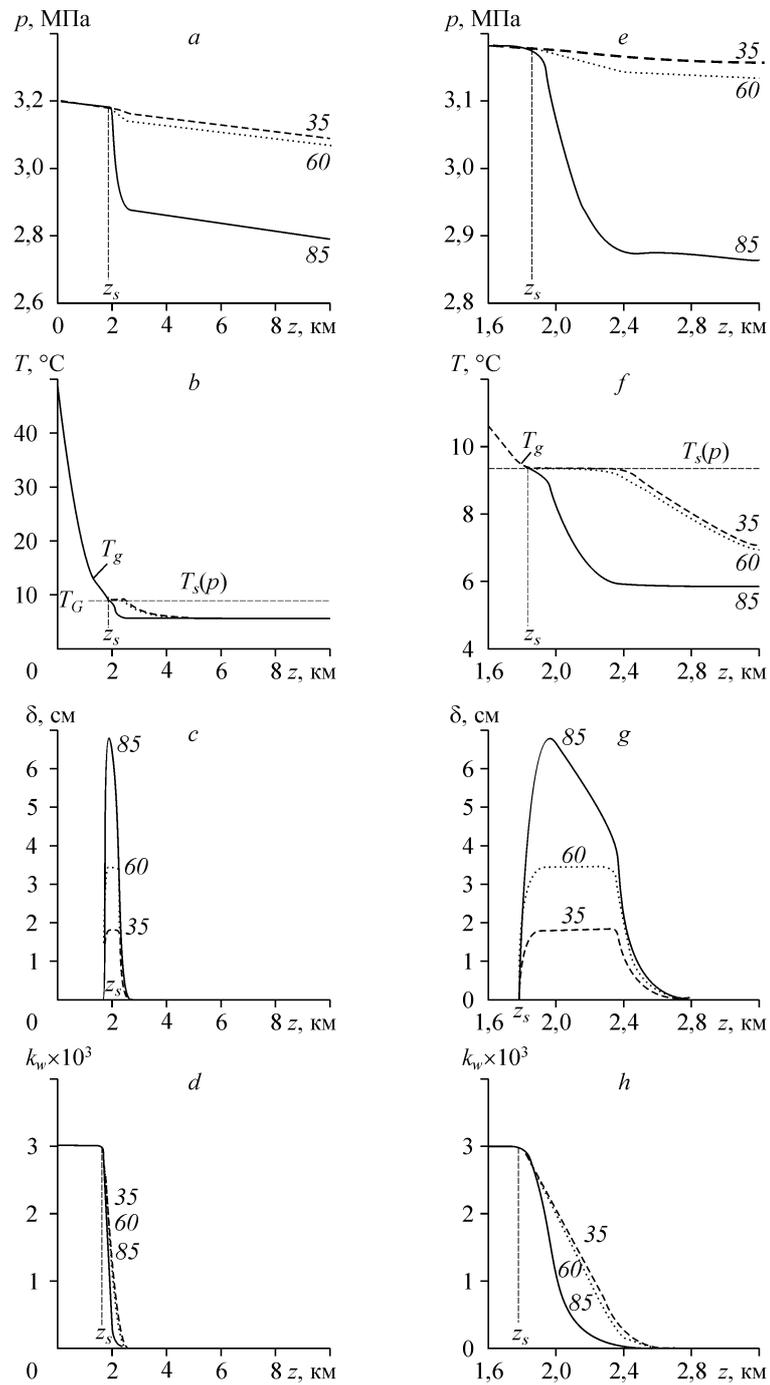


Рис. 2. Изменение во времени профилей давления (*a*, *e*), температуры (*b*, *f*), толщины гидратного слоя (*c*, *g*) и влагосодержания (*d*, *h*) по всей длине трубопровода (*a–d*) и вблизи участка с максимальной толщиной газогидратного слоя (*e*, *h*).

Цифры на кривых — время в сутках с момента начала работы трубопровода.

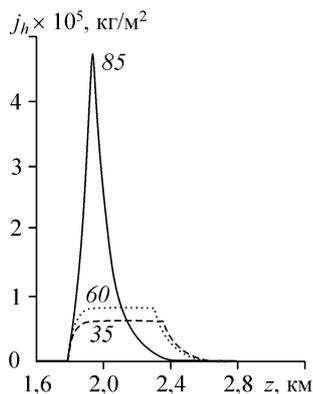


Рис. 3. Изменение интенсивности гидратообразования со временем.

Цифры на кривых — время в сутках с момента начала работы трубопровода.

толщина (и минимальное сечение канала), совпадает с сечением трубопровода, где происходит смена первого режима накопления отложений твердой фазы вторым. Непрерывно увеличивающийся слой газогидратов на внутренних стенках сужает проходное сечение трубопровода. При адиабатическом прохождении газа через такое сужение происходит расширение газа (рис. 2, *a, e*). При этом наблюдается

эффект Джоуля–Томсона, проявляющийся в уменьшении температуры газа за минимальным сечением газопровода (см. рис. 2, *b, f*). Таким образом, изменяется температурный режим в целом, что сказывается, в первую очередь, на самом процессе гидратообразования. В частности, это становится причиной увеличения со временем интенсивности гидратообразования (рис. 3). Видно, что за период времени от 35 до 85 сут данный параметр возрастает приблизительно на порядок величины. Интенсификация процесса также вызывает увеличение потребления влаги на гидратообразование, что отражается на изменении ее концентрации в газовом потоке (рис. 2, *d, h*). Содержание воды, необходимой для гидратообразования, вдоль трубопровода уменьшается быстрее, при этом зона гидратообразования сужается. Все это приводит к тому, что профиль толщины газогидратного слоя со временем вырождается в пикообразную кривую.

На рис. 4 показано влияние изменения массового влагосодержания газа на входе в трубопровод на гидродинамические и теплофизические параметры, когда влагосодержание на входе составляет $k_{w0} = 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-3}$ и 10^{-2} . Во всех трех случаях

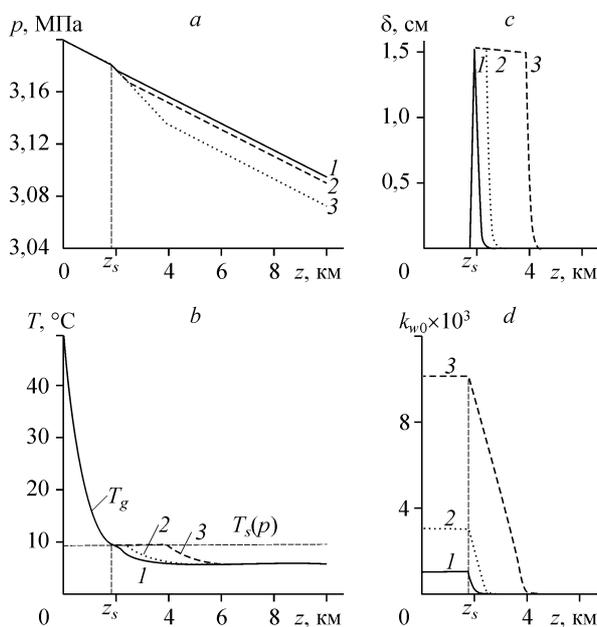


Рис. 4. Влияние величины влагосодержания на входе в трубопровод k_{w0} на процесс гидратообразования.

$k_{w0} = 10^{-3}$ (1), $3 \cdot 10^{-3}$ (2), 10^{-2} (3). Время эксплуатации трубопровода составляет 30 сут.

время эксплуатации трубопровода составляет тридцать суток. Видно, что увеличение влагосодержания на входе в трубопровод приводит к расширению зоны гидратообразования (рис. 4, *b*), при этом правая кромка газогидратного слоя смещается ниже по потоку (рис. 4, *c*). Интересен, на наш взгляд, и тот факт, что при малом влагосодержании профиль толщины газогидратного слоя имеет пикообразную форму (см. рис. 4, *c*). Отметим также, что, несмотря на увеличение влагосодержания k_{w0} на входе в десять раз (от 10^{-3} до 10^{-2}), в некотором сечении $z \approx 4$ км наступает режим дефицита воды в процессе отложения газогидрата, а максимальное значение интенсивности гидратообразования остается неизменным.

На рис. 5 представлены результаты исследований для случаев, когда температура грунта T_G составляла 3 и 6 °С. Время эксплуатации трубопровода — 30 дней при начальной концентрации влаги $k_{w0} = 3 \cdot 10^{-3}$. Из графика видно, что при более низкой температуре грунта остывание газа вдоль трубопровода происходит быстрее. В этом случае зона гидратообразования, а, следовательно, и газогидратный слой (рис. 5, *c*) располагаются ближе к входному сечению, но протяженность гидратных отложений снижается. Можно заметить, что суммарный объем твердых отложений для обоих случаев примерно одинаков, что, на наш взгляд, вызвано ограниченным объемом имеющейся в трубопроводе влаги. Необходимо также отметить, что при снижении температуры грунта на 3 °С интенсивность гидратообразования возрастает приблизительно в два раза (рис. 5, *d*).

На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы. Накопление газовых гидратов на внутренних стенках канала имеет немонотонный характер. Первоначально газогидратный слой вносит дополнительную теплоизоляцию, что ведет к некоторой стабилизации интенсивности гидратоотложений. Однако дальнейший рост отложений приводит к большему влиянию конкурирующего явления, связанного со снижением температуры газа за счет адиабатического расширения газа, что способствует интенсификации “склеротических”

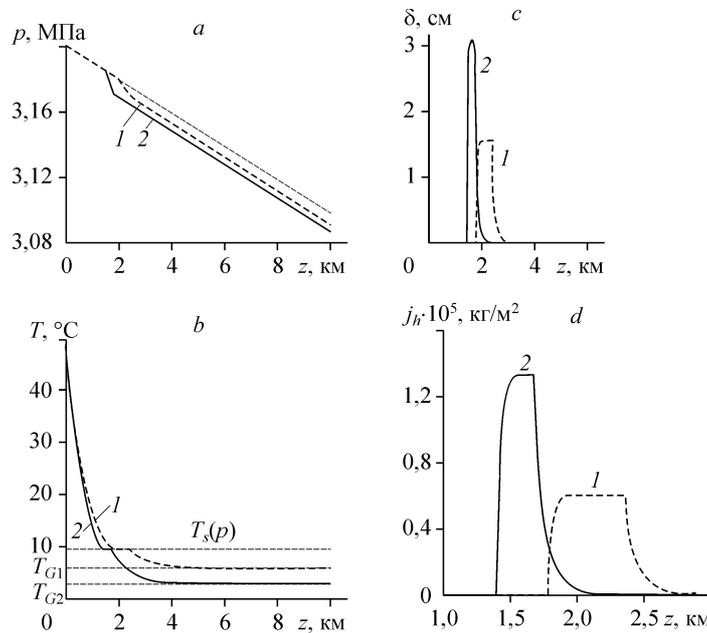


Рис. 5. Влияние температуры грунта на процессы, протекающие в трубопроводе.

Линии 1 и 2 соответствуют температуре грунта $T_G = 3$ и 6 °С.

процессов. При снижении температуры грунта газогидратный слой располагается ближе к входному сечению трубопровода, при этом протяженность гидратных отложений снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондарев Э.А., Габышева Л.Н., Каниболотский М.А.** Моделирование образования гидратов при движении газа в трубах // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. — 1982. — № 5. — С. 105–112.
2. **Гужов А.И., Титов В.Г., Медведев В.Ф., Васильев В.А.** Сбор, транспорт и хранение природных углеводородных газов. — М.: Недра, 1978. — 401 с.
3. **Бондарев Э.А., Васильев В.И., Воеводин А.Ф. и др.** Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа. — Новосибирск: Наука, 1988. — 272 с.
4. **Билошов В.М.** Математическая модель образования гидратов при течении влажного газа в трубах // Инж.-физ. журн. — 1984. — № 1. — С. 57–64.
5. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. Т. 1. — М.: Наука, 1987. — 464 с.

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2005 г.