

УДК 622.691.4:622.279.72

ОБОБЩЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ПО ЗАМЕРАМ ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА

Э. А. Бондарев, И. И. Рожин, К. К. Аргунова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980 Якутск, Россия

E-mails: bondarev@ipng.ysn.ru, rozhin@ipng.ysn.ru, akk@ipng.ysn.ru

Существующий алгоритм определения массового расхода в системах добычи и транспортировки газа по замерам давления на выходе обобщен на случай, когда внутреннее сечение трубы изменяется во времени и также подлежит определению в ходе решения общей задачи. Предлагается использовать данный алгоритм для определения наличия гидратов в таких системах. Рассматривается пример определения наличия гидратов на участке магистрального газопровода в многолетней мерзлоте.

Ключевые слова: сопряженные задачи теплообмена, добыча и транспортировка природного газа, гидраты природного газа.

DOI: 10.15372/PMTF20170511

Введение. Анализ факторов, определяющих надежность подачи газа потребителям, расположенным в зоне многолетней мерзлоты, показывает, что первым слабым звеном технологической цепочки являются скважина и примыкающая к ней призабойная зона газоносного пласта. Именно здесь происходит интенсивное охлаждение газа за счет дросселирования при уменьшении давления (этот изоэнтальпический процесс рассмотрен в [1]) и за счет теплообмена с окружающими скважину многолетне-мерзлыми горными породами. Поскольку многие месторождения имеют достаточно высокие пластовые давления, возникает опасность образования газовых гидратов непосредственно в стволе скважины, что может привести либо к снижению их пропускной способности, либо к полной закупорке вследствие низкой температуры окружающих горных пород. К еще более опасным последствиям может привести образование гидратной пробки в магистральном газопроводе, так как при этом создается угроза системам энергоснабжения крупных регионов. Необходимость своевременного обнаружения такой опасности особенно актуальна для северо-востока России, где природный газ является практически единственным энергоносителем.

Для исследования процесса образования и отложения гидратов в трубопроводах используется квазистационарная математическая модель [1–4]. В данной модели движение несовершенного газа в трубах описывается в рамках гидравлической модели, а динамика образования гидрата — в рамках обобщенной задачи Стефана, в которой температура фазового перехода газ — гидрат существенно зависит от давления в потоке газа. Также в этой модели, основанной на законах сохранения массы и энергии для потока газа, уравнения неразрывности, движения и энергии газа сводятся к системе двух обыкновенных

дифференциальных уравнений относительно давления и температуры [5]. Поскольку модель замыкается феноменологическими соотношениями, соответствующими уровню описания физических явлений, в этих уравнениях содержатся константы, определяемые на основе, например, замеров давления и температуры газа [6]. Помимо феноменологических констант в модель входят технологические параметры, которые также можно определить по этим замерам, например массовый расход газа, являющийся в стационарном режиме константой.

Данная обратная задача определения коэффициентов дифференциальных уравнений по некоторой дополнительной информации о поведении решения исследуется в настоящей работе, при этом созданные в работах [1, 7, 8] алгоритмы определения параметров систем обыкновенных дифференциальных уравнений по дополнительным замерам обобщаются для модели гидратообразования, предложенной в [1–4].

Постановка задачи и модель. Особенностью рассматриваемой модели является определение изменяющейся со временем площади проходного сечения трубы наряду с вычислением распределения температуры и давления газа из решения задачи Коши для уравнения, описывающего изменение безразмерной площади проходного сечения S с течением времени:

$$\frac{dS}{d\tau} = b_2 \frac{T_e - T_h(p)}{1 - b_2 \ln S} - b_1 \sqrt{S} (T_h(p) - T). \quad (1)$$

Здесь $b_1 = \alpha_1 d_0 / (4\lambda_h)$; $b_2 = \alpha_2 d_0 / (4\lambda_h)$; α_1 — коэффициент теплообмена между газом и слоем гидрата; α_2 — коэффициент теплообмена между слоем гидрата и окружающей средой (горной породой); d_0 — диаметр трубы до образования гидрата; $\tau = \lambda_h T_c t / (\rho_h q_h d_0^2)$ — безразмерное время; λ_h , ρ_h — теплопроводность и плотность гидрата; q_h — удельная теплота фазового перехода газ — гидрат; t — время; T — температура газа; T_c — критическая температура газа; T_e — температура окружающей среды; $T_h(p) = a \ln p + b$ — равновесная температура образования гидрата; p — давление газа. Эмпирические коэффициенты a , b находятся путем аппроксимации кривой термодинамического равновесия гидратообразования, определяемой по методике Д. Слоана [9, 10] по известному составу газа. В уравнении (1) все значения температур отнесены к критической температуре T_c , коэффициент α_1 зависит от изменяющейся во времени площади проходного сечения трубы S следующим образом:

$$\frac{\alpha_1 d_0}{\lambda_g} = 0,023 \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{M}{d_0 \eta_g} \right)^{0,8} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{0,8} \frac{1}{S^{0,9}} \quad (2)$$

(Pr — число Прандтля; M — массовый расход газа; λ_g , η_g — теплопроводность и динамическая вязкость газа).

В сечениях скважины, где образуется гидратный слой, т. е. безразмерная площадь проходного сечения $S < 1$, коэффициент теплообмена в уравнении (1) вычисляется по формуле (2), при этом значение температуры окружающей среды T_e заменяется на значение равновесной температуры гидратообразования T_h .

Рассмотрим алгоритм определения массового расхода газа по замерам давления на выходе, когда сечение трубы изменяется по длине с течением времени вследствие образования гидратного слоя. Заметим, что предложенная в [1–4] модель существенно зависит от входных данных в силу неизотермичности процесса, учета реальных свойств газа, изменяющегося со временем сечения трубы, теплообмена с окружающей средой [1, 5, 8].

С использованием метода, описанного в работе [8], и математической модели [4], уравнения которой представим в виде квазистационарных уравнений трубной гидравлики [1–4]:

$$\frac{dp}{dx} = f_1(x, p, T, M); \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dx} = f_2(x, p, T, M), \quad (4)$$

зададим нулевое приближение M^0 и вычислим $p^0(x)$, $T^0(x)$. В (3), (4)

$$f_1 = -\rho_g g \sin \varphi - \frac{\sqrt{\pi} \psi M^2}{4\rho_g S_0^{2,5} S_0^{2,5}}, \quad f_2 = \frac{\pi d \alpha}{c_p M} (T_e - T) - \frac{g}{c_p} \sin \varphi + \varepsilon f_1,$$

φ — угол наклона трубопровода к горизонтальной плоскости ($\varphi = 0$ соответствует магистральному газопроводу, $\varphi = \pi/2$ — газовой скважине); x — координата вдоль оси трубы; ρ_g — плотность газа; g — ускорение свободного падения; ψ — коэффициент гидравлического сопротивления; S_0 — площадь проходного сечения трубы до гидратообразования; d — диаметр проходного сечения; α — суммарный коэффициент теплообмена газа с окружающей средой; c_p — теплоемкость газа при постоянном давлении; $\varepsilon = (RT^2/(c_p p)) (\partial Z/\partial T)_p$ — коэффициент дросселирования; R — газовая постоянная. Коэффициент несовершенства газа определяется по формуле $Z = (0,17376 \ln T_r + 0,73)^{p_r} + 0,1p_r$ [11], где p_r , T_r — приведенные, т. е. отнесенные к критическим значениям, давление и температура.

Линеаризуя систему (3), (4) относительно $(s+1)$ -го приближения, получаем

$$\frac{dp^{s+1}}{dx} = f_1^s + \left(\frac{\partial f_1}{\partial p}\right)^s (p^{s+1} - p^s) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial T}\right)^s (T^{s+1} - T^s) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial M}\right)^s (M^{s+1} - M^s); \quad (5)$$

$$\frac{dT^{s+1}}{dx} = f_2^s + \left(\frac{\partial f_2}{\partial p}\right)^s (p^{s+1} - p^s) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial T}\right)^s (T^{s+1} - T^s) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial M}\right)^s (M^{s+1} - M^s). \quad (6)$$

Используя прогоночные коэффициенты C , D , решения $p^{s+1}(x)$, $T^{s+1}(x)$ представим в виде

$$p^{s+1} = C_1 M^{s+1} + D_1; \quad (7)$$

$$T^{s+1} = C_2 M^{s+1} + D_2 \quad (8)$$

и подставим в соотношения (5), (6). В результате для коэффициентов C , D получаем уравнения

$$\frac{dC_1}{dx} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial p}\right)^s C_1 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial T}\right)^s C_2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial M}\right)^s; \quad (9)$$

$$\frac{dC_2}{dx} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial p}\right)^s C_1 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial T}\right)^s C_2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial M}\right)^s; \quad (10)$$

$$\frac{dD_1}{dx} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial p}\right)^s (D_1 - p^s) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial T}\right)^s (D_2 - T^s) + f_1^s - \left(\frac{\partial f_1}{\partial M}\right)^s M^s; \quad (11)$$

$$\frac{dD_2}{dx} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial p}\right)^s (D_1 - p^s) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial T}\right)^s (D_2 - T^s) + f_2^s - \left(\frac{\partial f_2}{\partial M}\right)^s M^s \quad (12)$$

и начальные условия

$$C_1(0) = C_2(0) = 0, \quad D_1(0) = p_0, \quad D_2(0) = T_0. \quad (13)$$

После численного решения задач Коши (9)–(13), используя условие на выходе $p(L) = p_{out}$ и соотношение (6), находим

$$M^{s+1} = \frac{p_{out} - D_1(L)}{C_1(L)}, \quad (14)$$

где L — длина трубопровода; p_{out} — давление газа на выходе.

Алгоритм численного решения сопряженной задачи теплообмена газопровода с мерзлыми грунтами можно описать следующим образом.

1. Задаем нулевое приближение расхода M^0 , которое находится из упрощенной модели изотермического течения идеального газа в отсутствие образования гидрата ($S = 1$):

$$M^0 = \left(\frac{2(p_0^2 - p_{out}^2)S_0^{2,5}}{\sqrt{\pi} \psi R L T_0} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

2. Из уравнения (15) находим

$$p^0(x) = \left(p_0^2 - \frac{\sqrt{\pi} \psi R L T_0 (M^0)^2}{2S_0^{2,5}} \right)^{1/2}.$$

3. С использованием уравнений (13) задаем начальные значения прогоночных коэффициентов, через которые запишем решения (7), (8).

4. Решая задачу Коши для системы (9)–(12) с использованием метода Рунге — Кутты четвертого порядка, находим $C_1(x)$, $D_1(x)$.

5. Из уравнения (14) определяем расход M^{s+1} .

6. Подставляя M^{s+1} в соотношения (7), (8), находим $p^{s+1}(x)$, $T^{s+1}(x)$.

7. Повторяем пп. 3–6 до достижения необходимой точности, которая в свою очередь зависит от точности измерений.

8. Используя метод Рунге — Кутты, из уравнения (1) на каждом шаге по времени находим новое значение площади проходного сечения, при этом координата x входит в это уравнение в качестве параметра.

9. Определяем температурное распределение в массиве грунтов, т. е. решаем начально-краевую задачу для уравнения теплопроводности с использованием метода сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов по температуре в окрестности фазового перехода в соответствии с подходом, изложенным в [4]. Поскольку сглаженные коэффициенты зависят от температуры, полученная разностная задача является нелинейной и ее решение находится методом простой итерации с использованием прогоночных алгоритмов. Этот шаг алгоритма выполняется только в случае сопряженной постановки задачи.

На каждом временном шаге повторяются пп. 3–9.

Результаты вычислительного эксперимента и их обсуждение. Вычисления проводились при следующих начальных данных: $c_p = 2300$ Дж/(кг·К), $d_0 = 1,4$ м, $L = 100\,000$ м, $\varphi = 0$, $q_h = 510\,000$ Дж/кг, $p_0 = 76 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 320$ К, $\alpha_2 = 5,82$ Вт/(м²·К), $\psi = 0,02$, $\lambda_g = 0,0307$ Вт/(м·К), $\lambda_h = 1,88$ Вт/(м·К), $\eta_g = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho_h = 920$ кг/м³; начальная температура мерзлых грунтов $T_{fr} = 268,15$ К, температура фазового перехода лед — вода $T_{ph} = 273,15$ К, удельная теплота фазового перехода лед — вода $q_{ph} = 334\,400$ Дж/кг, теплопроводность талого грунта $\lambda_{liq} = 1,69$ Вт/(м·К), мерзлого — $\lambda_s = 1,93$ Вт/(м·К), объемная теплоемкость талого грунта $C_{liq} = 2,57 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), мерзлого — $C_s = 2,31 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), плотность грунта $\rho = 2000$ кг/м³, его влажность $\omega = 0,12$. Для природного газа Средне-Вилуйского месторождения следующего состава: CH₄ — 90,34 %, C₂H₆ — 4,98 %, C₃H₈ — 1,74 %, *i*-C₄H₁₀ — 0,22 %, *n*-C₄H₁₀ — 0,41 %, C₅H₁₂₊ — 1,55 %, CO₂ — 0,28 %, N₂ — 0,48 % получены значения $R = 449,4$ Дж/(кг·К), $p_c = 47,213 \cdot 10^5$ Па, $T_c = 205,022$ К, $a = 7,009$ К, $b = 178,28$ К. Давление на выходе газопровода варьировалось в диапазоне $66 \cdot 10^5 \div 70 \cdot 10^5$ Па. В рассматриваемых случаях для сходимости последовательных приближений при вычислении массового расхода по предложенному алгоритму с относительной погрешностью 0,1 % требовалось 3–6 итераций.

При сопряженной постановке учитывалось изменение температуры грунта за счет его теплообмена с газом в трубе, при несопряженной постановке температура грунта считалась равной начальной (268,15 К). Заметим, что на динамику образования гидратов и

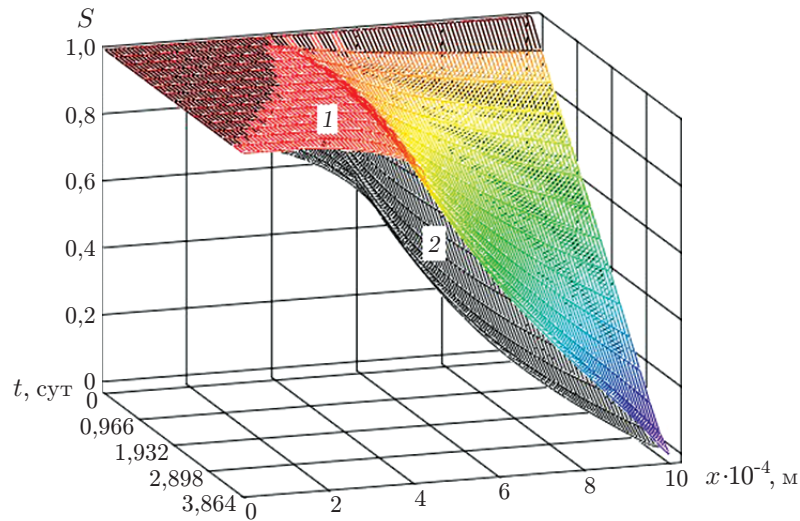


Рис. 1. Зависимость площади проходного сечения от длины газопровода и времени при $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па:
 1 — сопряженная постановка, 2 — несопряженная постановка

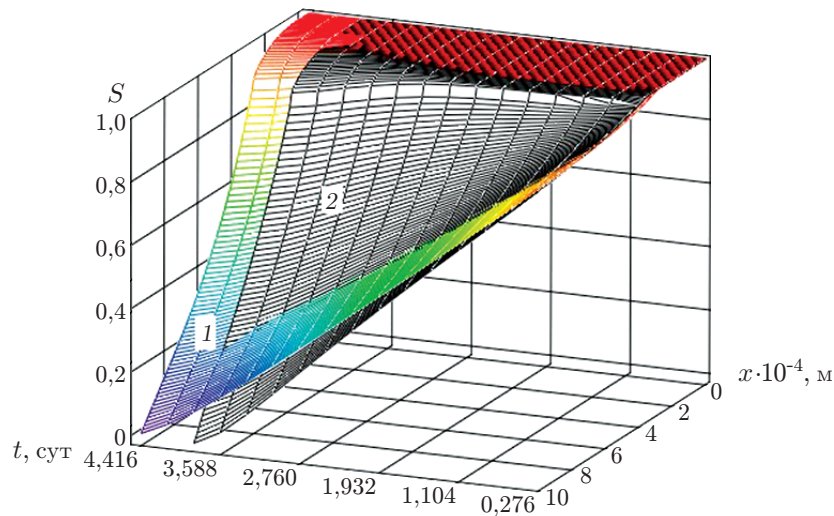


Рис. 2. Зависимость площади проходного сечения от длины газопровода и времени при сопряженной постановке для различных значений давления газа на выходе:
 1 — $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па, 2 — $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па

их распределение по длине трубопровода изменения температурного поля окружающего грунта практически не влияют (поверхности 1, 2 на рис. 1). Это обусловлено достаточно большой скоростью (менее 4 сут) процесса образования гидратов, что приводит к полной закупорке выходного сечения. Однако более детальный анализ показывает, что время полной закупорки газопровода зависит от температуры грунта: длительность этого процесса при $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па составляет 3,59 сут при несопряженной постановке и 3,86 сут при сопряженной. При увеличении давления на выходе газопровода время полной закупорки увеличивается: при $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па оно составляет 4,41 сут при несопряженной постановке и 4,69 сут при сопряженной. Это свидетельствует о существенной роли дросселирования при охлаждении газа и как следствие о необходимости учета его реальных свойств при ма-

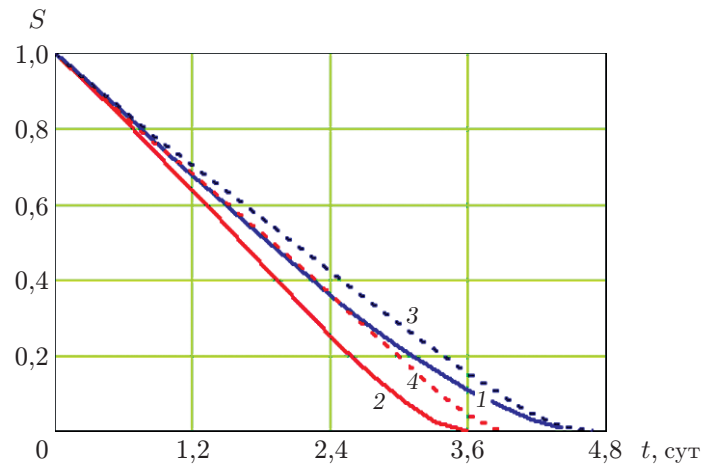


Рис. 3. Зависимость площади проходного сечения на выходе газопровода от времени при различных значениях давления газа на выходе:
1, 3 — $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па, 2, 4 — $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па; сплошные кривые — несопряженная постановка, штриховые — сопряженная постановка

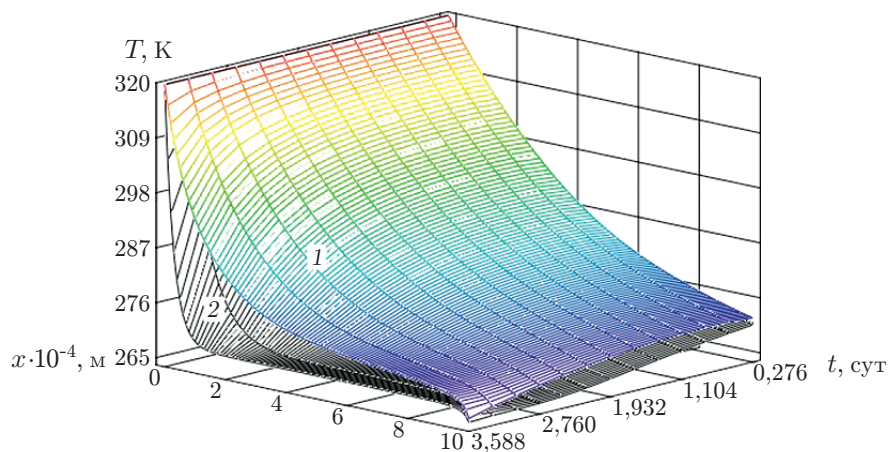


Рис. 4. Зависимость температуры газа от длины газопровода и времени при $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па:
1 — сопряженная постановка, 2 — несопряженная постановка

тематическом моделировании процесса. Влияние перепада давления по длине газопровода на время полной закупорки показано на рис. 2. Следует отметить, что при сопряженной постановке толщина слоя гидрата, особенно на начальном участке газопровода, увеличивается менее интенсивно, чем при несопряженной постановке. В то же время динамика роста толщины этого слоя в большей степени зависит от давления в выходном сечении, чем от температуры грунта (кривые 1–4 на рис. 3). Это подтверждает зависимость температуры газа от длины газопровода (рис. 4). Расчет велся до полной закупорки выходного сечения трубы гидратом. Из рис. 4 следует, что при большом перепаде давления время полной закупорки практически не зависит от температуры грунта, которая учитывается при сопряженной постановке (ср. поверхности 1, 2 на рис. 4). Однако при решении задачи в сопряженной постановке температура газа почти по всей длине больше, чем в несопряженной постановке. Более того, в сопряженной постановке температура изменяется во времени медленнее, чем в несопряженной постановке, особенно на начальном участке трубопровода.

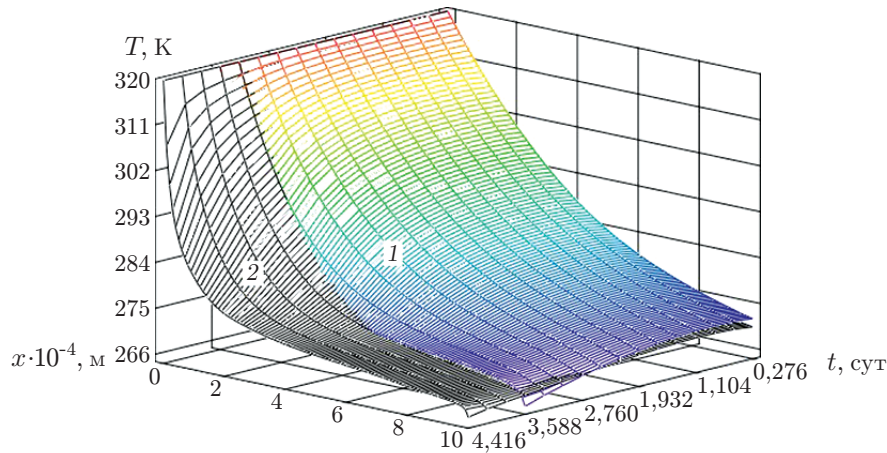


Рис. 5. Зависимость температуры газа от длины газопровода и времени при сопряженной постановке для различных значений давления газа на выходе:
 1 — $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па, 2 — $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па

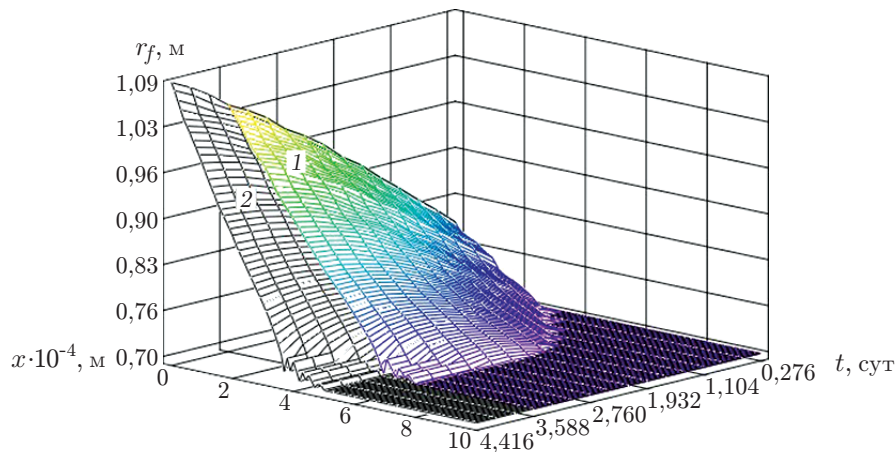


Рис. 6. Зависимость радиуса области протаивания вокруг газопровода от его длины и времени при различных значениях давления газа на выходе:
 1 — $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па, 2 — $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па

Влияние разности давлений на толщину слоя гидрата показано на рис. 5. Видно, что время полной закупорки для двух значений давления на выходе различается почти на сутки, притом что температура газа существенно различается только для первой половины трубопровода (ср. поверхности 1, 2). Разность давлений существенно влияет на динамику протаивания грунта и длину участка, на котором газ охлаждается до температуры, меньшей температуры фазового перехода лед — вода. На рис. 6 видно, что вплоть до полной закупорки газопровода грунт протаивает на ограниченном участке, протяженность которого существенно возрастает при увеличении разности давлений. Это обусловлено характером изменения температуры газа при таких же разностях давлений (см. рис. 5).

Рассмотрим течение полностью осушенного газа, когда образования гидратов в газопровode не происходит. Сначала оценим влияние образования гидратов на температуру газа при давлении на выходе $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па. На рис. 7 видно, что за исключением непродолжительного начального периода температура газа при образовании гидратов меньше температуры осушенного газа по всей длине трубопровода. Это показано на рис. 8, из которого следует, что на начальном участке газопровода (30 км) разность температур

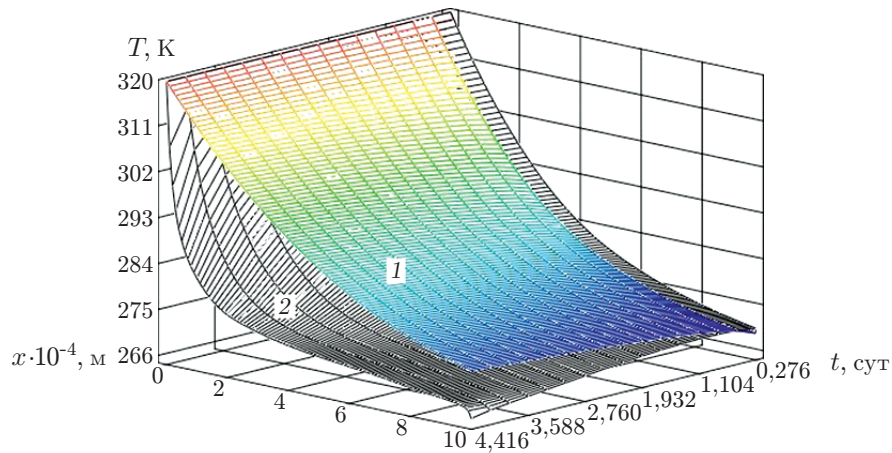


Рис. 7. Зависимость температуры газа от длины газопровода и времени при $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па в сопряженной постановке:

1 — в отсутствие образования гидратов, 2 — при образовании гидратов

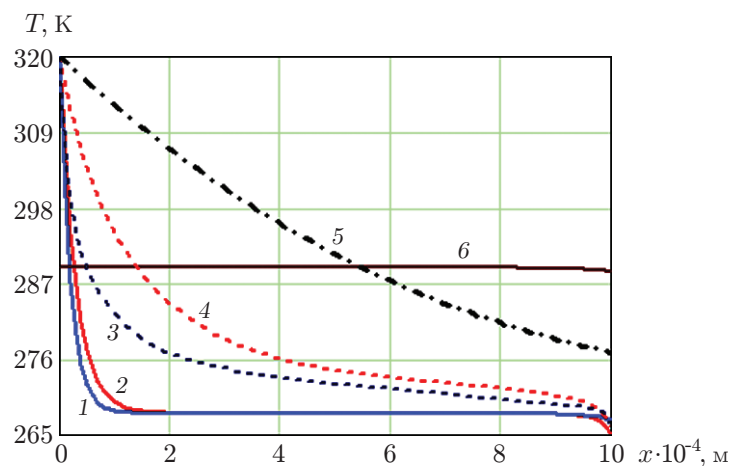


Рис. 8. Зависимость температуры от длины газопровода в конце расчетного периода при различных значениях давления газа на выходе:

1, 3, 5 — $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па, 2, 4 — $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па; 1, 2 — несопряженная постановка, 3–5 — сопряженная постановка; 5 — в отсутствие образования гидратов, 6 — равновесная температура, при которой происходит образование гидратов

составляет приблизительно 25 K (кривые 3, 5). В безгидратном режиме температура газа со временем незначительно увеличивается (см. рис. 7). Такое изменение объясняется динамикой распределения давления по длине трубопровода и соответствующим уменьшением температуры газа за счет дросселирования (рис. 9). На рис. 9 поверхность 1 соответствует распределению давления при транспортировке полностью осушенного газа, являющегося практически стационарным при медленном изменении температуры за счет теплообмена с грунтом. Однако при образовании гидратов давление на различных участках трубопровода меняется в соответствии с изменением проходного сечения: на начальном участке (приблизительно 30 км) уменьшается незначительно, затем — существенно (поверхности 1, 2 на рис. 2, поверхность 2 на рис. 9). Следует отметить, что изменение проходного сечения трубопровода со временем оказывает более значительное влияние на поведение давления, чем изменение температуры грунта.

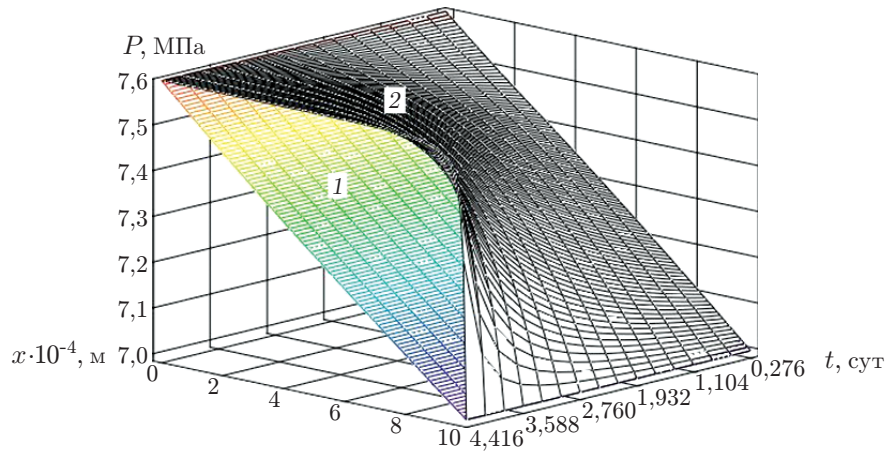


Рис. 9. Зависимость давления газа от длины газопровода и времени при $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па в сопряженной постановке:

1 — в отсутствие образования гидратов, 2 — при образовании гидратов

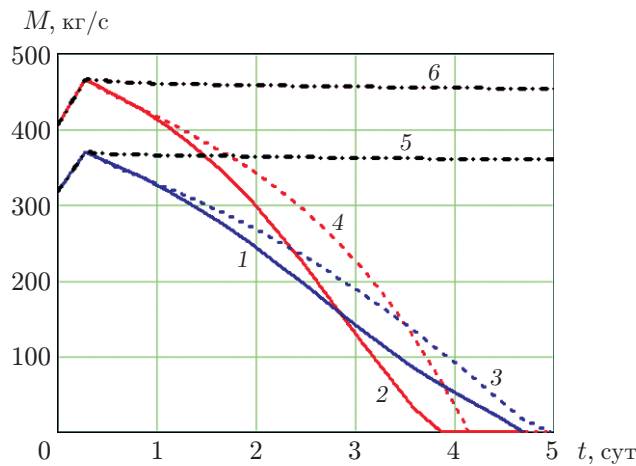


Рис. 10. Зависимость массового расхода газа от времени при образовании (1–4) и в отсутствие образования (5, 6) гидратов при различных значениях давления газа на выходе:

1, 3, 5 — $p_{out} = 70 \cdot 10^5$ Па, 2, 4, 6 — $p_{out} = 66 \cdot 10^5$ Па; 1, 2 — несопряженная постановка, 3–6 — сопряженная постановка

Влияние давления и образования гидратов на массовый расход газа, т. е. на пропускную способность газопровода, показано на рис. 10. Для всех вариантов расчета массовый расход в течение непродолжительного начального периода значительно увеличивается вследствие уменьшения температуры газа при его теплообмене с грунтом. Затем в случае осушенного газа массовый расход остается практически постоянным, а в случае образования слоя гидрата за достаточно малый промежуток времени уменьшается до нуля. При этом скорость убывания практически не зависит от теплообмена с грунтом (ср. кривые 1, 3 и 2, 4 на рис. 10). В то же время массовый расход неоднозначно зависит от разности давлений (ср. кривые 1, 2 и 3, 4 на рис. 10). Данный эффект можно объяснить также тем, что увеличение разности давлений соответствует увеличению начального значения массового расхода.

Заключение. Предложенное обобщение алгоритма решения обратной задачи определения массового расхода газа по замерам давления при изменяющемся во времени сечении трубопровода позволило выявить признаки образования в нем гидратов. Такими признаками являются различия в распределениях давления и температуры по длине трубопровода. Показано, что время образования гидратной пробки в наибольшей степени зависит от перепада давления на участке трубопровода и в меньшей степени — от температуры грунта. Для параметров, соответствующих участку современного магистрального газопровода длиной 100 км, оно составляет $4 \div 5$ сут.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондарев Э. А.** Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / Э. А. Бондарев, В. И. Васильев, А. Ф. Воеводин, Н. Н. Павлов, А. П. Шадрин. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988.
2. **Аргунова К. К., Бондарев Э. А., Рожин И. И.** Математические модели образования гидратов в газовых скважинах // Криосфера Земли. 2011. Т. 15, № 2. С. 65–69.
3. **Бондарев Э. А., Аргунова К. К.** Математические модели образования гидратов в газовых скважинах // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Тр. 14-й Байкальской Всерос. конф., Иркутск — Байкал, 5–15 июля 2009 г. Иркутск: Ин-т систем энергетики СО РАН, 2009. Ч. 3. С. 41–51.
4. **Бондарев Э. А., Рожин И. И., Аргунова К. К.** Моделирование образования гидратов в газовых скважинах при их тепловом взаимодействии с горными породами // Инж.-физ. журн. 2014. Т. 87, № 4. С. 871–878.
5. **Васильев О. Ф.** Неизотермическое течение газа в трубах / О. Ф. Васильев, Э. А. Бондарев, А. Ф. Воеводин, М. А. Каниболотский. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978.
6. **Блехман И. И.** Прикладная математика. Предмет, логика, особенности подходов / И. И. Блехман, А. Д. Мышкис, Я. Г. Пановко. Киев: Наук. думка, 1976.
7. **Бондарев Э. А., Воеводин А. Ф., Каниболотский М. А., Метляева Э. А.** Обратные задачи стационарного неизотермического течения газа в трубах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1977. № 1. С. 143–145.
8. **Бондарев Э. А.** Методы идентификации математических моделей гидравлики / Э. А. Бондарев, А. Ф. Воеводин, В. С. Никифоровская. Якутск: Издат. дом Сев.-Вост. федер. ун-та, 2014.
9. **Sloan E. D.** Clathrate hydrates of natural gases. N. Y.: Marcel Dekker, 1998.
10. **Sloan E. D.** Clathrate hydrates of natural gases / E. D. Sloan, C. A. Koh. Boca Raton: Taylor and Francis Group: CRC Press, 2008.
11. **Латонов В. В., Гуревич Г. Р.** Расчет коэффициента сжимаемости природных газов // Газ. пром-сть. 1969. № 2. С. 7–9.

*Поступила в редакцию 20/III 2017 г.,
в окончательном варианте — 6/VI 2017 г.*