



УДК 622.39.51-7

В. С. Годлевский, д-р техн. наук, **В. П. Головченко**
МП «ДИСИТ», Ин-т проблем моделирования
в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул Генерала Наумова, 15,
тел.: (044) 4241063, E-mail: em@ipme.kiev.ua)

Уравнения стационарных процессов в многониточных линейных участках трубопроводных газотранспортных систем

(Статью представил д-р техн. наук В. Д. Самойлов)

Получены уточненные уравнения для стационарных режимов в многониточных участках магистральных трубопроводных газотранспортных систем с реверсивным направлением движения газа для эквивалентирования многониточных трубопроводов однопунктовыми, а также уравнения для процессов в межсистемных перемычках.

Отримано уточнені рівняння для стаціонарних режимів в багатониткових ділянках магістральних трубопроводних газотранспортних систем з реверсивним напрямком руху газу для еквівалентування багатониткових трубопроводів однопунктовими, а також рівняння для процесів в міжсистемних перемичках.

К л ю ч е в ы е с л о в а: уравнение импульсов и энергии, многониточный трубопровод, линейный участок, эквивалентирование, межсистемная перемычка.

Задачи повышения точности и надежности расчетов и оптимизации стационарных режимов сетевых газотранспортных систем (ГТС), имеющих сложную сетевую структуру, обуславливают необходимость исследования и уточнения математических моделей одного из основных элементов ГТС — линейных участков (ЛУ). Известные модели [1, 2] разработаны с учетом специфики лучевых ГТС, в которых движение газа имеет одно направление, а величины расхода газа достаточно велики. Такая специфика лучевых систем дает возможность использовать различные упрощения уравнений процессов движения газа по трубопроводам [3 — 5] для уменьшения трудоемкости расчетов. Однако известные упрощенные уравнения стационарных режимов приемлемы для расчетов только однопунктовых линейных участков с большими расходами газа.

В данной работе, являющейся развитием и уточнением [6], проведем модификацию известных уравнений [1, 2] для обеспечения надежности

расчетов режимов ГТС с реверсивными потоками газа по отдельным ЛУ и межсистемным перемычкам.

Модели ЛУ. Для расчетов стационарных режимов простого ЛУ, состоящего из одностороннего трубопровода, отраслевыми нормативными документами рекомендуется использовать следующую систему уравнений импульса и энергии [1, 2]:

$$P_H^2 - P_K^2 B = \Delta \lambda T_{cp} Z_{cp} L B_1 q^2 / (C_1 D^5); \quad (1)$$

$$T_{cp} = T_{гр} + (T_H - T_{гр}) \frac{1 - e^{-aL}}{aL} - \frac{D_r (P_H^2 - P_K^2)}{2P_{cp}} \left(1 - \frac{1 - e^{-aL}}{aL} \right) \frac{1}{aL}; \quad (2)$$

$$T_K = T_{гр} + (T_H - T_{гр}) e^{-aL} - \frac{D_r (P_H^2 - P_K^2)}{2P_{cp}} \left(1 - \frac{1 - e^{-aL}}{aL} \right), \quad (3)$$

где P_H и P_K — давление соответственно в начале и в конце ЛУ, кгс/см²;

$$a = 62,6 D K_{тп} (q \Delta C_p 10^6)^{-1}; \quad (4)$$

$$P_{cp} = \frac{2}{3} \left(P_H + \frac{P_K^2}{P_H + P_K} \right); \quad (5)$$

$$B = [1 + b(h_K - h_H)]; B_1 = [1 + b(h_K - h_H)/2]; b = \frac{\Delta}{14,64 T_{cp} Z_{cp}}; \quad (6)$$

Z_{cp} — средний коэффициент сжимаемости, для которого существует ряд аппроксимационных зависимостей [1—5],

$$Z_{cp} = 1 + 0,07 \frac{P_{cp}}{P_{пк}} \frac{T_{пк}}{T_{cp}} \left(1 - 6 \frac{T_{пк}^2}{T_{cp}^2} \right); \quad (7)$$

D — диаметр трубы, мм; L — длина трубы, км; Δ — относительная плотность газа в нормальных условиях; $K_{тп}$ — коэффициент теплопередачи (ккал/(м²К)); $h_H(h_K)$ — геодезические отметки высоты начального (конечного) узла ЛУ относительно фиксированной горизонтальной поверхности; q — коммерческий расход газа (млн м³/сут); C_1 — постоянный коэффициент, определяемый системой единиц измерения, в смешанной системе $C_1 = 0,326 \cdot 10^{-6}$; $T_H, (T_K)$ — температура входящего в ЛУ (выходящего из ЛУ) газа, К; $T_{гр}$ — температура грунта, К; $P_{пк}$ и $T_{пк}$ — псевдокритические значения давления и температуры, определяемые в зависимости от состава газа [1]; D_r — параметр Джоуля — Томсона (дресселирования), К·см²/кгс, определяемый в смешанной системе по формуле [1]

$$D_r = (0,023 \cdot 10^6 / T_{cp}^2 - 0,035) / c_p; \quad (8)$$

c_p — коэффициент удельной теплоемкости, калл/кгК, в смешанной системе [1]

$$c_p = 0,405 + 0,439 \cdot 10^{-3} T_{cp} + 0,046 \cdot 10^6 (P_{cp} - 1) / T_{cp}^3; \quad (9)$$

μ — коэффициент динамической вязкости, кгс/см² [1]

$$\mu = 10^{-6} (0,00322 T_{cp} + 0,00175 P_{cp} + 0,166); \quad (10)$$

λ — коэффициент гидравлического сопротивления [1], определяемый через коэффициент гидравлического трения,

$$\lambda = 1,05 \frac{\lambda_{тр}}{E^2}. \quad (11)$$

После подстановки в (11) рекомендуемого нормативными документами для режимов смешанного и квадратичного трения выражения $\lambda_{тр} = 0,067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2H}{D} \right)^{0,2}$ получаем следующую зависимость:

$$\lambda = \frac{0,07035}{E^2} \left(\frac{158}{Re} + \frac{2H}{D} \right)^{0,2}, \quad (12)$$

где E — коэффициент эффективности; H — эквивалентная шероховатость трубы, мм; Re — число Рейнольдса [1],

$$Re = \frac{1,81 \cdot 10^3 q \Delta}{D \mu}. \quad (13)$$

С целью упрощения вычислений и получения простых эквивалентных систем уравнений (эквивалентных моделей) импульсов и энергии для сложных ЛУ, представляющих собой параллельно-последовательные соединения труб разного диаметра, предложено несколько типов аппроксимации выражений (1), (12) и (13) [2, 4, 5, 7, 8]. Наиболее распространенным аппроксимирующим уравнением для (1) является уравнение импульсов [7]

$$P_n^2 - P_k^2 B = \frac{C_1 \Delta T_{cp} Z_{cp} L B_1}{D^{5,2} E^2 (0,03/H)^{0,2}} \left(q + \frac{0,1067 \mu D^2}{\Delta} \frac{0,03}{H} \right)^2. \quad (14)$$

Преимущество уравнения (14) заключается в менее трудоемких вычислениях по сравнению с соответствующим уравнением (1), что позволяет достаточно просто получить аналогичное по виду уравнение для сложного ЛУ [2]. Однако уравнения (1) и (14) имеют существенный недостаток, а именно: их практически нельзя использовать при расчетах многоточных ЛУ (не эквивалентированных одноточными ЛУ) и ГТС,

содержащих ЛУ с реверсивными потоками газа. Действительно, уравнения (1) и (14) при заданных давлениях на входе и выходе ЛУ имеют два решения для расхода газа, которые в большинстве практических режимов примерно равны по модулю и различны по знакам. Наличие двух решений уравнений (1), (14) относительно q приводит при расчете ЛУ, содержащих параллельные трубы, практически к бесконечному числу решений для распределения потоков газа по параллельным трубам. Следовательно, в уравнениях (1) и (14) отсутствуют функциональные зависимости, устанавливающие однозначную связь между направлением движения газа и знаком градиента давления. Поэтому для задания направления движения газа требуются дополнительные связи и уравнения.

Таковыми уравнениями в лучевых ГТС с одноточечными ЛУ являются узловые уравнения баланса расходов газа. Однако для многоточечных ЛУ этих узловых уравнений оказывается недостаточно. Расчет с помощью уравнений (1), (14) потоков газа по ЛУ, представляющим собой параллельное соединение нескольких разных трубопроводов, приводит к качественно ошибочным решениям (направления движения расчетных потоков газа по отдельным трубопроводам могут не соответствовать знаку перепада давления) при выполненных узловых балансных уравнениях для расходов газа. При расчетах сетевых закольцованных ГТС, содержащих ЛУ с реверсивными потоками, применение уравнений (1), (14) вообще не представляется возможным, поскольку при отрицательном перепаде давления по ЛУ уравнения (1), (14) практически во всех случаях не имеют действительных решений. Такими ЛУ, например, являются межсистемные ЛУ и перемычки.

Более точным по сравнению с (1), (14) является уравнение импульсов [9]

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\lambda}{2D} \rho \omega |\omega|, \quad (15)$$

где ρ — плотность газа; ω — скорость движения газа (объемный расход). В уравнении (15) направление движения газа однозначно согласовано с градиентом распределения давления вследствие наличия в его правой части вектора скорости ω только при достаточно больших значениях модулей расходов газа (в качестве положительного направления обычно принимается направление движения от начала ЛУ к его концу). Действительно, при больших значениях модулей расхода q коэффициент λ является положительной величиной независимо от знака q (направления движения газа), что следует из (13), и поэтому направление (знак) скорости ω однозначно определяется знаком градиента давления в левой части. Однако при малых значениях модуля расхода газа и при отрицательном на-

направлении его движения коэффициент λ , как видно из (13), становится отрицательным и компенсирует отрицательный знак скорости ω . Влияние этого эффекта приводит к тому, что уравнение (15) при малых значениях расхода q (скорости ω) эквивалентно следующему уравнению:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{|\lambda|}{2D} \rho |\omega| |\omega|. \quad (16)$$

В результате перехода от скорости к расходу и интегрирования уравнение (16) принимает вид

$$P_n^2 - P_k^2 = \Delta |\lambda| T_{cp} Z_{cp} L B_1 q^2 / (C_1 D^5). \quad (17)$$

Из уравнения (17) видно, что в данном случае направление расхода газа q по ЛУ (направление движения газа) при малых его значениях определяется неоднозначно, как и в случае применения (1), (14) при расчетах ЛУ с достаточно большими потоками газа. Таким образом, уравнение (15) имеет узкую область применения при расчетах многониточных ЛУ. Его, так же как и (1), (14), нельзя применять при расчетах ГТС, содержащих ЛУ с реверсивными потоками газа, что вытекает из (17).

Из сказанного следует, что для обеспечения корректности и точности расчетов режимов транспорта газа по многониточным ЛУ и по ЛУ с реверсивными потоками газа необходимо модифицировать уравнения импульса (1), (14). Однако кроме уравнения (1) необходимо также модифицировать и уравнение (2).

Действительно, поскольку в ЛУ с реверсивными потоками газа во многих случаях расход газа может быть равным нулю и менять направление движения, при вычислениях в (1) — (3), (8) в таких случаях возможно изменение знака в экспоненте, которое приводит к качественному искажению результатов расчета (при этом также возможно деление на ноль).

Для модификации уравнений (1), (2) представим (13) в виде

$$Re = \frac{1,81 \cdot 10^3 |q| \Delta}{D \mu}. \quad (18)$$

Приведение (13) к виду (18) оправдано физически, поскольку число Рейнольдса является по смыслу положительной величиной. С учетом (18) выражение (12) преобразуется к виду

$$\lambda^* = \frac{0,04}{D^{0,2} E^2} \left(\frac{H}{0,03} \right)^{0,2} \frac{1}{|q|^{0,2}} \left[|q| + \frac{1,455 \mu D^2 0,03}{\Delta H} \right]^{0,2}. \quad (19)$$

Полученное выражение (19) является более точным по сравнению с (12), поскольку определяет этот коэффициент гидравлического сопротивления как сугубо положительную величину независимо от режима и направления движения газа, что также соответствует физическим свойствам.

После подстановки (19) в (1) и простых преобразований получаем

$$P_n^2 - P_k^2 B = \frac{10^{12} \Delta L T_{cp} Z_{cp} B_1 q |q|^{0,8}}{2,652 D^{5,2} E^2 (0,03/H)^{0,2}} \left[|q| + \frac{1,455 \mu D^2 0,03}{\Delta H} \right]^{0,2}. \quad (20)$$

Уравнение (20), в отличие от (1), (14), обеспечивает однозначное согласование направления движения газа по трубопроводам со знаком разности давлений на их концах. Поэтому применение (20) для расчетов режимов многониточных ЛУ, содержащих параллельные нитки с трубопроводами различных диаметров, а также ЛУ с реверсивными потоками газа приводит к корректным и точным результатам. Положительным свойством уравнения (20) в отличие от (1) является отсутствие в нем операции деления на ноль при $q = 0$.

Для исключения возможности появления отрицательного значения параметра aL в уравнениях (2) и (3) при изменениях направления движения газа, что возможно при расчетах распределений температуры в ЛУ с реверсивными потоками газа, а также для исключения возможного деления на ноль можно использовать в (4) \bar{q} вместо q : $\bar{q} = \min(|q|, \varepsilon)$, где ε — малая положительная величина (например, $\varepsilon = 10^{-2}$).

Следует заметить, что свойства уравнений (1) — (3) позволяют получать в качестве одного из корней этих уравнений отрицательные (не имеющие физической интерпретации) значения давления на выходах ЛУ и в соответствующих им узлах сети трубопроводов, а также отрицательные значения средних давлений по трубам P_{cp} [5]. Для того чтобы практически исключить такой случай, модифицируем формулу (5):

$$P_{cp}^* = \frac{2}{3} \left(P_n + \frac{P_k^2}{P_n + |P_k|} \right). \quad (21)$$

При этом выражения (9) и (10) принимают вид

$$c_p = 0,405 + 0,439 \cdot 10^{-3} T_{cp} + 0,046 \cdot 10^6 (P_{cp}^* - 0,1) / T_{cp}^3; \\ \mu = 10^{-6} (0,00322 T_{cp} + 0,00175 P_{cp}^* + 0,166). \quad (22)$$

Эти модификации не ухудшают точности расчетов, исключают отрицательные значения P_{cp}^* и дают возможность формального использования модуля давления P_k в качестве решения (20).

Таким образом, получены модифицированные уравнения импульса (20) и энергии (2), (3), в которых

$$a = 62,6 DL K_{\text{тп}} (|\bar{q}| \Delta c_p 10^6)^{-1}; \quad (23)$$

$P_{\text{ср}}^*$ и μ , c_p определяются из (21) и (22). Эти уравнения для простого ЛУ (одной трубы) обеспечивают большую точность и устойчивость расчетов по сравнению с исходными уравнениями (1) — (13), поскольку при их получении не были использованы приближения и допущения для области физически приемлемых значений параметров и переменных, а также устранено несколько причин некорректности и вырожденности.

Эквивалентирование многониточных ЛУ однониточными ЛУ. Рассмотрим возможность получения эквивалентной модели сложного ЛУ в виде однониточного трубопровода, для которого заданы модифицированные уравнения импульса и энергии (20) и (2), (3) с учетом (21) — (23).

Под сложным ЛУ будем понимать m последовательно соединенных элементарных линейных участков (ЭЛУ), внутренние узлы которых не содержат притоков — отборов газа, причем каждый i -й ЭЛУ представляет собой n_i параллельно соединенных однониточных трубопроводов длиной L_{ij} и диаметром D_{ij} .

Эквивалентирование модели сложного многониточного ЛУ моделью одного однониточного простого ЛУ широко применяется при расчетах ГТС [1, 2, 4 — 8] для сокращения размерности систем уравнений, описывающих ГТС, и объема вычислений при расчетах режимов ГТС. Следует заметить, что замена сложных ЛУ более простыми в ряде случаев позволяет уменьшить не только размерности систем уравнений для рассчитываемых ГТС, но и уменьшить их обусловленность (систем уравнений для ГТС с эквивалентными ЛУ). Это уменьшение обусловленности достигается в случае, когда схема, состоящая из последовательно соединенных коротких ЛУ с существенно различными длинами, заменяется схемой, состоящей из однониточного трубопровода одного диаметра. Такая замена исключает из системы несколько уравнений, описывающих короткие ЛУ. Наличие этих уравнений может приводить к большим разбросам собственных чисел, что является причиной плохой сходимости итерационных процессов.

Рассмотрим вначале частную задачу эквивалентирования i -го ЭЛУ моделью одного простого ЛУ с уравнениями, близкими по виду к (2), (3) и (13) — (16). Используем (без ограничения общности) условия равенства для всех труб в ЛУ коэффициентов эффективности и теплопередачи,

$$E_{ij} = E, K_{\text{тп}ij} = K_{\text{тп}}, \quad (24)$$

что обусловлено реальными возможностями идентификации этих параметров [8] на практике. При эквивалентировании будем использовать приближенное равенство

$$T_{\text{ср}ij} Z_{\text{ср}ij} \approx T_{\text{ср}i} Z_{\text{ср}i}, \quad (25)$$

где $T_{\text{ср}ij} Z_{\text{ср}ij}$ — функция, которая определяется параметрами (температурой, давлением и др.) входного и выходного газовых потоков для j -го трубопровода i -го ЭЛУ; $T_{\text{ср}i} Z_{\text{ср}i}$ — усредненная функция для эквивалентного одноточечного ЛУ. Как видно из (25), температуры выходных потоков для каждого одноточечного трубопровода в их параллельном соединении приблизительно равны. Однако погрешности расчетов при этом допущении в ряде случаев являются практически приемлемыми.

Используя (25), эквивалентное уравнение импульса, связывающее величины давления в начале и в конце рассматриваемого i -го ЭЛУ с суммарным расходом газа, т. е. уравнение импульса для одноточечной эквивалентной модели простого ЛУ, запишем в следующем виде:

$$P_{\text{ин}}^2 - P_{\text{ик}}^2 B_i = \frac{10^{12} \Delta L_{\text{ср}i} T_{\text{ср}i} Z_{\text{ср}i} B_{1i} q |q|^{0,8}}{2,652 D_{\text{э}i}^{5,2} E^2 (0,03 / H_{\text{ср}i})^{0,2}} \left[|q| + \frac{1,455 \mu D_{\text{э}i}^2 0,03}{\Delta H_{\text{ср}i}} \right]^{0,2}. \quad (26)$$

Здесь

$$q = \sum_{r=1}^{n_i} q_{ir}; \quad L_{\text{ср}i} = \frac{1}{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} L_{ir}; \quad H_{\text{ср}i} = \frac{1}{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} H_{ir};$$

$D_{\text{э}i}$ — диаметр эквивалентного простого ЛУ,

$$D_{\text{э}i} = \left[\sum_{r=1}^{n_i} D_{ir}^{2,6} \left(\frac{H_{\text{ср}i}}{H_{ir}} \right)^{0,1} \left(\frac{L_{\text{ср}i}}{L_{ir}} \right)^{0,5} \right]^{1/2,6}; \quad (27)$$

$$B_i = [1 + b_i (h_{\text{ки}} - h_{\text{ни}})]; \quad B_{1i} = [1 + b_i (h_{\text{ки}} - h_{\text{ни}}) / 2]; \quad b_i = \frac{\Delta}{14,64 T_{\text{ср}i} Z_{\text{ср}i}}. \quad (28)$$

Уравнение (27) получено для области больших расходов газа (режим движения в области квадратичного трения) при условии равенства расхода по эквивалентному простому ЛУ сумме расходов газа по всем трубам i -го ЭЛУ. При этом погрешность эквивалентирования, т. е. погрешность расчетов режимов в результате применения уравнения (27), зависит от точности допущения (25). Следует заметить, что учет в (26) и (27) коэффициентов шероховатости имеет смысл только при проектировании ГТС. При их эксплуатации эти коэффициенты можно полагать равными 0,03 мм, поскольку состояние трубопроводов учитывается коэффициентом эффективности E , который подлежит идентификации перед расчетом режима.

Запишем уравнение энергии для теплового расчета сложного i -го ЭЛУ, состоящего из n_i параллельно соединенных труб, с помощью эквивалентной модели простого ЛУ и с учетом (24):

$$T_{\text{ср}i} = T_{\text{гр}} + (T_{\text{н}} - T_{\text{гр}}) \frac{1 - e^{-a_i L_{\text{ср}i}}}{a_i L_{\text{ср}i}} - \frac{D_{ri} (P_{\text{н}i}^2 - P_{\text{к}i}^2)}{2P_{\text{ср}i}^*} \left(1 - \frac{1 - e^{-a_i L_{\text{ср}i}}}{a_i L_{\text{ср}i}} \right) \frac{1}{a_i L_{\text{ср}i}}; \quad (29)$$

$$T_{\text{к}i} = T_{\text{гр}} + (T_{\text{н}i} - T_{\text{гр}}) e^{-a_i L_{\text{ср}i}} - \frac{D_{ri} (P_{\text{н}i}^2 - P_{\text{к}i}^2)}{2P_{\text{ср}i}^*} \left(\frac{1 - e^{-a_i L_{\text{ср}i}}}{a_i L_{\text{ср}i}} \right), \quad (30)$$

где

$$a_i = \frac{62,6K_{\text{тн}i}}{|\bar{q}|\Delta c_p 10^6} D_{\text{э}i}; \quad (31)$$

$$D_{\text{э}i} = \sum_{r=1}^{n_i} D_{ir} \left(\frac{D_{ir}}{\max D_{ir}} \right)^\gamma \left(\frac{L_{ri}}{L_{\text{ср}i}} \right); \quad (32)$$

$P_{\text{ср}i}$ определяется из (14); $\max D_{ir} = \max_r D_{ir}$; коэффициент γ выбирается из интервала (1, 2), например, путем минимизации меры погрешности расчетов температуры и давления из-за эквивалентирования.

В (32) отношения $\left(\frac{D_{ir}}{\max D_{ir}} \right)^\gamma$ введены для учета влияния величин

тепловых потоков газа по отдельным ij -м трубам исходного многониточного ЛУ на температуру выходного узла эквивалентного одноструйного ЛУ, поскольку от этих отношений зависят распределения массовых расходов газа по трубопроводам.

Основным допущением, которое определяет приближенность уравнений (29), (30), является, как и в (25), допущение о равенстве температур выходных потоков газа во всех одноструйных параллельно соединенных трубопроводах в исходном многониточном ЭЛУ. В работах [4, 7] приведено уравнение энергии для сложного ЭЛУ с обобщенным параметром Шухова, полученное только при условии обеспечения равенства поверхности эквивалентного одноструйного ЛУ сумме поверхностей всех труб i -го многониточного ЭЛУ. Уравнение энергии [4, 7] совпадает с (29) — (31), когда трубопроводы всех ниток имеют равные диаметры. Однако это условие приводит к существенным погрешностям расчетов, когда ЭЛУ имеет трубы с разными диаметрами. Использование в таких случаях формул (29) — (31) приводит к меньшим погрешностям.

Таким образом, полученные уравнения (26) — (32) позволяют сводить задачу расчета режима ЭЛУ, состоящего из n_i параллельно соединенных однониточных трубопроводов, к задаче расчета режима эквивалентного однониточного ЛУ с параметрами (27), (31). При этом обеспечивается высокая точность расчетов по сравнению с формулами эквивалентных моделей [2, 5, 7, 8] как при больших, так и при малых величинах расхода газа.

На основе уравнения (26) для сложного ЛУ, состоящего из m ЭЛУ, соединенных последовательно, можно получить уравнение импульсов при условии равенства входного и выходного давления двух соседних ЛУ:

$$P_{in}^2 - P_{ik}^2 B = \frac{10^{12} \Delta q |q|^{0,8}}{2,652 E^2} \sum_{i=1}^m \frac{L_{cpi} T_{cpi} Z_{cpi} B_i}{D_{\text{зи}}^{5,2}} \frac{0,03}{H_{cpi}} \left[|q| + \frac{1,455 \mu D_{\text{зи}}^2}{\Delta} \frac{0,03}{H_{cpi}} \right]^{0,2},$$

где величины B и B_i определяются на основе рекуррентных выражений,

$$B = 1 + a_m; B_i = 1 + (a_{i-1} + a_i)/2; a_0 = 0; a_i = a_{i-1} + b_i(h_{ki} - h_{ni}).$$

Уравнение энергии для теплового расчета сложного ЛУ, состоящего из последовательно соединенных ЭЛУ, следуя [2, 4, 7], запишем на основе уравнений (2), (3) и (27), (28) в виде

$$T_k = T_{гр} + (T_n - T_{гр}) e^{-a_3 \bar{L}} - \frac{D_r (P_{ni}^2 - P_{ki}^2)}{2P_{cp}} \left(\frac{1 - e^{-a_3 \bar{L}}}{a_3 \bar{L}} \right),$$

$$T_{cp} = T_{гр} + (T_n - T_{гр}) \frac{1 - e^{-a_3 \bar{L}}}{a_3 \bar{L}} - \frac{D_r (P_{ni}^2 - P_{ki}^2)}{2P_{cp}} \left(1 - \frac{1 - e^{-a_3 \bar{L}}}{a_3 \bar{L}} \right) \frac{1}{a_3 \bar{L}},$$

где $a_3 \bar{L} = \sum_{i=1}^m a_{\text{зи}} L_i$; P_{cp} определяется из (21).

Для оценки показателей точности описанных выше эквивалентных моделей многониточных ЛУ приведем результаты численных экспериментов, которые сводятся к сравнению результатов расчетов сложных ЛУ в многониточной и однониточной постановках. В многониточной постановке используются полные модели для каждого трубопровода, а именно уравнения (20), (2), (3) с учетом (21) — (23), в однониточной постановке — уравнения (26) — (28) с учетом (29) — (32) при $\gamma = 1$.

В качестве анализируемых схем ЛУ приняты две схемы (рис. 1) реальных трехниточных ЛУ с различными диаметрами однониточных трубопроводов 1—3. Исходные режимные и физические параметры для трехниточного ЛУ, соответствующего схеме, представленной на рис. 1, а, следующие: $P_n = 40,0$ Атм, $T_n = 26,0$ °С, $E = 0,95$, $K_{тп} = 1,6$ ккал/м²К, $T_{гр} = 10,0$ °С,

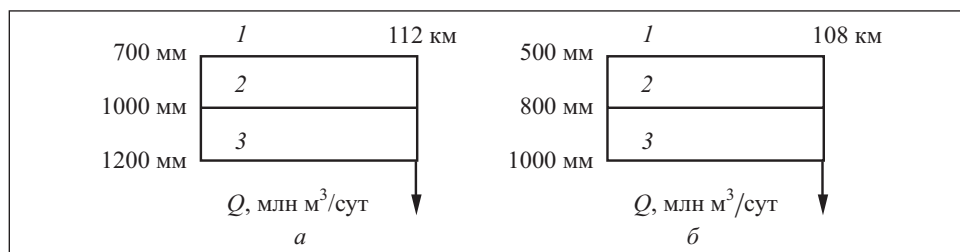


Рис. 1

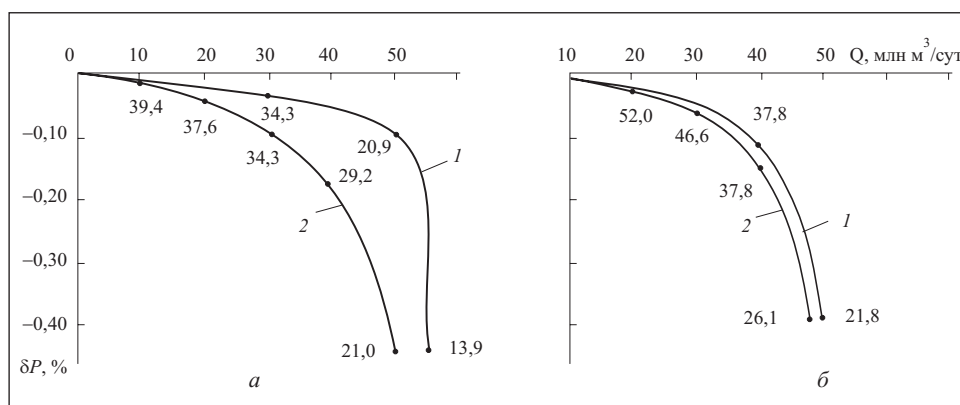


Рис. 2

$\Delta = 0,563$, $H = 0,03$ мм. Для ЛУ, соответствующего схеме, представленной на рис. 1, б — $P_{\text{н}} = 56,0$ Атм, $T_{\text{н}} = 16,0$ °С, $E = 0,95$, $K_{\text{тп}} = 1,6$ ккал/м²К, $T_{\text{гр}} = 5,0$ °С, $\Delta = 0,6$, $H = 0,03$ мм.

При расчетах в обеих схемах отключалась нитка 2 для увеличения отношения диаметров однопоточных трубопроводов (к такой конфигурации исходные схемы могут быть приведены, например, при ремонте ЛУ).

На рис. 2 и 3 приведены графики зависимостей относительных погрешностей $\delta_i P$ и абсолютных погрешностей δP и ΔT расчетов давлений и температур газа на выходе ЛУ от значений расхода газа, полученных с помощью уравнений эквивалентных моделей (кривые 1). Для сравнения на этих же рисунках приведены графики (кривые 2) погрешностей расчетов давлений и температур газа на выходе ЛУ с помощью известных эквивалентных моделей [2, 5, 7, 8]. Относительные погрешности расчетов давлений и температур определены по формулам

$$\delta P = (P_{\text{т}} - P_{\text{э}}) / P_{\text{т}}, \Delta T = T_{\text{кт}} - T_{\text{кэ}},$$

где $P_{\text{т}}$ и $T_{\text{кт}}$ — давление и температура газа на выходе ЛУ, полученные при расчете режима ЛУ в многониточной постановке (без эквивалентных моделей).

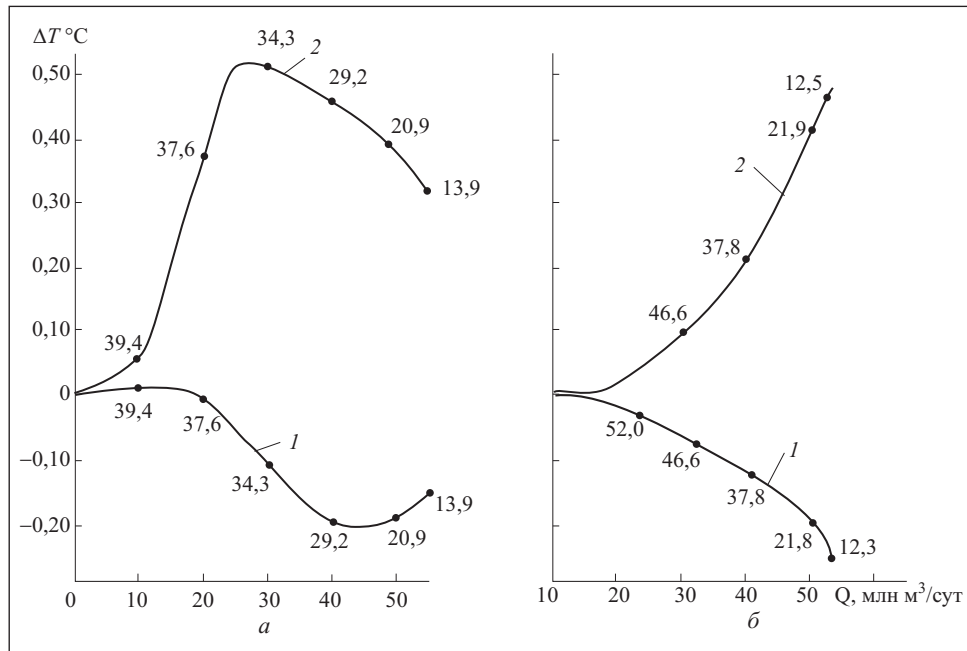


Рис. 3

тирования), т. е. при описании режима каждого трубопровода в ЭЛУ с помощью уравнений импульса (26) с учетом (24), (25) и энергии (2), (3) с учетом (29) — (31) и (24), (25); P_3 и $T_{к3}$ — давление и температура газа на выходе ЛУ, полученные при расчете режима эквивалентирования ЛУ односточным трубопроводом с помощью уравнений (26) — (32).

Из рис. 2 и 3 видно, что относительная погрешность расчетов давлений и абсолютная погрешность расчетов температур, обусловленные эквивалентированием, существенно зависят от соотношений диаметров отдельных трубопроводов на ЛУ (а также от значения суммарного массового расхода газа по ЛУ). Чем больше отличие диаметров трубопроводов в ЛУ, тем больше погрешности эквивалентирования. Приведенные графики подтверждают, что полученные модифицированные уравнения имеют большую точность по сравнению с известными исходными уравнениями.

Анализ расчетов давления и температуры по точным и эквивалентным моделям приводит к выводу, что несмотря более высокую точность полученных модифицированных уравнений не всегда можно применять эквивалентные модели. По-видимому, в каждом конкретном случае расчетов режимов сложных ГТС с помощью эквивалентных моделей целесообразно проводить проверочные расчеты каждого ЛУ по точным моделям для

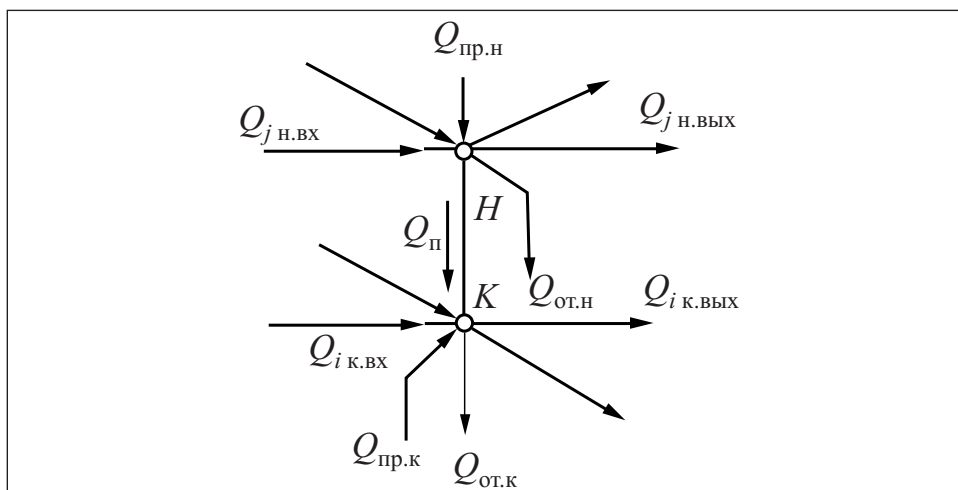


Рис. 4

оценки точности эквивалентирования. При больших погрешностях расчетов давления или температуры в результате эквивалентирования следует включать в общую схему ГТС исходную многоточечную схему соответствующего ЛУ. В качестве допустимых величин погрешностей эквивалентирования можно, например, принимать уровни погрешностей измерительных датчиков давлений и температуры.

Модель короткой межсистемной перемычки с реверсивным потоком газа. Приведем уравнения для коротких ЛУ, находящихся между узлами ЛУ двух ГТС (рис. 4). Такие ЛУ относятся к классу коротких межсистемных перемычек (КМП).

Расчеты стационарных режимов сетевых ГТС, содержащих КМП, с помощью уравнений вида (1), (2) связаны с большими трудностями. Это объясняется двумя причинами. Первая причина состоит в том, что точностные характеристики современных измерительных датчиков давлений и температуры вследствие малых перепадов давлений на входе и выходе перемычек не позволяют выполнять идентификацию параметров (коэффициентов эффективности и теплопередачи) не только КМП, но и прилегающих к ним ЛУ. Второй причиной является очень плохая обусловленность общих систем уравнений сетевых ГТС с КМП, поскольку последние имеют длины, которые обычно бывают на несколько порядков меньше длин, прилегающих ЛУ.

Указанные причины приводят к необходимости принимать в расчетах сетевых ГТС с КМП следующее допущение:

$$P_H = P_K, \quad (33)$$

где P_H и P_K — давление на входе и выходе КМП.

Для расчета расходов газа по КМП и его температуры предположим, что расход газа по КМП является положительной величиной при его движении от начала к концу переемычки и отрицательной — в противном случае (см. рис. 4). С учетом условия (33) запишем систему уравнений балансов расходов и энергии в узле «начало» КМП в виде

$$\sum_{j=1}^m Q_{j \text{ к.вх}} + Q_{\Pi} - Q_{\text{от.к}} + Q_{\text{пр.к}} - \sum_{j=1}^k Q_{j \text{ к.вых}} = 0; \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^m Q_{j \text{ н.вх}} T_{j \text{ н.вх}} - T_{\text{н}} \left(\sum_{j=1}^k Q_{j \text{ н.вых}} + Q_{\text{от.н}} \right) - T_{\Pi} Q_{\Pi} = 0$$

и в узле «конец» КМП в виде

$$\sum_{j=1}^m Q_{j \text{ к.вх}} + Q_{\Pi} - Q_{\text{от.к}} + Q_{\text{пр.к}} - \sum_{j=1}^r Q_{j \text{ к.вых}} = 0; \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{i \text{ к.вх}} T_{j \text{ к.вх}} + T_{\Pi} Q_{\Pi} - T_{\text{к}} \left(\sum_{j=1}^r Q_{j \text{ к.вых}} + Q_{\text{от.к}} \right) = 0,$$

где T_{Π} — температура потока газа по переемычке; Q_{Π} , $Q_{\text{пр}}$ и $Q_{\text{от}}$ — соответственно расход газа, текущего по переемычке, приток и отбор газа в узлах. При этом в (28), (30) примем $T_{\Pi} = T_{\text{н}}$, если $Q_{\Pi} > 0$, и $T_{\Pi} = T_{\text{к}}$, если $Q_{\Pi} < 0$.

Использование уравнений (33) — (35) приводит к уменьшению степени обусловленности общей системы для сетевой ГТС, а также исключает необходимость учитывать длину трубопроводов КМП и определять их параметры.

Выводы. Предложенные модифицированные уравнения импульса и энергии для одноконтурных ЛУ дают возможность проводить расчеты режимов многоконтурных ЛУ без их эквивалентирования с увеличенной точности во всем практическом диапазоне значений расходов, давлений и температур газа.

Полученные модифицированные уравнения для эквивалентирования многоконтурных трубопроводов одноконтурными имеют несколько большую точность по сравнению с исходными известными уравнениями.

Приведенные уравнения реализованы в программном комплексе «ДИОМАГ» и апробированы при расчетах и оптимизации режимов сложных сетевых ГТС, таких как «Укртрансгаз», РАО «ГАЗПРОМ»

Proximate equations are obtained for stationary regimes in multifilament sections of the main pipeline gas transport systems with reverse direction of gas motion for equivalent multifilament pipelines to the single filament ones. The equations for the processes in intersystem connectors are also obtained.

1. *Общесоюзные нормы технологического проектирования: Магистральные трубопроводы. Ч. 1. «Газопроводы» ОНТП 51-1-85.* — М. : ВНИИгаз, 1985. — 193 с.
2. *Агакин В. М., Борисов С. Н., Кривошеин Б. Л.* Справочное руководство по расчетам трубопроводов. — М. : Недра, 1987. — 281 с.
3. *Альтиуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П.* Гидравлика и аэродинамика. — М. : Стройиздат, 1987. — 414 с.
4. *Сухарев М. Г., Ставровский Е. Р.* Оптимизация систем транспорта газа. — М. : Недра, 1975. — 321 с.
5. *Миронов Н. К.* Эквивалентная модель линейного участка для задач диспетчерского анализа и оптимального управления в АСУ ТП транспорта газа // Газ. пром. — 1982. — № 3. — С. 7—8.
6. *Годлевский В. С., Головченко В. П.* Математические модели линейных участков газотранспортных систем // Электрон. моделирование. — 1997. — 19, № 1. — С. 3—10
7. *Константинова И. М., Дубинский А. В., Суперштейн Б. И. и др.* Математическое моделирование технологических объектов магистрального транспорта газа. — М. : Недра, 1988. — 312 с.
8. *Панкратов В. С., Дубинский А. В., Суперштейн Б. И.* Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. — Л. : Недра, 1988. — 246 с.
9. *Васильев О. В., Бондарев Э. А., Воеводин А. Ф., Каниболотский М. А.* Неизотермическое течение газа в трубах. — Новосибирск : Наука, 1978. — 127 с.

ГОДЛЕВСКИЙ Виталий Станиславович, д-р техн. наук, директор МП «ДИСИТ», Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. В 1966 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — вычислительные методы в теории точности и моделирование технических систем.

ГОЛОВЧЕНКО Валерий Петрович, науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике НАН Украины. В 1985 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — вычислительные методы в теории точности и моделирование технических систем.

Поступила 07.08.06