

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

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

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

Ключевые слова: уравнение импульсов и энергии, многониточный трубопровод, линейный участок магистральной газотранспортной системы, эквивалентирование многониточных трубопроводов, межсистемная перемычка, стационарный режим в трубопроводной газотранспортной системы.

Введение. 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 [1] (ЛУ). Известные модели [1,2] были разработаны с учетом специфики только лучевых ГТС, в которых движение газа имеет одно направление а величины расхода газа являются достаточно большими. Данная специфика лучевых систем дает возможность использовать различные упрощения уравнений процессов движения газа по трубопроводам [3] – [5] с целью уменьшения трудоемкости расчетов. Однако, известные упрощенные уравнения стационарных режимов приемлемы, практически, для расчетов только одностичных линейных участков с большими расходами газа.

В данной статье, которая является развитием и уточнением [6], проводится модификация известных уравнений [1], [2] с целью обеспечения надежности расчетов режимов ГТС с реверсивными потоками газа по отдельным ЛУ и межсистемным перемычкам, в том числе.

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

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

$$T_{cp} = T_{cp} + (T_n - T_{cp}) \frac{1 - e^{-aL}}{aL} - \frac{D_r (P_n^2 - P_k^2)}{2P_{cp}} \left(1 - \frac{1 - e^{-aL}}{aL} \right) \frac{1}{aL}; \quad (2)$$

$$T_{\kappa} = T_{cp} + (T_n - T_{cp})e^{-aL} - \frac{D_r (P_n^2 - P_{\kappa}^2)}{2P_{cp}} \left(1 - \frac{1 - e^{-aL}}{aL} \right); \quad (3)$$

где P_n и P_{κ} - давление соответственно в начале и в конце ЛУ, кгс /см²;

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

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

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

Z_{cp} – средний коэффициент сжимаемости, для которого существует ряд аппроксимационных зависимостей [1-5], в том числе

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

D - диаметр трубы (мм); L - длина трубы, км; Δ - относительная плотность газа в нормальных условиях; $K_{ТП}$ - коэффициент теплопередачи (ккал/(м²·°K)); $h_n(h_{\kappa})$ – 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 $C_1 = 0,326 \cdot 10^{-6}$; $T_n(T_{\kappa})$ - соответственно температура входящего в ЛУ (выходящего из) ЛУ газа (°K); T_{cp} - температура грунта (°K); $P_{нк}$, $T_{нк}$ - псевдокритические значения давления и температуры, которые определяют в зависимости от состава газа [1]; D_r - параметр Джоуля – Томсона (дросселирования) (°K см²/кгс), определяемый в смешанной системе формулой [1]

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

C_p - коэффициент удельной теплоемкости (калл/кг °K), выражение для которого также в смешанной системе имеет вид [1]

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

μ - коэффициент динамической вязкости (кгс/см²) [1] -

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

λ - коэффициент гидравлического сопротивления [1]. Этот коэффициент определяется через коэффициент гидравлического трения:

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

После подстановки в (11) рекомендуемого нормативными документами для режимов сметанного и квадратичного трения выражения

$$\lambda_{mp} = 0,067 \left(\frac{158}{\text{Re}} + \frac{2H}{D} \right)^{0,2}$$

получают для λ следующую зависимость

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

где E - коэффициент эффективности; H - эквивалентная шероховатость трубы (мм); Re - число Рейнольдса [1] -

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

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 аппроксимаций для (1), (12) и (13) [2, 4, 5, 7, 8]. Наиболее распространенным аппроксимирующим уравнением для (1) является уравнение импульсов [7]

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

Преимуществом уравнения (14) является то, что оно требует менее трудоёмкие вычисления по сравнению с соответствующим уравнением (1) и дает возможность достаточно просто получить аналогичное себе по виду уравнение для сложного ЛУ [2]. Однако, оба уравнения (1) и (14) имеют общий существенный недостаток, который заключается в том, что эти уравнения нельзя, практически, использовать при расчетах многониточных ЛУ (не эквивалентированных однониточными ЛУ) и ГТС, содержащие ЛУ с реверсивными потоками газа. Действительно, уравнения (1) и (14) имеют при заданных давлениях на входе и выходе ЛУ два решения по расходу, которые в большинстве случаев практических режимов имеют примерно равные значения модулей и отличаются знаками. Наличие в уравнениях (1), (14) двух решений относительно q приводит при расчете ЛУ, содержащих параллельные трубы, практически, к бесконечному числу решений для распределения потоков газа по параллельным трубам. Таким образом, в уравнениях (1) и (14) отсутствуют функциональные зависимости, которые устанавливают однозначную связь между направлением движения газа и знаком градиента давления. Поэтому для задания направления движения газа требуются дополнительные связи и уравнения. Такими уравнениями в лучевых ГТС с однониточными ЛУ являются узловые уравнения баланса расходов газа. Однако, для многониточных ЛУ этих узловых уравнений оказывается недостаточно. В итоге, расчёт с помощью уравнения (1), (14) потоков газа по ЛУ, представляющих 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 же сетевых закольцованных ГТС, содержащие 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 практических случаях не имеют действительные решения. Такими ЛУ, например, являются межсистемные ЛУ и перемычки.

Более лучшие свойства по сравнению с (1), (14) имеет уравнение импульсов [9], которое является исходным для вывода (1), (14) и имеет вид:

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

где ρ - плотность газа, ω - скорость движения газа (объемный расход).

В уравнении (15) направление движения газа однозначно согласовано с градиентом распределения давления из-за наличия в правой части уравнения вектора ω скорости только при достаточно больших значениях модулей расходов газа (в качестве положительного направления обычно принимается направления 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 при этом однозначно определяется знаком градиента давления левой части. Однако при малых значениях модуля расхода газа и при отрицательном 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:

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

Путем перехода от скорости к расходу и интегрирования уравнение (16) приводится к виду

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

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

Кроме уравнения (1) необходимо также модифицировать и уравнение (2). Действительно, поскольку расход газа по ЛУ с реверсивными потоками газа во многих случаях может быть равным нулю и менять направление своего движения, то 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).

С целью проведения модификаций уравнений (1), (2) представим (13) в виде

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

Приведение (13) к виду (18) оправдано физически, поскольку число Рейнольдса является по смыслу положительной величиной.

С учетом (18) выражение (12) преобразуется к виду:

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

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

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

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

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) является отсутствие в нем операции деления на ноль при $q=0$ в отличие от (1).

Для исключения возможности принятия параметром aL в уравнениях (2) и (3) отрицательного значения при изменениях направления движения газа, что имеет место 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 , где

$$\bar{q} = \min(|q|, \varepsilon); \quad \varepsilon - \text{малая положительная величина (например, } \varepsilon = 10^{-2}\text{)}.$$

Отметим, что свойства уравнений (1)-(3) позволяют получать в качестве одного из корней этих уравнений отрицательные (не физические) значения давления на выходах ЛУ и в соответствующих им узлах сети трубопроводов, а также отрицательные значения средних давлений по трубам P_{cp} [5]. С целью практического исключения такого случая модифицируем формулу (5) для P_{cp} :

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

при этом выражения (9), (10) для C_p и μ принимают вид:

$$\begin{aligned} \mu &= 10^{-6} (0,00322T_{cp} + 0,00175P_{cp}^* + 0.166); \\ C_p &= 0.405 + 0.439 * 10^{-3} T_{cp} + 0.046 * 10^6 (P_{cp}^* - 0.1) / T_{cp}^3. \end{aligned} \quad (22)$$

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

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

$$a = 62,6DLK_{ТП} (\bar{q} \Delta C_p 10^6)^{-1}, \quad (23)$$

P_{cp}^* и μ , C_p определяются из (21) и (22). Эти уравнения для простого линейного участка (одной трубы) обладают большей точностью и устойчивостью 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 устранены несколько причин некорректности и вырожденности.

Эквивалентирование многониточных ЛУ однопоточными ЛУ. Рассмотрим возможность получения эквивалентной модели для сложного ЛУ в виде однопоточного трубопровода, в котором задаются полученными выше модифицированными уравнениями импульса и энергии (20) и (2), (3) с (21)–(23).

Под сложным ЛУ будем понимать m последовательно соединенных элементарных линейных участков (ЭЛУ), внутренние узлы которого не содержат притоки-отборы газа, причем каждый i -ый ЭЛУ представляет собой n_i параллельно соединенных однопоточных трубопроводов длиной L_{ij} и диаметром D_{ij} .

Эквивалентирование модели сложных многониточного ЛУ моделью одного однопоточного простого ЛУ обычно широко применяется при расчетах ГТС [1, 2, 4- 8] с целью сокращения размерности систем уравнений для ГТС и, соответственно, объема вычислений при расчетах режимов ГТС. Отметим, что эквивалентирование сложных ЛУ более простыми ЛУ в ряде случаев

позволяет уменьшить не только размерности систем уравнений для рассчитываемых ГТС, но и уменьшить обусловленности этих систем уравнений (систем уравнений для ГТС с эквивалентными ЛУ). Это уменьшение обусловленности достигается в том случае, когда схема, состоящая из последовательно соединенных коротких ЛУ с сильно отличающимися длинами эквивалентуруется схемой, состоящей из одного однониточного трубопровода с одним диаметром. Такая замена исключает несколько уравнений для отдельных коротких участков ЛУ, система уравнений для которого из-за этого разброса длин отдельных участков может иметь большие разбросы собственных чисел, то есть иметь большие числа обусловленности, что является причиной плохой сходимости итерационных процессов и большими погрешностями расчетов.

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 равенств для всех труб в ЛУ коэффициентов эффективности и теплопередачи:

$$E_{ij} = E, \quad K_{Tij} = K_{TT} \quad (24)$$

что обусловлено реальными возможностями идентификации этих параметров [8] на практике.

При эквивалентировании будем использовать приближенное равенство:

$$T_{cpj} Z_{cpj} \approx T_{cpi} Z_{cpi} \quad (25)$$

где $T_{cpj} Z_{cpj}$ - функция, которая определяется параметрами (температурой и давлением и др.) входного и выходного газовых потоков для j -ого трубопровода i -го ЭЛУ; $T_{cpi} Z_{cpi}$ - параметр газа для эквивалентного однониточного ЛУ. Как видно, в (25) принимается, что температуры выходных потоков для каждого однониточного трубопровода в их параллельном соединении равны между собой. Однако, погрешности расчетов из-за этого допущения произведений $T_{cpj} Z_{cpj}$ в ряде случаев являются практически приемлемыми.

Используя (25), запишем эквивалентное уравнение импульса, связывающее величины давления в начале и в конце рассматриваемого i -ого ЭЛУ с суммарным расходом газа (то есть - уравнение импульса для однониточной эквивалентной модели простого ЛУ) в следующем виде:

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

Здесь $q = \sum_{r=1}^{n_i} q_{ir}$; $L_{cpi} = \frac{1}{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} L_{ir}$; $H_{cpi} = \frac{1}{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} H_{ir}$; $D_{\text{э}i}$ - диаметр эквивалентного простого ЛУ,

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

$$B_i = [1 + b_i (h_{ki} - h_{ni})]; \quad B_{1i} = [1 + b_i (h_{ki} - h_{ni}) / 2]; \quad b_i = \frac{\Delta}{14,64 T_{cpi} Z_{cpi}} \quad (28)$$

Уравнение (27) получено для области больших значений расходов газа (режим движения в области квадратичного трения) из условия равенства расхода по эквивалентному простому ЛУ сумме расходов газа по всем трубам i -го ЭЛУ. При этом погрешность эквивалентирования, то есть погрешность расчетов режимов из-за применения уравнения (27), зависит от точности допущения

(25). Заметим, что учет в (26) и (27) коэффициентов шероховатости имеет смысл только при проектировании ГТС. При эксплуатации же ГТС 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) в виде

$$T_{cpi} = T_{cp} + (T_n - T_{cp}) \frac{1 - e^{-a_i L_{cpi}}}{a_i L_{cpi}} - \frac{D_{ri} (P_{ni}^2 - P_{ki}^2)}{2P_{cpi}^*} \left(1 - \frac{1 - e^{-a_i L_{cpi}}}{a_i L_{cpi}} \right) \frac{1}{a_i L_{cpi}}; \quad (29)$$

$$T_{ki} = T_{cp} + (T_{ni} - T_{cp}) e^{-a_i L_{cpi}} - \frac{D_{ri} (P_{ni}^2 - P_{ki}^2)}{2P_{cpi}^*} \left(\frac{1 - e^{-a_i L_{cpi}}}{a_i L_{cpi}} \right); \quad (30)$$

где

$$a_i = \frac{62,6 K_{IIIi}}{\sqrt{q} \Delta C_p 10^6} D_{ЭTi}; \quad (31)$$

$$D_{ЭTi} = \sum_{r=1}^{n_i} D_{ir} \left(\frac{D_{ir}}{\max D_{ir}} \right)^\gamma \left(\frac{L_{ir}}{L_{cpi}} \right); \quad (32)$$

P_{cpi} 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 с целью учета влияния величин тепловых потоков

газа по отдельным ij -м трубам исходного многониточного ЛУ на температуру выходного узла эквивалентного однопоточного 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 между собой температур выходных потоков газа во всех однопоточных параллельно соединенных трубопроводах в исходном многониточном ЭЛУ.

Заметим, что в работах [4,7] приведено уравнение энергии для сложного ЭЛУ с обобщенным параметром Шухова, выражение для которого получено только из условия обеспечения равенства поверхности эквивалентного однопоточного ЛУ сумме поверхности 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 формул (29)-(31) в таких случаях приводит к меньшим погрешностям.

Таким образом, получены уравнения (26) - (32), которые позволяют сводить задачу расчета режима ЭЛУ, состоящего из n_i параллельно соединенных однопоточных трубопроводов, к задаче расчета режима эквивалентного однопоточного ЛУ с параметрами (27), (31). При этом обеспечивается увеличенная 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

$$P_{in}^2 - P_{ik}^2 B = \frac{10^{12} \Delta q |q|^{0,8}}{2,652 E^2} \sum_{i=1}^m \frac{L_{cpi} T_{cpi} Z_{cpi} B_i}{D_{\vartheta i}^{5,2}} \frac{0,03}{H_{cpi}} \left[|q| + \frac{1,455 \mu D_{\vartheta i}^2}{\Delta} \frac{0,03}{H_{cpi}} \right]^{0,2}. \quad (33)$$

В (33) 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, запишем на основе уравнений (2), (3) и (27), (28), следуя [2, 4, 7], в виде:

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

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

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

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

В качестве анализируемых схем ЛУ приняты две приведенные на рис. 1 и рис. 2 схемы реальных трёхниточных ЛУ, диаметры однониточных трубопроводов которых существенно отличаются друг от друга.

Исходные режимные и физические параметры для трёхниточного ЛУ схемы рис. 1 – следующие:

$P_n = 40.0$ (Атм.), $T_n = 26.0$ (°С), $E = 0.95$, $K_{ТП} = 1.6$ (ккал/(м²·°К)), $T_{cp} = 10.0$ (°С), $\Delta = 0.563$, $H = 0.03$ (мм).

Для ЛУ схемы рис. 2: $P_n = 56.0$ (Атм.), $T_n = 16.0$ (°С), $E = 0.95$, $K_{ТП} = 1.6$ (ккал/(м²·°К)), $T_{cp} = 5.0$ (°С), $\Delta = 0.6$, $H = 0.03$ (мм).

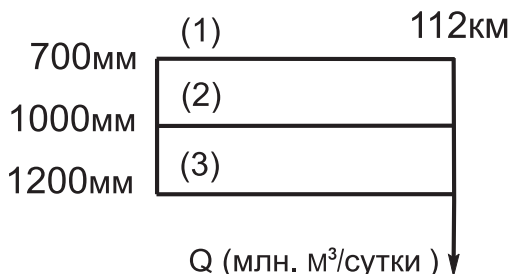


Рис. 1

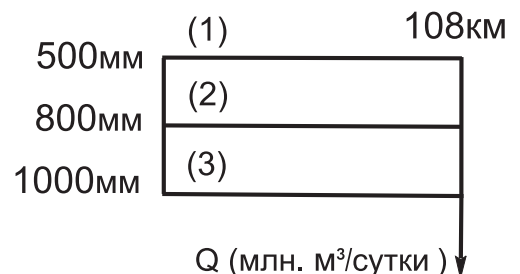


Рис. 2

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

На рис.3, 4 и рис. 5, 6 приведены графики зависимостей относительных погрешностей δP и абсолютных погрешностей ΔT расчетов давлений и температуры газа на выходе ЛУ от значений выходного массового расхода газа с помощью полученных в статье уравнений эквивалентных моделей – кривые 1. Для сравнения на этих же рисунках приведены графики (кривые 2) для погрешностей расчетов давлений и температур газа на выходе ЛУ с помощью известных эквивалентных моделей [2, 5, 7, 8]. Относительные погрешности расчетов давлений и температур определялись по формуле:

$$\delta P = (P_T - P_{\mathcal{E}}) / P_T ,$$

$$\Delta T = T_{kT} - T_{k\mathcal{E}} ,$$

где

- P_T и T_{kT} - значения давления и температуры газа на выходе ЛУ, полученные путем расчета режима ЛУ в многониточной «точной» постановке (без эквивалентирования), то есть при описании режима каждого трубопровода в ЭЛУ с помощью уравнений импульса (26) с (24), (25) и энергии (2), (3) с (29) – (31) и (24), (25);

- $P_{\mathcal{E}}$ и $T_{k\mathcal{E}}$ - значения давления и температуры газа на выходе ЛУ, полученные путем расчета режима при эквивалентировании ЛУ однониточным трубопроводом с помощью уравнений (26) - (32).

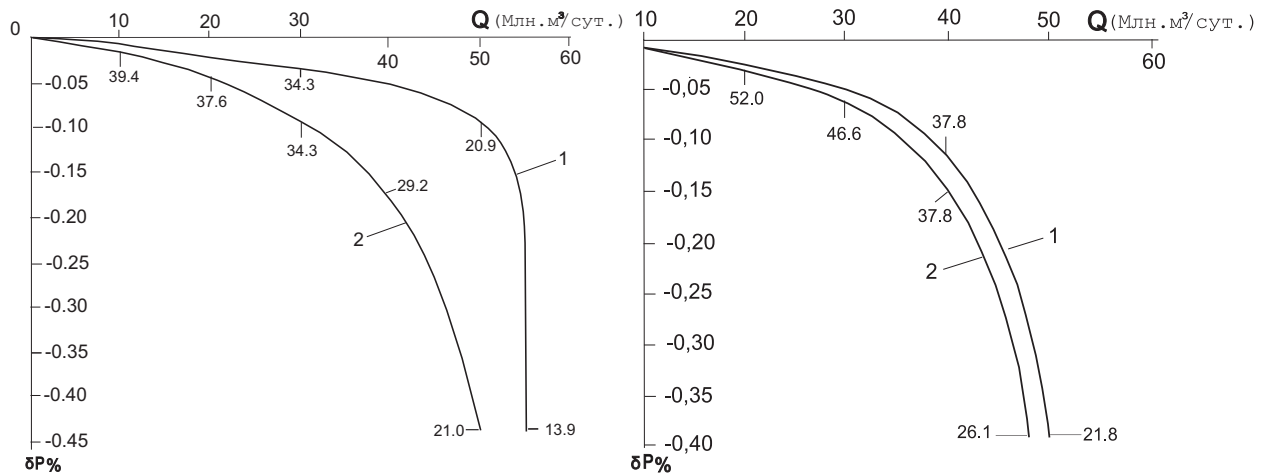


Рис.3

Рис.4

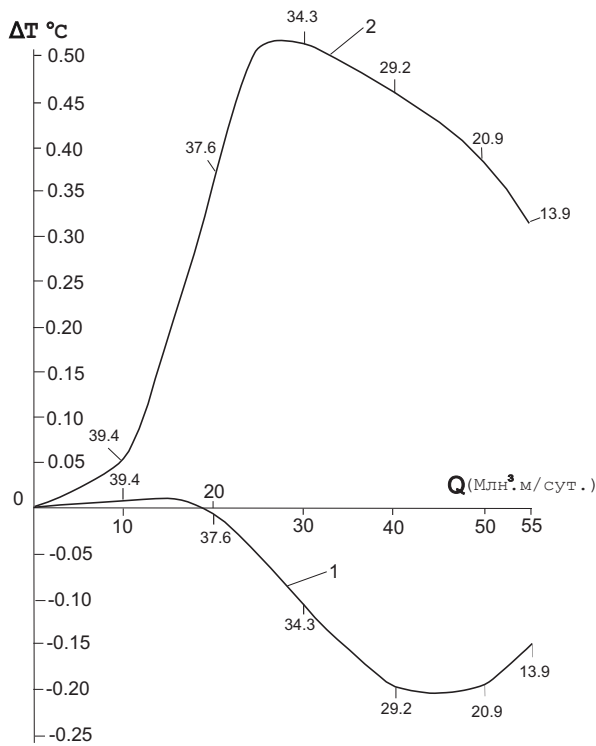


Рис.5

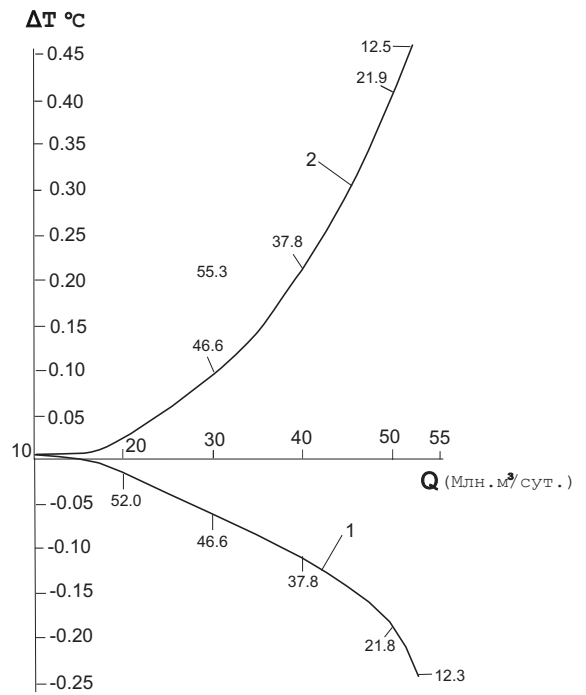


Рис.6

Из приведенных графиков видно, что относительная погрешность расчетов давлений и абсолютная погрешность расчетов температур, обусловленные эквивалентированием, существенно зависят от соотношений диаметров отдельных трубопроводов на ЛУ 9 (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 приведенные в статье модифицированные уравнения имеют большую точность по сравнению с известными исходными уравнениями.

Анализ приведенных примеров расчетов давления и температуры по точным и эквивалентным моделям приводит к выводу, что несмотря на увеличенную точность полученных модифицированных уравнений далеко 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 оценки точности эквивалентирования. При больших погрешностях расчетов или давления или температуры из-за эквивалентирования следует включать в общую схему ГТС исходную многониточную 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. С целью обеспечения общности изложения приведем здесь также и уравнения для коротких линейных участков, которые включены между узлами линейных участков двух ГТС (рис.7). Такие линейные участки относятся к классу коротких межсистемных перемычек (КМП).

Проведение расчетов стационарных режимов сетевых ГТС, содержащих короткие межсистемные перемычки, путем применения уравнений типа (1) – (2) для описания процессов в этих перемычках на практике сталкивается с большими осложнениями. Это обусловлено двумя причинами. Первая причина состоит в том, что точностные характеристики современных измерительных датчиков

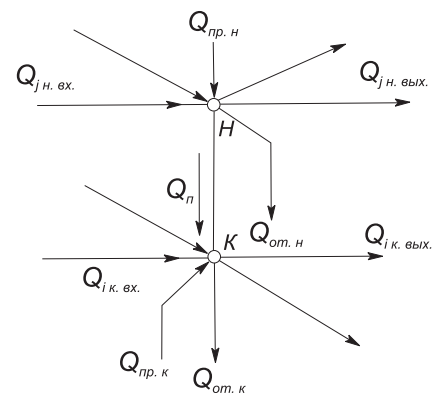


Рис.7

давлений и температуры не позволяют из-за малых перепадов давлений на входе и выходе перемычек 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 меньше на несколько порядков длин прилегающих ЛУ.

Рассмотренные причины приводят к необходимости принимать в расчетах сетевых ГТС с КМП допущение

$$P_H = P_K, \quad (34)$$

где P_H и P_K значение давления на входе и выходе КМП.

Для расчетов значений расходов газа по КМП и его температуры примем, что расход газа по КМП является положительным при его движении от «начала» к «концу» перемычки и отрицательным – в противном случае (рис. 7). При этом с учетом условия (34) имеется возможность записать систему уравнений балансов расходов и энергии в узле «начало» КМП в виде

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

$$\sum_{j=1}^m Q_{jn.вх} T_{jn.вх} - T_n \left(\sum_{j=1}^k Q_{jn.вых} + Q_{от.н} \right) - T_n Q_n = 0 \quad (36)$$

и в узле «конец» КМП в виде

$$\sum_{j=1}^n Q_{jk.вх} + Q_n - Q_{от.к} + Q_{пр.к} - \sum_{j=1}^r Q_{jk.вых} = 0; \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{ik.вх} T_{jk.вх} + T_n Q_n - T_k \left(\sum_{j=1}^r Q_{jk.вых} + Q_{от.к} \right) = 0. \quad (38)$$

где T_n — температура потока газа по перемычке; Q_n , $Q_{пр}$, $Q_{от}$ - соответственно расход газа по перемычке, приток и отбор газа в узлах.. При этом в (28),(30) примем, что $T_n = T_n$, если $Q_n > 0$, и $T_n = T_k$, если $Q_n < 0$.

Применение системы уравнений (34) – (38) приводит к уменьшению степени обусловленности общей системы для сетевой ГТС, устраняет необходимость учета длин трубопроводов КМП и определения их параметров.

Заключение.

Приведенные в статье модифицированные уравнения импульса и энергии для однопоточных ЛУ дают возможность проводить расчеты режимов многониточных ЛУ без их эквивалентирования с целью увеличения точности во всем практическом диапазоне значений расходов, давлений и температур газа.

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

Приведенные уравнения апробированы в разработанном МП «ДИСИТ» и ИПМЭ им.Г.Е. Пухова НАН Украины программном комплексе «ДИОМАГ» при расчетах и оптимизации режимов сложных сетевых ГТС типа «Укртрансгаз», РАО «ГАЗПРОМ» и их объединений.

Литература

1. *Общесоюзные нормы технологического проектирования.* Магистральные трубопроводы, Ч. 1. «Газопроводы» ОНТП 51-1-85.—М.: ВНИИгаз, 1985.-193 с.
2. *Агапкин В.М., Борисов С.Н., Кривошей Б.Л.* Справочное руководство по расчетам трубопроводов.—М.: Недра, 1987.-281 с.
3. *Алтишурь 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. Электронное моделирование. – 1997.-т.19.-№1.-с.3-10
7. Константинова ИМ., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И. и др. Математическое моделирование технологических объектов магистрального транспорта газа.-М.:Недра, 1988.-312 с.
8. Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн 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.-127с.

ГОДЛЕВСКИЙ Виталий Станиславович, д-р техн. наук, директор МП «ДИСИТ» 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.