

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОТ ГАЗА К ГРУНТУ ДЛЯ УЧАСТКА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ УКРАИНЫ

*ТЕВЯШЕВ А.Д., ТЕВЯШЕВА О.А.,
ПШЕНЯНИК И.А.*

Предлагается метод определения фактических значений коэффициента гидравлического сопротивления и коэффициента теплопередачи от газа к грунту для всех участков трубопроводов, входящих в состав фрагмента ГТС Украины. Задача оптимизации, решением которой являются искомые коэффициенты, строится на базе математической модели стационарного неизотермического течения газа на фрагменте ГТС.

Введение

На сегодняшний день на всех уровнях оперативно-диспетчерского управления газотранспортной системой (ГТС) Украины внедряются аппаратно-программные комплексы моделирования и оптимизации режимов транспорта и распределения природного газа. Это требует не только разработки специального математического обеспечения для выполнения многовариантных расчетов гидравлических и температурных режимов работы ГТС, но и оптимизации уже существующих алгоритмов для применения их при моделировании режимов больших фрагментов ГТС.

Математические модели стационарного неизотермического течения газа на участке одноточечного газопровода строятся для прямолинейной цилиндрической

трубы. Плавные изгибы газопровода как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, связанные с неровностями рельефа, не оказывают существенного влияния на точность принятых моделей. Однако образование конденсатов, гидратов, попадание в трубу частиц породы приводят к увеличению шероховатости внутренней поверхности трубы и, соответственно, к увеличению гидравлического сопротивления. Последнее достаточно сильно сказывается на точности моделирования режимов работы фрагментов ГТС и требует обязательного проведения идентификации коэффициентов гидравлической эффективности участков труб (на основе оперативных данных). Этот поправочный коэффициент не является измеряемой величиной и учитывает фактическое гидравлическое сопротивление, возникающее в трубе при течении газа.

Температурный режим на участке газопровода определяется рядом факторов: теплообменом с окружающей средой, расширением газа и силами трения в его потоке. Энергия, затрачиваемая на преодоление сил трения при движении газа, возвращается ему повышением температуры. Компенсация работы трения выделяющейся при этом теплотой является внутренним процессом, никак внешне себя не проявляющим. Пренебрегая изменением кинетической энергии газа, можно считать, что трение не влияет на изменение температуры газа в газопроводе. Основным параметром, который влияет на температурный режим работы газопровода, является теплопередача от газа к грунту. Она напрямую зависит от применяемых теплоизоляционных материалов типа грунта, в котором проложен газопровод, времени года и ряда других параметров.

Точность определения температурного режима работы газопровода влияет не только на точность расчета пропускной способности газопровода, но и на возможность определения участков вероятного выпадения конденсата, воды и кристаллогидратов, а также

мест ввода метанола как профилактического средства при образовании гидратных пробок для принятия мер по сохранению изоляционных качеств антикоррозийных покрытий. При моделировании температурного режима течения газа на участке трубы используют средний коэффициент теплопередачи от газа к грунту, определение которого возможно только косвенными методами, основанными на результатах измерений и данных о режиме течения газа.

В данной работе представлен метод определения фактических значений коэффициента гидравлического сопротивления и коэффициента теплопередачи от газа к грунту для всех участков газопроводов, входящих в состав фрагмента ГТС Украины, основанный на использовании штатных замеров параметров газа на входах и выходах данного фрагмента.

1. Гидравлический и температурный расчет параметров течения газа на фрагменте линейной части ГТС

В основе математической модели течения газа на участке трубопровода лежат законы сохранения массы, количества движения и энергии, примененные к элементарному объему потока газа, а затем проинтегрированные по всему участку.

Стационарное неизотермическое течение газа на участке однониточного газопровода описывается следующей системой уравнений:

$$P_n^2 - P_k^2 = f_1(E, q, T_{cp}, C_1), \quad (1)$$

$$T_k = f_2(K, q, T_{cp}, T_n, C_2), \quad (2)$$

$$T_{cp} = f_3(K, q, T_{cp}, T_n, C_3), \quad (3)$$

где E (–) – коэффициент эффективности участка газопровода; K (Вт/(м²·К)) – средний на участке коэффициент теплопередачи от газа к окружающей среде; T_{cp} (°С) – средняя температура газа на участке газопровода; P_n (кгс/см²) – давление в начале участка газопровода; P_k (кгс/см²) – давление газа в конце участка газопровода; T_n (°С) – температура газа в начале участка газопровода; T_k (°С) – температура газа в конце участка газопровода; q (млн м³/сут.) – коммерческий расход газа на участке газопровода; C_1, C_2, C_3 – наборы параметров, характеризующих участок трубопровода (длина, диаметры внешний и внутренний), нормативные коэффициенты, а также параметры окружающей среды.

Таким образом, взаимосвязь параметров течения газа устанавливается на основе физических законов, но в формулы вводятся коэффициенты, определяемые по натурным наблюдениям и обеспечивающие адекватность математической модели реальному объекту. Для системы (1) – (3) такими коэффициентами являются K и E .

Фрагмент линейной части ГТС представляет собой систему трубопроводов и запорной арматуры (кранов) одного или нескольких магистральных газопроводов. На основании технологической схемы формируется ориентированный граф, причем вершины, через которые газ втекает в систему, считаются точками

входа, а вершины, через которые газ вытекает – точками выхода. Во всех этих точках выполняются штатные замеры давления, температуры, расхода и состава газа.

Математическая модель стационарного неизотермического течения газа для фрагмента ГТС состоит из совокупности математических моделей (1)-(3) для каждого участка, входящего в его состав, а также соотношений, которые определяются законами сохранения масс и сохранения количества тепла в каждом узле трубопроводной системы и дополняются граничными условиями на входах и выходах участка ГТС [1].

Гидравлический и температурный расчет фрагмента ГТС заключается в определении давления и температуры в каждом узле, а также расхода и направления течения газа на каждом участке трубопроводной системы на основе измеренных значений на входах и выходах.

В качестве исходных оперативных данных для решения этой задачи используются:

- данные по структуре фрагмента ГТС и состоянию запорной арматуры;
- значения давления, температуры, расхода и состава газа на входах и выходах фрагмента;
- значения параметров окружающей среды.

Для выполнения температурно-гидравлического расчета на фрагменте ГТС из N участков труб требуется решить совокупность N систем (1)-(3) относительно давлений и температур во всех узлах фрагмента, а также расхода во всех трубах. Это осуществляется с использованием метода Ньютона [2].

2. Задача идентификации K и E для участка трубы и фрагмента ГТС

Задача идентификации K и E для участка трубы заключается в решении системы уравнений (1)-(3) относительно переменных K , E и T_{cp} , для которого можно использовать, например, метод покоординатного спуска. Система уравнений, описывающая фрагмент ГТС, который состоит из N участков трубы, имеет $3N$ неизвестных (K , E и T_{cp} для каждого из N участков труб). Поэтому скорость решения задачи идентификации K и E для фрагмента ГТС снижается пропорционально увеличению числа его элементов.

В данной работе предложен способ определения K и E для каждого участка трубы, входящего в состав фрагмента ГТС, который не требует больших затрат машинных ресурсов и выполняется существенно быстрее, чем решение системы $3N$ уравнений.

Предположим, что фрагмент ГТС состоит из N_d участков газопроводов и имеет N_{in} входов и N_{out} выходов. Задача идентификации K и E для фрагмента ГТС заключается в определении этих параметров для каждого участка трубы, входящего в его состав. Она выполняется в несколько этапов:

– вначале для всех участков труб, входящих в состав ГТС, задаются начальные значения K и E ;

– затем при этих значениях параметров выполняется температурно-гидравлический расчет, одним из полученных результатов которого является направление течения потока газа на каждом участке трубы;

– для каждой пары вершин «вход-выход» определяется набор путей, который их соединяет (набор участков труб, по которым газ течет от точки-входа к точке-выходу);

– далее для каждого участка трубы значения K и E усредняются по всем путям, в которые входит участок;

– выполняется температурно-гидравлический расчет, который основывается на расчетных значениях K и E ;

– результаты (расчетные значения давления, температуры и расхода) сравниваются с измеренными значениями на входах и выходах фрагмента.

Если полученное расхождение достаточно велико, то описанная последовательность этапов повторяется, но в качестве начальных значений K и E используются значения, рассчитанные на предыдущем шаге.

3. Определение K для пути, соединяющего вход и выход фрагмента

Рассмотрим задачу определения K для пути, состоящего из N_{dl} одноконтурных участков. Запишем уравнение (3) с использованием формулы В.Г.Шухова для каждого из N_{dl} одноконтурных участков пути:

$$\begin{aligned} T_{k1} &= T_{гр} + (T_{н1} - T_{гр})e^{-a_1 L_1 K_1}, \\ T_{k2} &= T_{гр} + (T_{н2} - T_{гр})e^{-a_2 L_2 K_2}, \\ &\dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$T_{kN_{dl}} = T_{гр} + (T_{нN_{dl}} - T_{гр})e^{-a_{N_{dl}} L_{N_{dl}} K_{N_{dl}}},$$

где a_i ($i=1..N_{dl}$) – расчетный параметр, который не зависит от значений температур, L_i ($i=1..N_{dl}$) – длина участка (км) [3].

Для каждой пары смежных участков газопровода ($i, i+1$) температура газа в конце i -го участка ($i=1..N_{dl}-1$) совпадает с температурой газа в начале ($i+1$)-го участка ($i=1..N_{dl}-1$), значит, соотношения (4) можно представить в виде:

$$\frac{T_{kN_{dl}} - T_{гр}}{T_{н1} - T_{гр}} = e^{-a_1 L_1 K_1 - a_2 L_2 K_2 - \dots - a_{N_{dl}} L_{N_{dl}} K_{N_{dl}}}. \quad (5)$$

В предположении, что для всех участков выбранного пути средний коэффициент теплопередачи от газа к грунту одинаков ($K=K_0$), уравнение (5) примет вид:

$$\frac{T_{kN_{dl}} - T_{гр}}{T_{н1} - T_{гр}} = \left(e^{-\sum_{i=1}^{N_{dl}} a_i L_i} \right) K_0. \quad (6)$$

Таким образом, для всех одноконтурных участков выбранного пути коэффициент теплопередачи от газа к грунту определяется по формуле:

$$K_0 = - \frac{\ln\left(\frac{T_{kN_{dl}} - T_{гр}}{T_{н1} - T_{гр}}\right)}{\sum_{i=1}^{N_{dl}} a_i L_i}. \quad (7)$$

Обозначим: $T_{kN_{dl}}^{факт}$ – измеренное значение температуры газа в конце выбранного пути; $T_{н1}^{факт}$ – измеренное значение температуры газа в начале выбранного пути; $T_{kN_{dl}}^{расч}$ – значение температуры газа в конце выбранного пути, рассчитанное при $K = K_0^{расч}$; $T_{н1}^{расч}$ – значение температуры газа в начале выбранного пути, рассчитанное при $K = K_0^{расч}$; $K_0^{факт}$ – искомое фактическое значение K , отвечающее $T_{kN_{dl}}^{факт}$ и $T_{н1}^{факт}$; $K_0^{расч}$ – нормативно-справочное значение K для участка ГТС, принятое в качестве начального значения. Фактическое значение K для всех одноконтурных участков, входящих в путь, определяется по формуле:

$$K_0^{факт} = K_0^{расч} \cdot \frac{\ln\left(\frac{T_{kN_{dl}}^{факт} - T_{гр}}{T_{н1}^{факт} - T_{гр}}\right)}{\ln\left(\frac{T_{kN_{dl}}^{расч} - T_{гр}}{T_{н1}^{расч} - T_{гр}}\right)}. \quad (8)$$

4. Определение E для пути, соединяющего вход и выход фрагмента

Рассмотрим задачу определения E для пути, состоящего из N_{dl} одноконтурных участков. Из уравнения (1) можно вывести следующую формулу для коэффициента эффективности участка:

$$E = \sqrt{\frac{q^2 \cdot c}{P_H^2 - P_K^2}}, \quad (9)$$

где c – расчетный коэффициент, который для данной задачи можно считать независимым от q , P_H и P_K [3].

Запишем формулу (9) для каждого из N_{dl} участков трубопроводов, составляющих рассматриваемый путь, в предположении, что для всех участков значение коэффициента гидравлической эффективности одинаково ($E=E_0$):

$$\begin{aligned} (P_{н1}^2 - P_{к1}^2) \cdot E_0^2 &= c_1 \cdot q_1^2, \\ (P_{н2}^2 - P_{к2}^2) \cdot E_0^2 &= c_2 \cdot q_2^2, \\ &\dots \\ (P_{нN_{dl}}^2 - P_{кN_{dl}}^2) \cdot E_0^2 &= c_{N_{dl}} \cdot q_{N_{dl}}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Для каждой пары смежных участков газопровода $(i, i+1)$ давление газа в конце i -го участка $(i=1..N_{dl}-1)$ совпадает с давлением газа в начале $(i+1)$ -го участка $(i=1..N_{dl}-1)$, значит, соотношения (10) можно представить в виде:

$$(P_{н1}^2 - P_{кN_{dl}}^2) \cdot E_0^2 = \sum_{i=1}^{N_{dl}} c_i \cdot q_i^2 \quad (11)$$

Таким образом, коэффициент гидравлической эффективности для всех одноконтурных участков выбранного пути определяется по формуле

$$E_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{dl}} c_i \cdot q_i^2}{P_{н1}^2 - P_{кN_{dl}}^2}} \quad (12)$$

Обозначим: $P_{кN_{dl}}^{\text{факт}}$ – измеренное значение давления газа в конце выбранного пути; $P_{н1}^{\text{факт}}$ – измеренное значение давления газа в начале выбранного пути; $P_{кN_{dl}}^{\text{расч}}$ – значение давления газа в конце выбранного пути, рассчитанное при $E = E_0^{\text{расч}}$; $P_{н1}^{\text{расч}}$ – значение температуры газа в начале выбранного пути, рассчитанное при $E = E_0^{\text{расч}}$; $E_0^{\text{факт}}$ – искомое фактическое значение E , отвечающее $P_{кN_{dl}}^{\text{факт}}$ и $P_{н1}^{\text{факт}}$; $E_0^{\text{расч}}$ – нормативно-справочное значение E для участка ГТС, принятое в качестве начального значения.

Фактическое значение коэффициента гидравлической эффективности для всех одноконтурных участков выбранного пути определяется по формуле:

$$E_0^{\text{факт}} = E_0^{\text{расч}} \cdot \sqrt{\frac{(P_{н1}^{\text{факт}})^2 - (P_{кN_{dl}}^{\text{факт}})^2}{(P_{н1}^{\text{расч}})^2 - (P_{кN_{dl}}^{\text{расч}})^2}} \quad (13)$$

5. Определение K и E участка трубы

Чтобы усреднить полученные для одного участка значения $K_{ср}$ и E , обозначим W_i множество всех путей, в которые входит i -й $(i=1..N_d)$ одноконтурный участок газопровода. Фактический коэффициент теплопередачи от газа к окружающей среде для i -го участка определяется по формуле:

$$K_i^{\phi} = \frac{1}{w_i} \cdot \sum_{j \in W_i} K_j^{\text{факт}}, \quad (i=1..N_d) \quad (14)$$

Фактический коэффициент эффективности для i -го участка газопровода определяется по формуле:

$$E_i^{\phi} = \frac{1}{w_i} \cdot \sum_{j \in W_i} E_j^{\text{факт}}, \quad (i=1..N_d) \quad (15)$$

6. Результаты работы метода идентификации $K_{ср}$ и E для фрагмента ГТС

В качестве примера был выбран фрагмент ГТС с двумя точками входа и тремя точками

выхода (рис. 1). В точках входа заданы измеренные значения давления и температуры газа, а в точках выхода – значения расхода. Величины, равные нулю, считаются неизвестными и при выполнении решения задачи идентификации в расчет не принимаются.

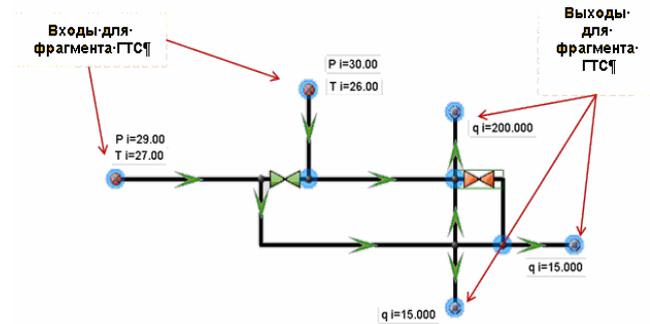


Рис. 1

После выполнения температурно-гидравлического расчета для всех возможных пар «вход-выход» формируются пути, которые их соединяют, и выполняется расчет K и E . На рис. 2 представлен один из путей, соединяющих точки входа и выхода.

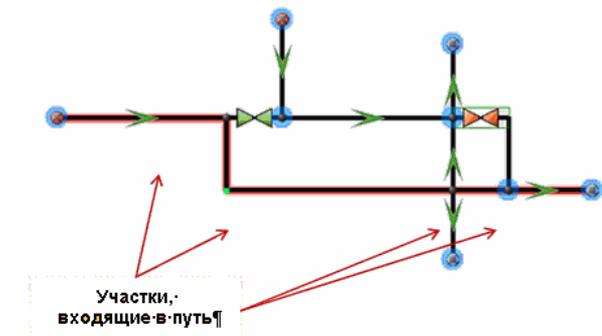


Рис. 2

Затем для каждого участка выбираются все пути, которые его содержат (рис.3).

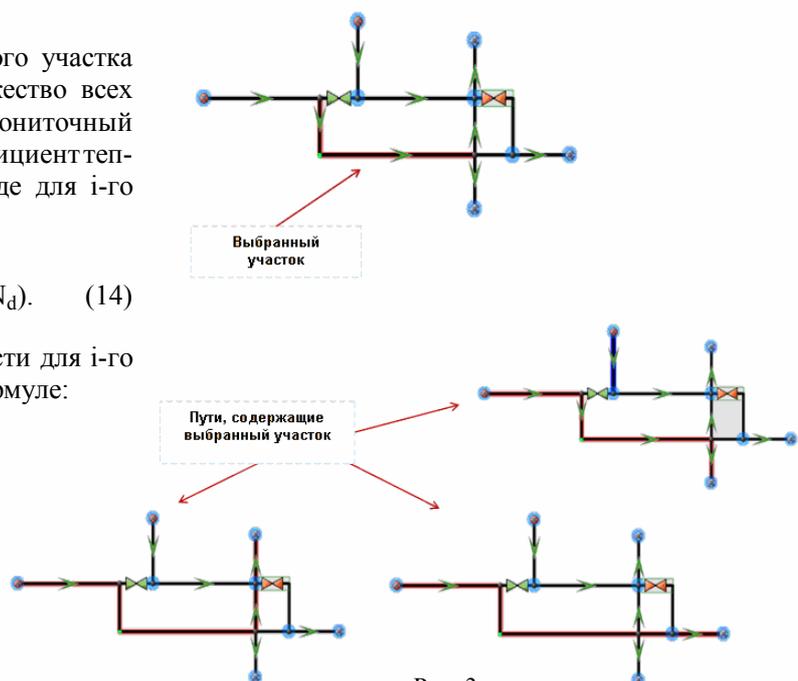


Рис. 3

На рис. 4 представлены окончательные значения $K_{ср}$ и E для каждого из участков газопровода, входящих в фрагмент ГТС.

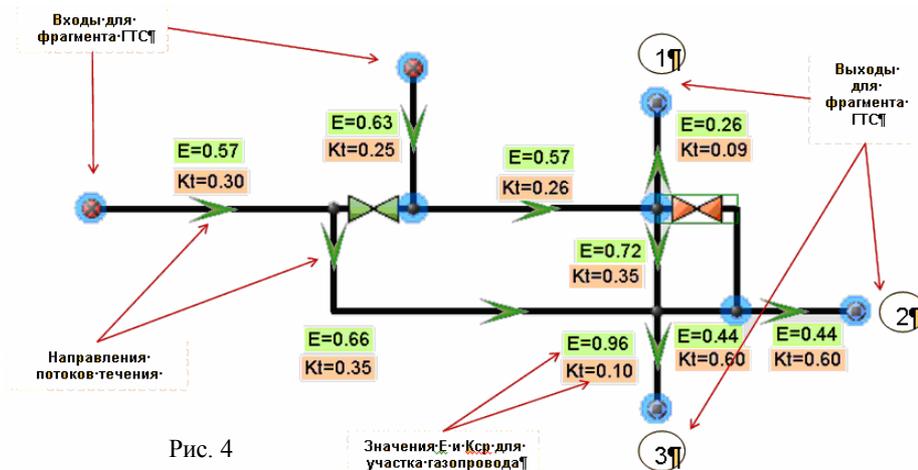


Рис. 4

Необходимость выполнения идентификации параметров наглядно видна на рис. 5 и 6. При проведении температурно-гидравлического расчета с использованием нормативно-справочных значений параметров $K=0,8$ Вт/(м²·К) и $E=0,95$ расхождение расчетных и измеренных значений давления на выходах фрагмента доходит до 6,43 кгс/см², а температур – до 9,97°C. А после проведения идентификации максимальное расхождение по давлению составляет 0,02 кгс/см², а по температуре - 0,73°C.

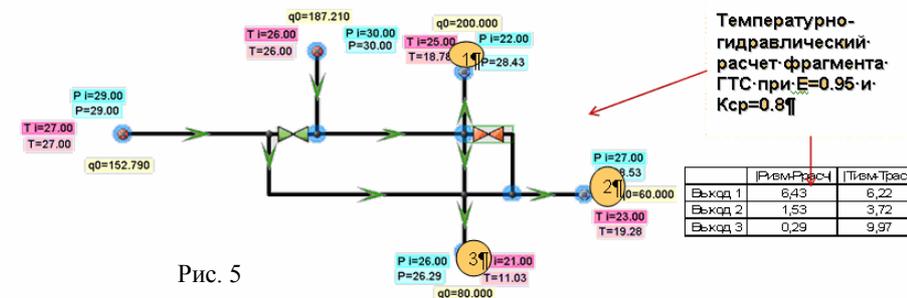


Рис. 5

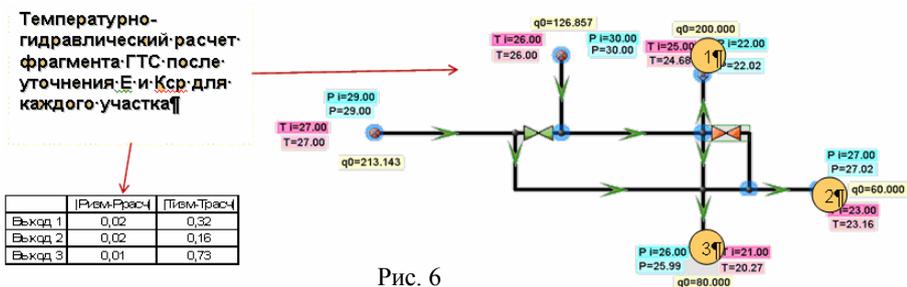


Рис. 6

Выводы

Рассмотрена задача идентификации коэффициентов гидравлического сопротивления и теплопередачи от газа к грунту для фрагмента ГТС произвольной структуры. Эти коэффициенты применяются при расчетах основных параметров режима транспортирования газа, а потому их идентификация позволяет построить математическую модель стационарного неизотермического течения газа на фрагменте ГТС, адекватную реальному объекту и пригодную для выполнения оперативных диспетчерских расчетов. Предложенный метод идентификации E и K является итеративным, однако позволяет обойтись минимальными вычислительными ресурсами. Поэтому его рекомендуется использовать при расчете параметров режимов работы фрагментов ГТС, а также для диагностики состояния трубопроводов в рамках автоматизированных систем управления технологических процессов трубопроводных сетей.

Литература: 1. Евдокимов А.Г. Оптимальные задачи на инженерных сетях. Харьков: Вища шк., 1977. 153 с. 2. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Харьков: Вища шк., 1980. 144 с. 3. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы: ОНПП-51-1-84. Киев, Госстандарт Украины. 1999. 95 с. (Отраслевые нормы технологического проектирования).

Поступила в редколлегию
12.08.2011

Тевяшев Андрей Дмитриевич, академик УНГА, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной математики ХНУРЕ. Научные интересы: стохастические модели и методы принятия решений в условиях риска и неопределённости. Увлечения и хобби: теннис, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-14-36, e-mail: tad45@mail.ru.

Тевяшева Ольга Андреевна, канд. техн. наук, начальник отдела Института транспорта газа. Научные интересы: оптимальное управление инженерными сетями. Увлечения: театр, музыка. Адрес: Украина, 61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16, тел. (057) 730-57-87, e-mail: tevyasheva@itransgaz.com.

Пшеничник Ирина Александровна, начальник сектора Института транспорта газа. Научные интересы: оптимальное управление инженерными сетями. Увлечения: вышивка, ландшафтный дизайн. Адрес: Украина, 61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16, тел. (057) 730-57-87, e-mail: femy@ukr.net.