

УДК 536.244

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ГАЗОПРОВОДОМ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ*

А.А. Базаров, А.И. Данилушкин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru; aidanilushkin@yandex.ru

Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию процессов теплообмена в системе «газовый поток – труба – окружающая среда». Проведен анализ влияния сезонных изменений температуры воздуха на тепловые потоки от трубопровода в грунт и температуру трубы. Выявлена большая инерционность процессов теплообмена в грунте. Разработаны численные и аналитические модели процессов распространения тепла в грунте, определены параметры моделей для стационарных режимов. На базе связанной термодинамической модели газового потока в трубе с учетом теплообмена с окружающей средой определены профиль скоростей и толщина пристенного слоя, что позволило перейти к тепловой задаче с движущейся двухслойной средой, эквивалентной по распределению температуры в трубопроводе и величине теплового потока в окружающую среду.

Ключевые слова: тепловые процессы, гидравлика, связанная модель, турбулентный режим.

Температурные режимы газопроводов влияют на давление и пропускную способность. При выборе режимов работы компрессорных станций нужно учитывать не только возможности систем охлаждения газа после компримирования, но и распределение температуры на участках газопровода между соседними станциями. Моделирование тепловых процессов обязательно должно сопровождаться расчетом гидравлических режимов. Взаимосвязанность этих двух задач делает решение трудоемким. Для оперативного получения параметров процессов желательно применение аналитических методов, но ввиду множества факторов, влияющих на точность решения, необходимо произвести предварительные исследования численными методами. Цель данной работы заключается в оценке влияния различных факторов на структуру модели.

Распределение температуры при расчете теплообмена между трубопроводом в траншее и окружающей средой зависит от многих факторов, среди которых – сезонные колебания температуры воздуха и грунта, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния, изменение влажности грунта, изменение температуры поверхности трубопровода. Природные процессы распространения тепла от центра планеты в окружающую среду формируют распределение температуры, которое испытывает на себе влияние внешних факторов в верхних слоях почвы. Изменения, происходящие в грунте, сказываются на значении температуры на

* Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-0305.

Александр Александрович Базаров (д.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александр Иванович Данилушкин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

глубинах в пределах от единиц до десятков метров. При отсутствии какого-либо вмешательства температура на этих глубинах практически неизменна в течение всего года. На рис. 1 приведены диаграммы температур грунта (суглинок) на разной глубине в течение года для Сергиевского района Самарской области [1]. Для выбранного региона при постоянстве влажностного и температурного режима на глубине 3,2 м грунт практически не промерзает.

При моделировании тепловых процессов в системе «трубопровод – грунт» необходим учет существующих тепловых потоков и распределений температур. Здесь есть проблема выбора размеров расчетной области. Согласно измерениям на сверхглубокой скважине на Кольском полуострове на пятикилометровой глубине окружающая температура превысила 70 °С, на семикилометровой – 120 °С, а на глубине 12 км датчики зафиксировали 220 °С. Картина распределения температуры существенно отличается для других регионов: в частности, для района Кавказа температура 220 °С характерна для глубины 5 км. Моделирование теплообмена между глубинными слоями и атмосферой показало с учетом различных допущений, что плотность теплового потока имеет величину около 0,02 Вт/(м·К) для района Кольского полуострова. Как показали исследования в этом районе, существующие представления о свойствах пород, залегающих на больших глубинах, не всегда соответствуют действительности.

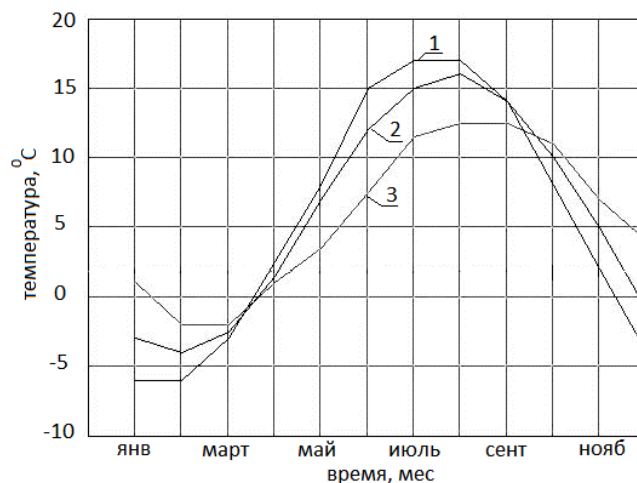


Рис. 1. Годовые диаграммы температур в районе Сергиевска, грунт – суглинок:
1 – на глубине 1,6 м; 2 – на глубине 2,4 м; 3 – на глубине 3,2 м

Все это влияет на распределение температуры по глубине и на величину теплового потока от центра к поверхности. Более качественная картина распределения температуры при теплообмене трубопровода и окружающей среды может быть получена с учетом не только среднегодовых значений, но и сезонных колебаний. Речь не идет о рассмотрении расчетной области с такими размерами. Вместе с тем любое вмешательство в природные процессы ведет к отклонению от установившегося состояния. Задача состоит в определении минимально допустимой величины, чтобы обеспечить приемлемую точность расчетов при умеренных требованиях к вычислительной мощности компьютера.

Задача теплообмена между поверхностью трубы, грунтом и атмосферой описывается дифференциальным уравнением в частных производных [2]. Расчетная

область заранее неизвестных размеров охватывает грунт и расположенный в нем трубопровод.

$$a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (1)$$

Граничные условия состоят из нескольких составляющих.

Теплообмен поверхности с атмосферой является конвективным:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T(0, x) - T_{surf}). \quad (2)$$

Теплообмен на горизонтали на расчетной глубине соответствует граничным условиям первого рода:

$$T(y_{max}, x) = T_g. \quad (3)$$

Теплообмен на вертикальных участках границы области представлен изоляцией

$$\frac{\partial T(x_l, y)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(x_r, y)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности, $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; γ – плотность; α – коэффициент конвективного теплообмена; T_{surf} – температура на поверхности грунта; T_g – температура грунта на искомой глубине y_{max} ; x_l , x_r – координаты левой и правой границ области.

Теплофизические параметры грунта были приняты с учетом характерных для данного региона видов грунта, распределений температуры и влажности (рис. 2). Верхний слой как наиболее прогреваемый летом имеет самую низкую влажность и коэффициент теплопроводности, равный 0,4 Вт/(м·К). Для самых глубоких слоев (более 20 м от поверхности) принята влажность 20 % и теплопроводность 2,7 Вт/(м·К). Грунт был разбит по глубине на несколько слоев с отличающимися свойствами. В качестве трубы газопровода взята труба диаметром 820 мм с покрытием пленкой в два слоя. Температура поверхности трубы (под пленкой) принята равной 35 °С (298 К). Температура воздуха принята равной 15 °С, а температура грунта на глубине 40 м – 10 °С. Постепенным увеличением размеров расчетной области по горизонтали и в глубину была получена экспоненциальная зависимость плотности теплового потока от геометрических размеров расчетной области, главным образом глубины. При этом снижается градиент температуры в удаленных от трубопровода областях. Все это позволяет для данных параметров грунта выбрать размеры области, обеспечивающие приемлемую погрешность расчетов.

Для выбранных размеров глубины и ширины расчетной области построено распределение температуры (рис. 3).

Для принятых условий расчета полученное распределение температур соответствует тепловому потоку с одного погонного метра трубопровода, равному 94 Вт. Размеры расчетной области (ширина 100 м, глубина 40 м) позволяют с учетом требований к качеству сетки конечных элементов производить расчеты только для небольших по протяженности участков.

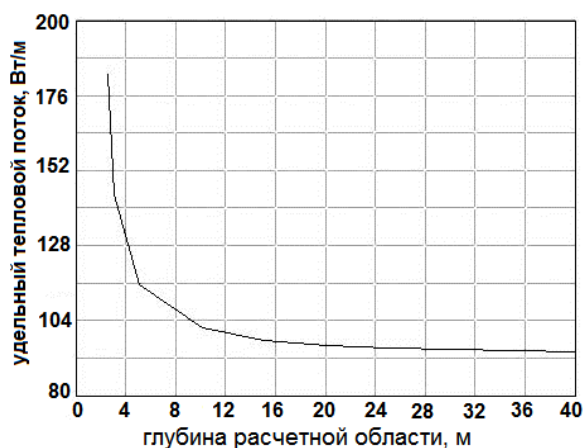


Рис. 2. Зависимость теплового потока с поверхности трубы в грунт и атмосферу от размеров расчетной области

Диаграммы температур на рис. 3 построены для стационарного режима в соответствии с поставленной задачей (1) – (4).

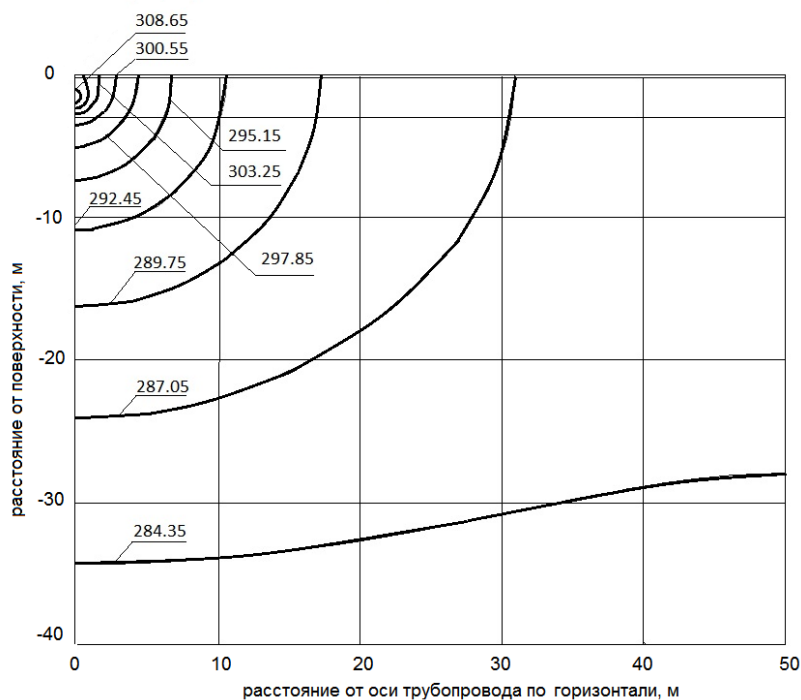


Рис. 3. Распределение температуры (K) в грунте при растекании тепла от трубопровода

Проведенные дополнительно расчеты на нестационарной модели показали очень большую инерционность процесса. Приведенная на рис. 4 временная диаграмма температуры на глубине 5 м при неизменных параметрах позволяет приблизительно оценить постоянную времени процесса равной 9166 ч, или 381 сут. На глубине 3 м постоянная времени равна 1000 ч, или 41,6 сут, и на глубине 2,5 м равна 250 ч, или 10,4 сут. Таким образом, тепловые процессы даже без учета сезонных колебаний температуры атмосферы целесообразно учитывать в виде

усредненных распределений.

Полученные результаты позволяют перейти к определению распределения температуры и теплового потока вдоль всей трассы. В этом случае можно с приемлемой погрешностью перейти от описания процессов в нескольких средах к модели движущейся среды в трубе с граничными условиями третьего рода, задаваемыми на внешней поверхности трубы. При этом в качестве температуры среды принимается температура поверхности грунта. Ввиду большой инерционности тепловых процессов такой подход будет корректен только для установившихся состояний. В большинстве случаев будет наблюдаться изменяющаяся во времени погрешность.

В результате расчетов теплообмена между трубой и грунтом при изменении температуры воздуха получена таблица значений теплового потока и коэффициента конвективного теплообмена (см. таблицу).

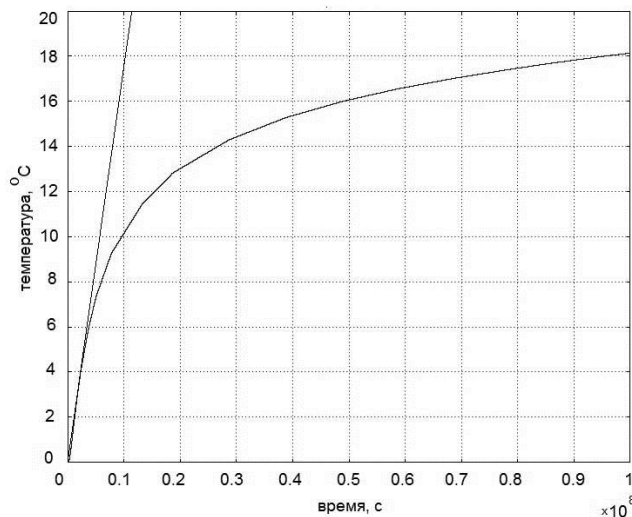


Рис. 4. Временная диаграмма температуры грунта под газопроводом на глубине 5 м

Плотность теплового потока и эквивалентный коэффициент конвективного теплообмена с поверхности трубы

$T, ^\circ\text{C}$	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$q, \text{Вт/м}^2$	29	36,5	43,9	51,3	58,7	66	73,4	80,8	88,2
$\alpha, \text{Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$	5	4,7	4,52	4,4	4,3	4,25	4,2	4,16	4,13

Определение параметров процесса теплопередачи в газовом потоке вдоль всей трассы зависит от температуры, давления и скорости движения газа. Для построения математической модели требуется учет не только тепловых, но и гидравлических процессов. Исходя из сложности задачи за основу принимается связанная термогидравлическая модель.

Для проведения дальнейших исследований осуществим построение термогидравлической модели потока газа в трубе. За исходные данные примем: давление газа 75 атм, коэффициент теплопроводности газа $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{град)}$, плотность газа $\rho = 0,667 \text{ кг/м}^3$ (атм. давление) ($\rho = 50,5 \text{ кг/м}^3$ при давлении 75 атм), теплоемкость $2,8 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{град)}$, динамическая вязкость $\mu = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, кине-

матическая вязкость газа $\nu = \frac{\mu}{\gamma} = 2.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}$, коэффициент температуропро-

водности $a = \frac{\lambda}{c\gamma} = 2.8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, скорость движения газа в трубопроводе w в диа-
пазоне 4–20 м/с.

Для выяснения характера движения произведем расчет некоторых величин.
Критерий Рейнольдса для газового потока в трубе

$$\text{Re} = \frac{wl_0}{\nu} = \frac{4 \cdot 0.8}{2.6 \cdot 10^{-7}} = 1.23 \cdot 10^7.$$

Коэффициент теплообмена

$$a = \frac{\lambda}{\delta} = 0.02 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.43} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25} \quad \varepsilon_1 = 8477 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{град}).$$

В данном случае величины критерия Прандтля Pr для жидкости Pr_f и стенки Pr_w совпадают. Здесь $\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = 0.787$. Поправочный коэффициент $\varepsilon_1 = 1$.

Толщина слоя возле стенки

$$\delta = \frac{\lambda}{a} = 4.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Полученная величина характеризует слой, в котором не происходит переме-
шивания. Одновременно это говорит о желательных размерах элементов в формируемой сетке в указанной области.

Из анализа проведенных расчетов можно сделать заключение о турбулентном характере движения газа и об очень малой величине пристенного слоя.

В качестве модели процесса принимаем $(k - \varepsilon)$ – модель турбулентности, основанную на двух уравнениях [3].

В $(k - \varepsilon)$ -модели выводятся уравнения для турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ε :

$$k = 0.5 \left(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'} \right); \quad \varepsilon = \nu_T \overline{\left[\frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right] \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right]}.$$

Уравнения для переноса импульса и непрерывности имеют следующий вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + \rho u \cdot \nabla u + \nabla p = 0; \quad \nabla \cdot u = 0, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$); u – вектор усредненной скорости ($\text{м}/\text{с}$); η – динамическая вязкость ($\text{Па} \cdot \text{м}$); p – давление (Па); k – энергия турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}^2$); ε – коэффициент рассеяния энергии турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}^3$).

Уравнения для k и ε имеют вид:

– уравнение переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho u \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla u + (\nabla u)^T)^2 - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

– уравнение переноса скорости диссипации турбулентной энергии

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \rho u \cdot \nabla \varepsilon = \frac{1}{2} \rho C_{\varepsilon 1} k \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

Здесь для удобства записи использованы тензорные обозначения в декартовых координатах. Левые части (6) и (7) представляют конвективный перенос соответственно величин k и ε . Три члена в правой части уравнений описывают диффузию, выделение и диссипацию соответствующих величин. Данные уравнения выведены из нестационарных уравнений Навье – Стокса, в которых сохранены диффузионные члены, но отброшены члены, соответствующие вязкой диссипации, а также произведена модификация некоторых других членов.

Локальная турбулентная вязкость μ_T может быть выражена через локальные значения k и ε следующим образом:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}.$$

Эмпирические константы в уравнениях (6)–(7) равны

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Уравнения (6) и (7) справедливы при $\mu_T \gg \mu$. Очевидно, что это неверно вблизи твердой поверхности, где турбулентные флуктуации подавляются стенкой. Поэтому вблизи твердой поверхности вводятся специальные пристенные функции, при определении которых обычно предполагают логарифмический закон изменения тангенциальной составляющей скорости в направлении нормали, а также то, что выделение турбулентной кинетической энергии в области действия логарифмического закона равно ее диссипации. В наиболее простой форме это эквивалентно введению вблизи стенки длины перемешивания при определении дополнительной вязкости. Использование специальных стенок функций позволяет определить граничные условия для k и ε на некотором удалении от твердой поверхности стенки трубы:

$$n \cdot u = 0; \quad \left[(\eta + \eta_T) \left(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right) \right] n; \quad n \cdot \nabla k = 0. \quad (8)$$

На входе задается скорость, равная 20 м/с, а на выходе – расчетное давление, хотя можно задать нулевое в случае принятия постоянной плотности газа.

На осевой линии задаются граничные условия симметрии:

$$\left(-pI + (\eta + \eta_T) \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) \right) \cdot t = 0; \quad n \cdot u = 0; \quad (9)$$

$$n \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k - \rho u k \right) = 0; \quad n \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon - \rho u \varepsilon \right) = 0. \quad (10)$$

Приведенные выражения (5) – (10) описывают математическую модель турбулентного движения газового потока, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов (рис. 5).

Гидравлическая задача является очень ресурсоемкой: для трубопровода диаметром 0,8 м и длиной 200 м построена сетка, содержащая 400 000 элементов и позволяющая получить хорошо сходящееся решение, но при этом задача занимает 25 Гб оперативной памяти. Нужно отметить, что расстояние, на котором происходит затухание переходного процесса, отличается от встречающегося в литературе значения, равного 6–8 диаметрам трубы. В приведенном случае эта кратность составляет около 60.

Кроме выявления характера движения газового потока при моделировании

стоит задача расчета теплового потока от трубопровода в окружающий грунт. Сложность состоит в том, что возможно объединение термических и гидравлических процессов только для одной среды. Процессы внутри трубы, в стенке трубы и в грунте приходится рассматривать в отдельности. В данном случае к гидравлической модели добавляется тепловая в газовом потоке.

Стационарная задача теплопроводности для движущейся среды описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - v \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

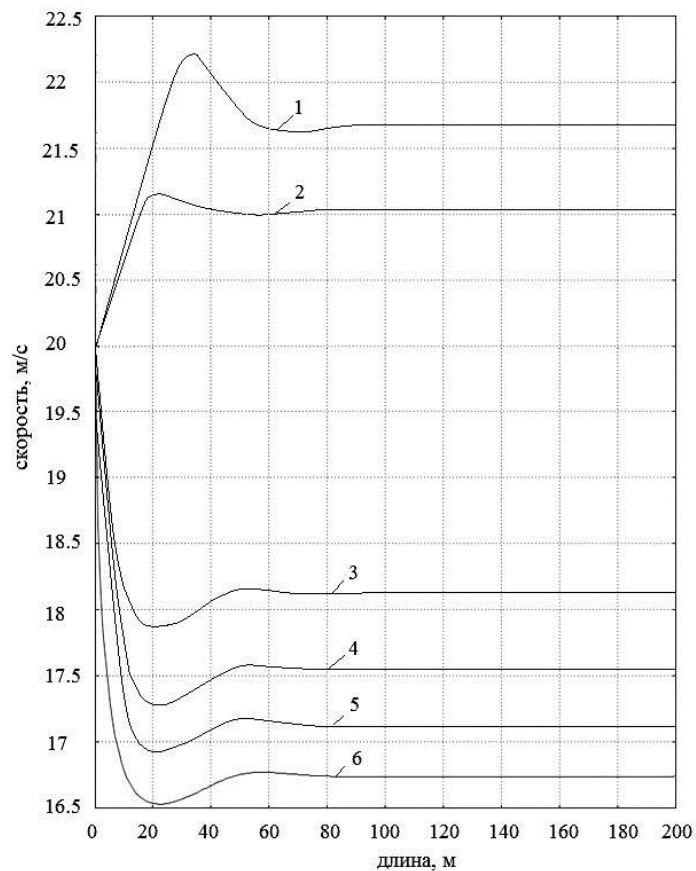


Рис. 5. Диаграммы скоростей потока газа:
 1 – на оси потока; 2 – на расстоянии 200 мм от стенки; 3 – на расстоянии 20 мм от стенки;
 4 – на расстоянии 10 мм от стенки; 5 – на расстоянии 5 мм от стенки;
 6 – на расстоянии 1 мм от стенки

Граничные условия состоят из нескольких уравнений:

– теплообмен боковой поверхности трубопровода с окружающей средой задается в виде конвективного потока

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T(R, x) - T_c);$$

– на входе задается постоянная температура

$$T(r, 0) = T_0;$$

– на осевой линии задается условие симметрии, заключающееся в отсутствии

теплового потока в направлении, перпендикулярном оси:

$$\frac{\partial T(0, x)}{\partial r} = 0;$$

– на выходе задается отсутствие теплообмена с окружающей средой:

$$\frac{\partial T(r, X)}{\partial x} = 0.$$

В результате расчетов получены диаграммы плотности теплового потока с поверхности трубы (рис. 6) и температуры на выходе участка трубопровода длиной 200 м (рис. 7).

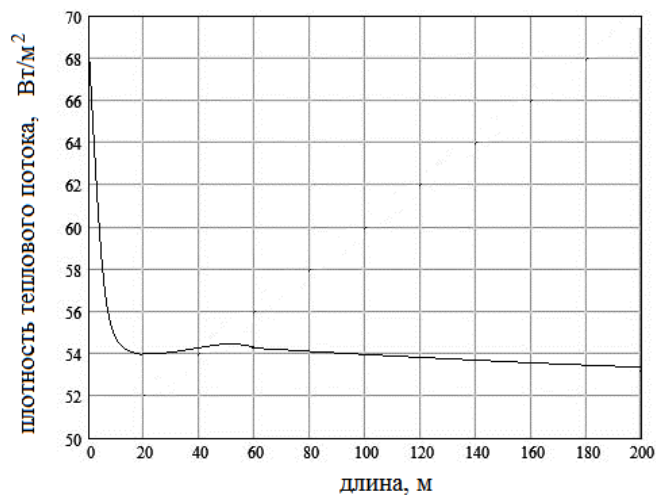


Рис. 6. Распределение плотности теплового потока с поверхности трубы по длине трубопровода

Диаграмма температуры свидетельствует о том, что теплообмен в пристенном слое менее интенсивный, чем в основном потоке. Это привело к росту перепада температур.

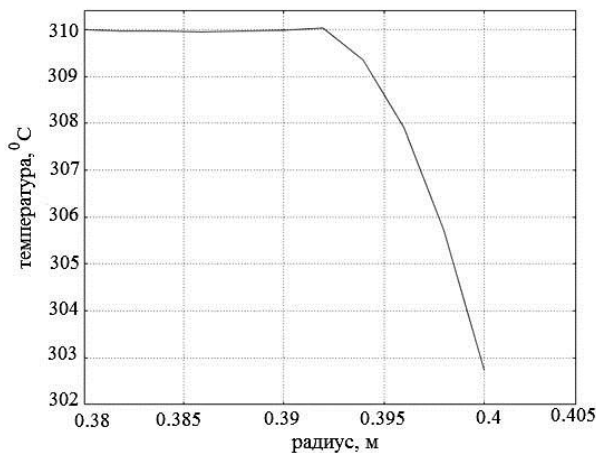


Рис. 7. Диаграмма температуры на выходе участка трубопровода

Тепловой поток с поверхности трубопровода длиной 200 м составляет 27104 Вт. Плотность теплового потока с боковой поверхности равна 53,9 Вт/м². Предварительные расчеты теплообмена между поверхностью трубопровода и грунтом

без учета внутренних процессов в газовом потоке показали значение плотности теплового потока для температуры среды 15 °С, равное 36,5 Вт/м² (см. таблицу). Таким образом, внутреннее тепловое сопротивление газа оказалось недостаточно большим, чтобы отразиться на результирующем тепловом потоке с поверхности трубопровода в грунт. Уточнения параметров процесса теплообмена не требуется, и при построении упрощенных моделей процесса теплообмена между газопроводом и грунтом достаточно данных приведенной таблицы.

Проведенные теоретические и расчетные исследования теплообмена в системе «газовый поток – труба – грунт» показали значительное влияние природных процессов. При моделировании теплопередачи от газопроводов в грунт и атмосферу можно пренебречь внутренним тепловым сопротивлением в газовом потоке. Построение моделей теплообмена для протяженных участков газопровода возможно без применения гидравлических расчетов, что позволяет обеспечить приемлемую точность решения задачи средствами персонального компьютера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://atlas-yakutia.ru/>
2. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
3. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries Inc., 1993. – 460 p.
4. *Aris R.* Vectors, Tensors and the Basic Equations of Fluid Dynamics. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1962.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2015 г.

MODELLING OF PROCESSES OF HEAT EXCHANGE BETWEEN A GAS PIPELINE AND A ENVIRONMENT

A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper deals with a number of problems considering the modelling of processes of heat exchange in the “gas stream-pipe-environment” system. The paper analyses the effect of seasonal air temperature changes on the heat flow from the pipe to the ground and pipe temperature. Great inertance of the heat exchange process in the ground is revealed. Numerical and analytical models of heat spread in the ground are developed, parameters of models for the stationary modes are defined. On the basis of the connected thermohydraulic model of a gas stream in the pipe with consideration of heat exchange with the environment the velocity profile is defined, as well as the wall layer thickness; it allows to pass to a thermal problem with the moving two-layer medium equivalent in terms of temperature distribution in the pipeline and magnitude of a thermal stream into the environment.

Keywords: *thermal processes, the hydraulics, the connected model, a turbulent regime.*

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*