модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований.

Список литературы: 1. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем. // Динамика и прочность машин. 1998. Вып. 56. С. 175-181. 2. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. 1999. Вып. 53. С. 148-155.

Поступила в редколлегию 16.04.02

УДК 622.691.4 : 536.2

А.В. ЯКУНИН, канд.техн.наук; ***В.А. РАТАУШКИН***

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА УПРАВЛЯЕМОГО ПОТОКА ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ

Розглядаються слабо нестаціонарні неізотермічні керовані процеси транспорту газу, що дозволяє використати ряд спрощуючих припущень про характер течії. Пропонується скінченне аналітичне зображення розподілу температури газу вздовж трубопроводу, одержане на основі методу малого параметра і декомпозиції крайової задачі в рамках операційного числення.

Введение. Создание и внедрение информационных ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий магистрального транспорта газа [1-3] требуют модернизации известных и разработки новых моделей и методов описания производственных процессов. Оперирование со знаниями об объектах управления все чаще организуется в режиме реального времени, хотя существенными ограничивающими факторами остаются уровень производительности вычислительных систем и многообразие возможных технологических ситуаций. Поэтому актуальной проблемой является как учет возможно большего числа факторов для детального описания изучаемых процессов, так и создание упрощенных моделей для оценочных расчетов [1].

Постановка задачи и анализ проблемы. Нестационарный тепловой режим течения газа в магистральном трубопроводе (МТ) при обычно вводимых упрощениях [1-6] описывается квазилинейным уравнением теплового баланса

$$\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{p}{zRTq}\cdot\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{4K}{DC_p q}\cdot\left(T-T_*\right)-\frac{1}{C_p q}\cdot\frac{\partial p}{\partial t}=0 \qquad (1)$$

при начальном

$$T(x,0)=T_н(x) \quad (0\le x\le L) \qquad (2)$$

и граничном

$$T(0,t)=T_г(t) \quad (t>0) \qquad (3)$$

условиях.

Здесь $p=p(x,t)$ – давление; $q=q(x,t)$ – удельный массовый расход; $T=T(x,t)$ – температура; x – координата вдоль трубопровода; t – время; R – газовая постоянная; z – коэффициент сжимаемости; L – длина трубопровода; D – диаметр трубопровода; C_p – удельная теплоемкость; $T_н(x)$, $T_г(t)$ – функции, определяющие начальные и граничные условия; $T_*=T_*(x,t)$ – температура окружающей среды (грунта); K – коэффициент теплопередачи.

В статье [6] рассмотрена линеаризация уравнения (1) с использованием усреднения коэффициентов и получено аналитическое решение методом характеристик в виде суперпозиции громоздких интегральных операторов.

Предложенное в [7] упрощенное представление неустановившихся тепловых процессов в МТ касается лишь частного случая стационарных граничных условий.

В данной работе предлагается простое конечное аналитическое решение для возмущенных краевых условий на основе метода малого параметра и декомпозиции краевой задачи в рамках операционного исчисления.

Упрощение поставленной краевой задачи и выбор представления решения. Ограничиваясь рассмотрением случая течения охлажденного газа (по технологическим соображениям приблизительно до температуры грунта $T\approx T_*$) и считая температуру окружающей среды постоянной $T_*=const$, можно представить слабо нестационарные неизотермические управляемые процессы в МТ как наложение стационарного изотермического режима (основной фон) и нестационарных неизотермических возмущений. В результате краевая задача (1)-(3) принимает упрощенный вид, допускающий расщепление по малому параметру $\varepsilon=\sqrt{2D/\lambda L}=10^{-1}\div 10^{-2}$ [8], где λ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Если ввести безразмерные переменные

$$\bar{p}=\frac{p}{p_c};\quad \bar{q}=\frac{q}{q_0};\quad \bar{T}=\frac{T}{T_0};\quad \bar{T}_*=\frac{T_*}{T_0};\quad \bar{x}=\frac{x}{L};\quad \bar{t}=\frac{c_0 t}{L} \qquad (4)$$

и представить начальные и граничные условия как

$$\overline{T}(\overline{x},0)=1+\varepsilon\overline{T}_{1н}(\overline{x}) \quad (0\le\overline{x}\le 1)\ ; \tag{5}$$

$$\overline{T}(0,\overline{t})=1+\varepsilon\overline{T}_{1г}(\overline{t}) \quad (\overline{t}>0)\ , \tag{6}$$

где вторые слагаемые отражают возмущения основного фона, тогда можно получить краевую задачу для квазилинейного уравнения переноса

$$\frac{\partial\overline{T}}{\partial\overline{x}}+\frac{\overline{p}}{\overline{T}\overline{q}}\cdot\frac{\partial\overline{T}}{\partial\overline{t}}+\frac{4K}{DC_p q_0\overline{q}}\cdot\left(\overline{T}-\overline{T}_*\right)-\frac{zR}{C_p\overline{q}}\cdot\frac{\partial\overline{p}}{\partial\overline{t}}=0 \tag{7}$$

при условиях (5), (6). Причем

$$\overline{T}_*=1+\varepsilon\overline{T}_{1*}\ , \quad \overline{T}_{1*}=const\ . \tag{8}$$

Здесь q_0, T_0 – значения удельного массового расхода и температуры при основном стационарном режиме; $p_c=c_0 q_0$ – некоторое характерное давление; $c_0=\sqrt{zRT_0}$ – скорость звука в газе при основном стационарном режиме. Причем в соотношениях (5) - (8) учтено $\overline{T}_0=1;\ \overline{q}_0=1$.

Для упрощения записей в дальнейших выкладках знак черты над безразмерными переменными опущен.

Принимая во внимание возмущенный характер краевых условий и то, что в уравнении (7) последнее слагаемое, согласно [2-5], имеет порядок ε по отношению к остальным членам, решение краевой задачи (5)-(7) можно искать в виде разложения по малому параметру [9]:

$$T(x,t)=T^{(0)}+\varepsilon T^{(1)}+\varepsilon^2 T^{(2)}+\ldots\ , \tag{9}$$

где из практических соображений достаточно ограничиться расчетом до первого приближения.

Построение модели теплового режима. Нулевому приближению соответствует основной стационарный изотермический режим

$$q^{(0)}=1;\quad T^{(0)}=1;\quad p^{(0)}=p_0(x)=\sqrt{p_0^2(0)-\left(p_0^2(0)-p_0^2(1)\right)x}\ , \tag{10}$$

где $p_0(x)$ – стационарное давление.

При $q_0>0$ стационарное давление $p_0(x)$ – монотонно убывающая функция. Для упрощения в уравнении (7) можно сделать замену $x\to y$, где

$$y=\left(p_0(x)\right)^3.$$

Тогда, обозначая $y_0=p_0^3(0);\quad y_1=p_0^3(1)$, и выражая производную dp/dx из стационарного уравнения движения [1-3] (в принятых безразмерных переменных)

$$\frac{dp}{dx}+a^2\frac{1}{p}=0\ ;\quad a^2=\frac{\lambda L}{2D}\ ,$$

можно получить:

$$p_0(x) = y^{1/3} \quad ; \quad x = \frac{p_0^2(0) - p_0^2(x)}{p_0^2(0) - p_0^2(1)} = \frac{y_0^{2/3} - y^{2/3}}{y_0^{2/3} - y_1^{2/3}} \quad ;$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial p_0} \cdot \frac{dp_0}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial y} = 3 p_0^2 \cdot \left(-\frac{a^2}{p_0} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial y} = -3a^2 p_0 \frac{\partial}{\partial y} = -3a^2 y^{1/3} \frac{\partial}{\partial y} \quad .$$

В результате уравнение (7) принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial y} - b_1 y^{-1/3} \frac{p}{Tq} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - b_2 \, y^{-1/3} \, \frac{1}{q} \left(T - T_*\right) + b_3 \, y^{-1/3} \, \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad , \qquad (11)$$

где постоянные коэффициенты b_1, b_2, b_3 определяются выражениями:

$$b_1 = \frac{2D}{3\lambda L} \quad ; \quad b_2 = \frac{8K}{3\lambda L C_p q_0} \quad ; \quad b_3 = \frac{2DzR}{3\lambda L C_p} \quad .$$

Первое приближение находится как решение краевой задачи для линейного уравнения переноса

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial y} - b_1 \frac{\partial T^{(1)}}{\partial t} - b_2 \, y^{-1/3} \left(T^{(1)} - T_{1*}\right) = 0 \quad , \qquad (12)$$

при начальных и граничных условиях

$$T^{(1)}(y,0) = T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3} - y^{2/3}}{y_0^{2/3} - y_1^{2/3}} \right) \quad \left(y_1 \le y \le y_0\right) \; ; \qquad (13)$$

$$T^{(1)}(y_0, t) = T_{1г}(t) \quad \left(t > 0\right) \; . \qquad (14)$$

Решение полученной задачи в рамках операционного исчисления [10] можно осуществить нетрадиционным способом [11], который позволяет получить достаточно простые оригиналы. Основные этапы такого подхода: 1) получение операторного изображения специальной структуры решения уравнения в частных производных при нулевых начальных условиях без учета граничных условий; 2) переход к оригиналу во временной области; 3) учет заданных начальных условий с помощью соответствующего продолжения оригинала и подбора предыстории при $t \le 0$ для его коэффициентов; 4) учет заданных граничных условий с помощью подбора значений коэффициентов оригинала при $t > 0$.

Для упрощения в краевой задаче (12)-(14) можно ввести новую неизвестную функцию

$$\tilde{T}^{(1)} = \overline{T}^{(1)} - T_{1*} \; .$$

Тогда она принимает вид:

$$\frac{\partial \tilde{T}^{(1)}}{\partial y} - b_1 \frac{\partial \tilde{T}^{(1)}}{\partial t} - b_2 \, y^{-1/3} \, \tilde{T}^{(1)} = 0 \quad , \qquad (15)$$

$$\widetilde{T}^{(1)}(y,0)=T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3}-y^{2/3}}{y_0^{2/3}-y_1^{2/3}}\right)-T_{1*}\quad (y_1\le y\le y_0)\ ; \tag{16}$$

$$\widetilde{T}^{(1)}(y_0,t)=T_{1г}(t)-T_{1*}\quad (t>0)\ . \tag{17}$$

Операторное изображение уравнения (15) при нулевых начальных условиях

$$\frac{\partial \widetilde{T}^{(1)}}{\partial y}-\left(b_1 s+b_2\ y^{-1/3}\right)\widetilde{T}^{(1)}=0 \tag{18}$$

имеет своим решением

$$\widetilde{T}^{(1)}(y,s)=A(s)\ \exp\left(\frac{3}{2}b_2 y^{2/3}\right)\exp(-b_1(y_0-y)s)\ , \tag{19}$$

где $A(s)$ – произвольная функция. В этом легко убедиться непосредственной подстановкой (19) в (18).

Нетрадиционная запись (19) операторного решения уравнения переноса (18) позволяет легко найти [10] соответствующий оригинал

$$\widetilde{T}^{(1)}(y,t)=a(t-b_1(y_0-y))\ \exp\left(\frac{3}{2}b_2 y^{2/3}\right)\eta(t-b_1(y_0-y))\ , \tag{20}$$

где $\eta(t)$ – единичная ступенчатая функция Хевисайда: $\eta(t)=\begin{cases}1, & t>0:\\ 0, & t\le 0.\end{cases}$

Для учета заданных граничных условий следует произвести соответствующий подбор предыстории для функции $a(t)$ на отрезке времени $[-b_1(y_0-y_1);\ 0]$. Убрав единичную функцию в выражении (20), можно продолжить его действие на указанный отрезок времени:

$$\widetilde{T}^{(1)}(y,t)=a(t-b_1(y_0-y))\ \exp\left(\frac{3}{2}b_2 y^{2/3}\right). \tag{21}$$

Положив в полученном решении (21) $t=0$ и учтя начальное условие (16), можно определить функцию $a(t)$ при $t\in[-b_1(y_0-y_1);\ 0]$:

$$T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3}-y^{2/3}}{y_0^{2/3}-y_1^{2/3}}\right)-T_{1*}=a(-b_1(y_0-y))\ \exp\left(\frac{3}{2}b_2 y^{2/3}\right)\quad (y_1\le y\le y_0)\ ,$$

откуда

$$a(-b_1(y_0-y))=\left[T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3}-y^{2/3}}{y_0^{2/3}-y_1^{2/3}}\right)-T_{1*}\right]\ \exp\left(-\frac{3}{2}b_2 y^{2/3}\right)$$

или после замены $t=-b_1(y_0-y)$:

$$a(t)=\left[T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3}-(y_0+t/b_1)^{2/3}}{y_0^{2/3}-y_1^{2/3}}\right)-T_{1*}\right]\ \exp\left(-\frac{3}{2}b_2(y_0+t/b_1)^{2/3}\right). \tag{22}$$

Учтя в (21) при $y = y_0$ граничное условие (17), можно определить функцию $a(t)$ при $t > 0$:

$$T_{1г}(t) - T_{1*} = a(t)\,\exp\left(\frac{3}{2} b_2 y_0^{2/3}\right) \quad (t > 0)\,,$$

откуда

$$a(t) = \left[T_{1г}(t) - T_{1*}\right]\,\exp\left(-\frac{3}{2} b_2 y_0^{2/3}\right). \tag{23}$$

Выражения (22), (23) с помощью единичной функции можно объединить в одно. Тогда, возвращаясь к безразмерной переменной $T^{(1)}$, решение краевой задачи (12) - (14) представляется в виде:

$$T^{(1)}(y,\,t) = T_{1*} + \left\{\left[T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3} - (y + t/b_1)^{2/3}}{y_0^{2/3} - y_1^{2/3}}\right) - T_{1*}\right]\,\exp\left(-\frac{3}{2} b_2 (y + t/b_1)^{2/3}\right)\times\right.$$
$$\times\left[1 - \eta\left(t - b_1(y_0 - y)\right)\right] + \left[T_{1г}\left(t - b_1(y_0 - y)\right) - T_{1*}\right]\,\exp\left(-\frac{3}{2} b_2 y_0^{2/3}\right)\times$$
$$\left.\times\,\eta\left(t - b_1(y_0 - y)\right)\right\}\exp\left(\frac{3}{2} b_2 y^{2/3}\right) \quad (y_1 \le y \le y_0;\ \ t > 0)\,,$$

Окончательно, как сумма нулевого и первого приближений температурный режим определяется моделью:

$$T(y,\,t) = 1 + \varepsilon T_{1*} + \varepsilon\left\{\left[T_{1н}\left(\frac{y_0^{2/3} - (y + t/b_1)^{2/3}}{y_0^{2/3} - y_1^{2/3}}\right) - T_{1*}\right]\times\right.$$
$$\times\exp\left(-\frac{3}{2} b_2 (y + t/b_1)^{2/3}\right)\left[1 - \eta\left(t - b_1(y_0 - y)\right)\right] + \left[T_{1г}\left(t - b_1(y_0 - y)\right) - T_{1*}\right]\times$$
$$\left.\times\,\exp\left(-\frac{3}{2} b_2 y_0^{2/3}\right)\eta\left(t - b_1(y_0 - y)\right)\right\}\,\exp\left(\frac{3}{2} b_2 y^{2/3}\right) \quad (y_1 \le y \le y_0;\ \ t > 0). \tag{24}$$

Заключение. Сравнение результатов расчета распределения температуры управляемого потока газа вдоль МТ подземной прокладки по упрощенной модели (24) с принимаемым за эталонное аналогичным распределением, полученным конечно-разностными методами на базе исходной модели (1) - (3), показывает, что относительная погрешность не превышает $5\% \div 10\%$. В дальнейшем предполагается расширить область применения предложенного подхода за счет учета в модели неизотермичности основного стационарного режима.

Список литературы: 1. *Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И.* Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. Л.: Недра, 1988. 246 с.

2. Моделирование задач эксплуатации систем трубопроводного транспорта / *Е.И. Яковлев, В.Д. Куликов и др.* М.: ВНИИОЭНГ, 1992. 358 с. 3. Моделирование и управление газотранспортными системами / *Г.Н. Поляков, Е.И. Яковлев, А.С. Пиотровский.* СПб.: Недра, 1992. 256 с. 4. *Кривошеин Б.Л.* Теплофизические расчеты газопроводов. М.: Недра, 1982. 168 с. 5. *Коротаев Ю.П., Кривошеин Б.Л., Новаковский В.Н.* Термогазодинамика газопромысловых систем. М.: Недра, 1991. 276 с. 6. О математических моделях неизотермического нестационарного течения газа в трубах / *Б.Л. Кривошеин, А.В. Дубинский и др.* // Известия вузов. Нефть и газ. 1976. №12. С. 82–86. 7. *Брук В.А.* Нестационарный теплообмен между потоком газа в трубопроводе и внешней средой // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4. №5. С. 48–53. 8. *Идин М.А., Шершиков В.В.* Решение задачи движения газа в трубе методом малого параметра // Пневматика и гадравлика: Приводы и системы управления. 1984. Вип. 10. С. 249–263. 9. *Найфэ А.* Введение в методы возмущений. М.: Мир, 1984. 535 с. 10. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с. 11. *Скляров Ю.С., Минкин С.И.* Анализ переходных процессов в длинных линиях постоянного тока методами теории дифференциально-разностных уравнений // Известия вузов. Электромеханика. 1975. №7. С. 687–694.

Поступила в редколлегию 00.00.02

УДК 621.771.63; 621.785

Т.С.СКОБЛО, докт.техн.наук; ***А.И.СИДАШЕНКО,*** канд.техн.наук; ***А.Д.МАРТЫНЕНКО; Н.В.СЛОНОВСКИЙ;*** ХГТУСХ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В роботі розглянуті існуючі методи проведення деазотування деталей, попередньо підданих хіміко-термічній обробці та наведено результати експериментів і математичне обгрунтування режимів процесу дисоціації нитридів для підвищення міцності відновлювальних покриттів.

Ряд деталей машин и оборудования для повышения износостойкости и обеспечения высокого уровня прочности и твердости подвергают химико-термической обработке – азотированию, цементации, нитро-цементации. В процессе их эксплуатации и изнашивания такой упрочненный слой частично сохраняется, что при восстановлении любым из общепринятых методов наращивания не обеспечивает получение качественного покрытия.

Наиболее часто встречаемые в производстве способы восстановления [1] включают такие технологические операции как - предварительную термообработку, удаление дефектов путем обточки, наплавку слоя металла с помощью электрода, предварительную и окончательную механическую и термическую обработки.

Недостатком этих способов является то, что требуется выполнение большого количества операций, предшествующих восстановительной – наплавке, отжиг для снятия напряжений, механическая обработка для снятия