

УДК 622.691.4.052 :(517.956+519.876.5)

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.40764

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В РЕГЕНЕРАТОРЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

© Л. М. Замиховский, С. Я. Петрив

*В статье обосновывается необходимость контроля технического состояния регенераторов в процессе эксплуатации ГПА и предложена разработка нового метода, основанного на использовании методов математического моделирования процесса распространения тепла по площади поверхности регенератора и аппаратных методов определения ее температуры. Рассматривается алгоритм регуляризации некорректной обратной задачи теплопроводности в материале конструкции регенератора с использованием значений температурных полей, определенных экспериментально*

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат, техническое состояние, регенератор, диагностирование, математическая модель, обратная задача, температурное поле

*The necessity of technical state control of regenerators during operation of gas pumping unit was proved in the article. It was proposed to develop a new method based on the use of methods of mathematical modeling of heat distribution on the surface of the regenerator and hardware methods to determine its temperature. It is considered the regularization algorithm of incorrect inverse problem of heat conduction in the material of regenerator design using values of temperature fields, which were defined experimentally*

**Keywords:** gas pumping unit, technical state, regenerator, diagnosing, mathematical model, inverse problem, temperature field

### 1. Введение

Вопросам оценки технического состояния газотранспортной системы Украины, учитывая ее длительную эксплуатацию (более 30 лет), всегда уделялось и уделяется значительное внимание. Сегодня этот вопрос является особенно актуальным, поскольку в период сложившейся экономической ситуации в стране от эффективной и надежной эксплуатации оборудования компрессорных станций (КС) – газоперекачивающих агрегатов (ГПА) зависит выполнение контрактов по транзиту газа в Европу и обеспечение газом собственных нужд. Одним из важных элементов ГПА являются подогреватели воздуха, который поступает в камеру сгорания - регенераторы. От целостности регенератора в значительной степени зависит мощность ГПА. Наличие утечек воздуха из регенератора из-за появления неплотностей приводит к снижению мощности ГПА до 30 %. В случае появления сквозных трещин в корпусе регенератора продукты сгорания снова попадают в камеру сгорания, в результате чего возрастает температура рабочего тела, а это, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации оксида углерода и азота в воздухе вследствие чего ухудшается состояния окружающей среды в зоне КС [1].

### 2. Постановка проблемы

Сегодня из известных типов теплообменных аппаратов – рекуперативных, регенеративных (пластинчатых, трубчатых) и смешанного типа широкое применение на ГПА нашли теплообменные аппараты рекуперативного типа [2]. Среди них пластинчатый регенератор является одним из наиболее эффективных, поскольку степень регенерации достигает до 0,92. Однако они имеют ряд недостатков, которые обуславливают сегодня широкое внедрение на ГПА

трубчатых регенераторов. Основными из них является достаточно сложная технология изготовления, которая не позволяет при сборке пакетов обеспечить высокую герметичность значительного числа сварных швов, а также высокая стоимость исходного материала для изготовления регенераторов (нержавеющая сталь 1X18H9T). Проведенный в [2] анализ причин и факторов, обуславливающих изменение технического состояния регенераторов показал, что основным дефектом являются трещины сварных швов, которые приводят к потере герметичности его воздушного тракта. Так, простая и надежная турбина ГТК-10-4 с подтвержденным ресурсом более 100 000 часов, в то же время имеет много проблем с регенератором пластинчатого типа, особенно при термоциклических нагрузках. Уже после нескольких десятков пусков и остановок ГПА регенератор начинает терять герметичность, что приводит к ухудшению параметров ГТУ в целом [3].

В связи с этим актуальной является задача контроля технического состояния регенератора, что требует использования методов и средств их диагностики.

### 3. Литературный обзор

Сегодня отсутствуют промышленные методы и средства диагностирования технического состояния регенераторов в процессе эксплуатации ГПА. В [2] отмечено, что техническое состояние регенератора косвенно можно контролировать путем измерения давления межтрубного пространства и измерения температуры среды на входе и на выходе межтрубного, и на входе трубного пространства. Для определения утечек воздуха из секций регенератора используются методы, которые, в основном, базируются на их опрессовке на неработающем агрегате.

В [4] предлагается в качестве диагностической термодинамической модели эффективности работы регенератора в эксплуатационных условиях использовать отношение параметров сходства Нуссельта ( $Nu$ ) и Эйлера ( $Eu$ ) от параметров Рейнольдса ( $Re$ ) и Прандтля ( $Pr$ ), а также параметра  $Eu$  от параметров  $Re$  и  $Pr$  (при соответствующих возможностях определения этих параметров при эксплуатации регенераторов). Проявление любых дефектов в процессе теплопередачи и гидравлических сопротивлений будет характеризоваться изменением этих зависимостей по параметру  $Re$  (фактически относительно значения массовой скорости потока). Ухудшение состояния регенератора будет сопровождаться снижением его КПД при тех же режимных параметрах. В условиях эксплуатации для определения утечек воздуха из секций пластинчатых регенераторов используются следующие методы: по темпу падения давления в заглушенных секциях регенератора; по данным специально установленной мерной шайбы в режиме критического истечения воздуха через неплотности регенератора: за изменением параметров работы агрегатов, от которых осуществляется отбор воздуха на опрессовку. Кроме этого, в условиях эксплуатации на разных газопроводах делались попытки использовать и другие способы [4]:

- по замеренной площади щелей в секциях регенератора; по известной производительности постороннего источника сжатого воздуха, используемого для опрессовки, с пересчетом ее на рабочие условия работы регенератора;

- по приращению мощности ГТУ после заваривания щелей в секции регенератора.

Не останавливаясь подробно на недостатках каждого из указанных методов отметим, что ни один из них не позволяет контролировать техническое состояние регенератора в процессе эксплуатации, последнее требует поиска новых подходов к решению задачи диагностирования технического состояния регенераторов.

#### 4. Разработка математической диагностической модели состояния регенератора

Учитывая, что разгерметизация регенератора приводит к распределению температурного поля, то контролируя изменение температуры площади его поверхности можно определить местонахождение дефекта (утечки). Решение указанной задачи может быть осуществлено с использованием методов математического моделирования процесса распространения тепла и аппаратных методов определения температуры площади поверхности регенератора.

Рассмотрим математическую диагностическую модель состояния характеристик материала регенератора на основе данных о распространении тепла в нем, которые определяются экспериментально.

При этом используем технологии решения обратных задач теплообмена [5]. Обратные задачи, как правило, являются некорректно поставленными [6], их решение определяется неоднозначно и является неустойчивым относительно малых возмущений. Поэтому необходимо предложить алгоритмы

регуляризации некорректно поставленных задач теплообмена.

#### Постановка задачи

Рассматривается модельная задача теплопроводности в двумерной прямоугольной области  $V = \{(x, y), 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y\}$ . Основным уравнением является двумерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a(x, y, t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a(x, y, t) \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (1)$$

Уравнения должно быть дополнено соответствующими граничными условиями:

$$AT(x, y, t)|_{\partial V} + B(T - T_c)|_{\partial V} = F(x, y, t), \quad (2)$$

$A$  – имеет смысл коэффициента теплопроводности  $\lambda$ ,  $B$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $F(x, y, t)$  – закон изменения температуры.

И начальными условиями:

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_0(x, y). \quad (3)$$

Согласно [6], при решении обратных задач, необходимо проверять не только выполнение уравнения (1), но и условий (2) и (3).

Пусть для исследуемой области известен закон распределения температуры  $T = T(x, y, t)$ , полученный с использованием аппаратных средств. Возникает задача восстановления поля величины  $a(x, y, t)$  в исследуемой области. При этом необходимо решить следующие задачи:

- построение регуляризующего алгоритма задачи восстановления поля  $a(x, y, t)$  по известным распределениям температуры;

- построение регуляризующего алгоритма для задачи восстановления температурного поля по его значениям на определенном множестве точек.

#### Восстановление поля $a(x, y, t)$ .

Известно, что в тех случаях, когда  $a = const$ ,

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала,  $c$  – его удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность. Зная распределение  $a(x, y, t)$ , можно фиксировать изменение указанных характеристик от начальных значений по известным характеристикам исходного материала и характеристикам материала с дефектом (вкрапления воздуха, газа и т. п.). Уравнения (1) записывается с использованием метода конечных разностей [7]:

$$\frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} = \frac{\left[ a_{k+1,i}^{n+1} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{k+1,i}^{n+1} - a_{k,i}^{n+1} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{k,i}^{n+1} \right]}{h_x} + \frac{\left[ a_{k,i+1}^{n+1} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{k,i+1}^{n+1} - a_{k,i}^{n+1} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{k,i}^{n+1} \right]}{h_y}, \quad (5)$$

где  $f_{k,i}^n = f(x_k, y_i, t_n)$ ;  $\tau; h_x, h_y$  – шаг по координате соответственно  $t, x$  та  $y$  (рис. 1)

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{k,i}^n = \frac{T_{k+1,i}^n - T_{k,i}^n}{h_x}; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{k,i}^n = \frac{T_{k,i+1}^n - T_{k,i}^n}{h_y}. \quad (7)$$

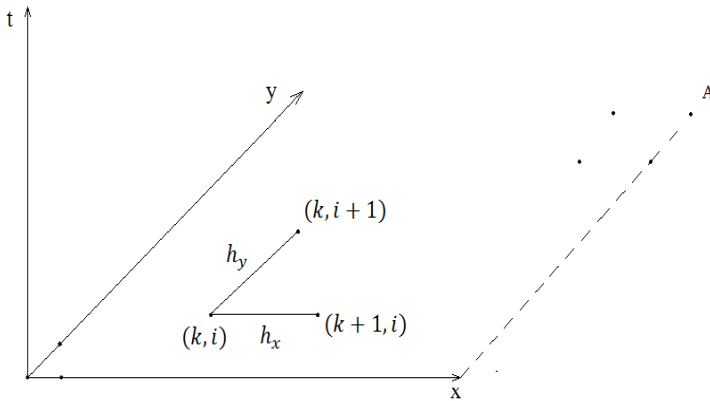


Рис. 1. Параметры расчетной сетки

Уравнение (5) с условиями (6) и (7) позволяет определить коэффициент  $a_{k,i}^n$  во всех точках, кроме А – значения в этой точке могут быть определены (например, путем линейной интерполяции), записывая (5) в виде:

$$\left[\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{k,i+1}^{n+1}}{h_y}\right] a_{k,i+1}^{n+1} + \left[\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{k+1,i}^{n+1}}{h_x}\right] a_{k+1,i}^{n+1} - \frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} = \left[\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{k,i}^{n+1}}{h_x} + \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{k,i}^{n+1}}{h_y}\right] a_{k,i}^{n+1}. \quad (8)$$

Вводя обозначения:

$$A_{k,i+1} = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{k,i+1}^{n+1}}{h_y};$$

$$A_{k+1,i} = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{k+1,i}^{n+1}}{h_x};$$

$$A_{k,i} = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{k,i}^{n+1}}{h_x} + \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{k,i}^{n+1}}{h_y},$$

запишем (8) в виде:

$$A_{k,i+1} a_{k,i+1}^{n+1} + A_{k+1,i} a_{k+1,i}^{n+1} - \frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} = A_{k,i} a_{k,i}^{n+1}. \quad (9)$$

Если выполняется условие

$$|A_{k,i}| > |A_{k,i+1}| + |A_{k+1,i}|, \quad (10)$$

то итерационный процесс:

$$a_{k,i}^{n+1}(s+1) = \frac{A_{k,i+1}}{A_{k,i}} a_{k,i+1}^{n+1}(s) + \frac{A_{k+1,i}}{A_{k,i}} a_{k+1,i}^{n+1}(s) - \frac{1}{A_{k,i}} \frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} \quad (11)$$

является сходящимся.

Следует отметить [8], что условие (10) является достаточным условием сходимости итерационного процесса, то есть в некоторых случаях итерационный процесс (11) совпадает при условии, что (10) не выполняется. Для ускорения сходимости итерационной процедуры используется метод верхней релаксации при реализации которого делается коррекция процесса (11):

$$a_{k,i}^{n+1*}(s+1) = a_{k,i}^{n+1*}(s) + \omega(a_{k,i}^{n+1}(s+1) - a_{k,i}^{n+1*}(s)), \quad (12)$$

где  $s$  – номер итерации,  $a_{k,i}^{n+1}(s+1)$  – значение, вычисленное по (11);  $a_{k,i}^{n+1*}(s)$   $a_{k,i}^{n+1*}(s)$  – значение, скорректированное по (12). В практических задачах  $1 < \omega < 2$ , что соответствует методу верхней релаксации. Если итерационные методы не могут быть использованы, то, вводя невязку уравнения (9), где  $K$  и  $N$  – количество точек разбиения  $x$  и  $y$ ,  $k = 0, \dots, K-1$ ;

$$\delta_{k,i}^{n+1} = A_{k,i+1} a_{k,i+1}^{n+1} + A_{k+1,i} a_{k+1,i}^{n+1} - \frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} - A_{k,i} a_{k,i}^{n+1}, \quad i = 0, \dots, N-1. \quad (13)$$

Величины  $a_{k,i+1}^{n+1}$ , могут быть найдены из условия:

$$\sum_{k=0}^K \sum_{i=0}^N \delta_{k,i}^{n+12} \rightarrow \min_{a_{k,i}^{n+1}} \quad (14)$$

Указанная задача имеет единственное решение, поскольку:

$$S(a_{k,i}^{n+1}) = \sum_{k=0}^K \sum_{i=0}^N \delta_{k,i}^{n+12} \quad (15)$$

является положительно определенной функцией, суммой квадратов линейных функций. Записывая необходимые условия экстремума

$$\frac{\partial S(a_{k,i}^{n+1})}{\partial a_{k,i}^{n+1}} = 0 \quad (16)$$

можно получить систему  $(N+1)(K+1)-1$  уравнений относительно  $N \times K - 1$  неизвестных  $a_{k,i}^{n+1}$ ,  $k = 1, \dots, K$ ;  $i = 1, \dots, N$ . Изображая точки расположения невязок  $\delta_{k,i}$  (рис. 2), получаем:

$$\begin{cases} \delta_{k,i}^{n+1} = A_{k,i+1}a_{k,i+1}^{n+1} + A_{k+1,i}a_{k+1,i}^{n+1} - \frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} - A_{k,i}a_{k,i}^{n+1}; \\ \delta_{k-1,i}^{n+1} = A_{k-1,i+1}a_{k-1,i+1}^{n+1} + A_{k,i}a_{k,i}^{n+1} - \frac{T_{k-1,i}^{n+1} - T_{k-1,i}^n}{\tau} - A_{k-1,i}a_{k-1,i}^{n+1}; \\ \delta_{k,i-1}^{n+1} = A_{k,i}a_{k,i}^{n+1} + A_{k+1,i-1}a_{k+1,i-1}^{n+1} - \frac{T_{k,i-1}^{n+1} - T_{k,i-1}^n}{\tau} - A_{k,i-1}a_{k,i-1}^{n+1}. \end{cases} \quad (17)$$

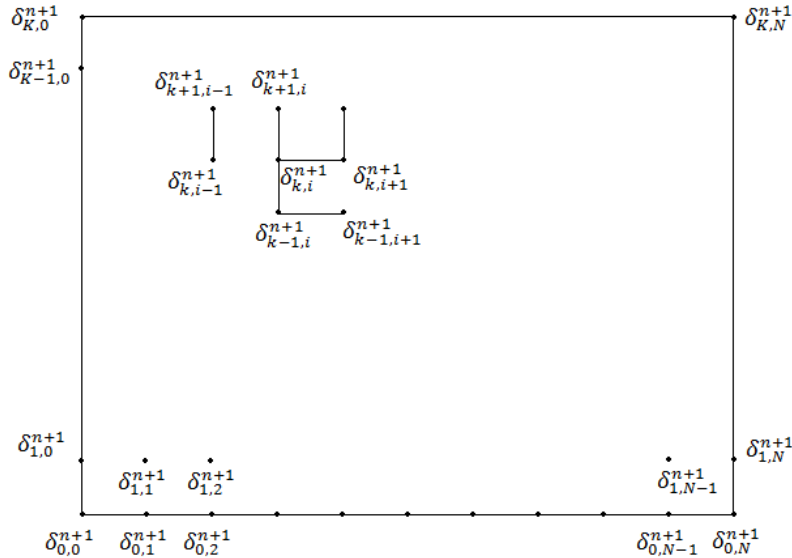


Рис. 2. Схематическое изображение распределения температурных коэффициентов

Таким образом,  $a_{k,i}^{n+1}$ ,  $k=1, \dots, K-1$ ;  $i=1, \dots, N-1$  входит только в три слагаемые суммы (15). Величина  $a_{0,0}^{n+1}$  входит только в одно слагаемое:

$$\delta_{0,0}^{n+1} = A_{0,1}a_{0,1}^{n+1} + A_{1,0}a_{1,0}^{n+1} - \frac{T_{0,0}^{n+1} - T_{0,0}^n}{\tau} - A_{0,0}a_{0,0}^{n+1} \quad (18)$$

Величина  $a_{K,0}^{n+1}$  входит в слагаемое:

$$\delta_{K-1,0}^{n+1} = A_{K-1,1}a_{K-1,1}^{n+1} + A_{K,0}a_{K,0}^{n+1} - \frac{T_{K-1,0}^{n+1} - T_{K-1,0}^n}{\tau} - A_{K-1,0}a_{K-1,0}^{n+1} \quad (19)$$

Величина  $a_{0,N}^{n+1}$  входит в слагаемое:

$$\delta_{0,N-1}^{n+1} = A_{0,N}a_{0,N}^{n+1} + A_{1,N-1}a_{1,N-1}^{n+1} - \frac{T_{0,N-1}^{n+1} - T_{0,N-1}^n}{\tau} - A_{0,N-1}a_{0,N-1}^{n+1} \quad (20)$$

Величины  $a_{0,i}^{n+1}$ ,  $i=1, \dots, N-1$  входят два

уравнения:

$$\begin{cases} \delta_{0,i-1}^{n+1} = A_{0,i}a_{0,i}^{n+1} + A_{1,i-1}a_{1,i-1}^{n+1} - \frac{T_{0,i-1}^{n+1} - T_{0,i-1}^n}{\tau} - A_{0,i-1}a_{0,i-1}^{n+1}; \\ \delta_{0,i}^{n+1} = A_{0,i+1}a_{0,i+1}^{n+1} + A_{1,i}a_{1,i}^{n+1} - \frac{T_{0,i}^{n+1} - T_{0,i}^n}{\tau} - A_{0,i}a_{0,i}^{n+1}. \end{cases} \quad (21)$$

Величины  $a_{k,0}^{n+1}$ ,  $k=1, \dots, K-1$  входят в два

уравнения:

$$\begin{cases} \delta_{k-1,0}^{n+1} = A_{k-1,i}a_{k-1,i}^{n+1} + A_{k,0}a_{k,0}^{n+1} - \frac{T_{k-1,0}^{n+1} - T_{k-1,0}^n}{\tau} - A_{k-1,0}a_{k-1,0}^{n+1}; \\ \delta_{k,0}^{n+1} = A_{k,i}a_{k,i}^{n+1} + A_{k+1,0}a_{k+1,0}^{n+1} - \frac{T_{k,0}^{n+1} - T_{k,0}^n}{\tau} - A_{k,0}a_{k,0}^{n+1}. \end{cases} \quad (22)$$

Величины  $a_{s,N}^{n+1}$ ,  $s=1, \dots, K-1$  входят в одно

слагаемое:

$$\delta_{s,N-1}^{n+1} = A_{s,N}a_{s,N}^{n+1} + A_{s+1,N-1}a_{s+1,N-1}^{n+1} - \frac{T_{s,N-1}^{n+1} - T_{s,N-1}^n}{\tau} - A_{s,N-1}a_{s,N-1}^{n+1} \quad (23)$$

Величины  $a_{K,i}^{n+1}$ ,  $i=0, \dots, N-1$  входят в слагаемое:

$$\delta_{K-1,i}^{n+1} = A_{K-1,i+1}a_{K-1,i+1}^{n+1} + A_{K,i}a_{K,i}^{n+1} - \frac{T_{K-1,i}^{n+1} - T_{K-1,i}^n}{\tau} - A_{K-1,i}a_{K-1,i}^{n+1} \quad (24)$$

С учетом (17)–(24) необходимые условия экстремума записываются в виде:

Для  $a_{k,i}^{n+1}$ ,  $k=1, \dots, K-1$ ;  $i=1, \dots, N-1$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_{k,i}^{n+1}} &= \frac{\partial}{\partial a_{k,i}^{n+1}} \left( (\delta_{k,i}^{n+1})^2 + (\delta_{k-1,i}^{n+1})^2 + (\delta_{k,i-1}^{n+1})^2 \right) = \\ &= 2\delta_{k,i}^{n+1} \frac{\partial \delta_{k,i}^{n+1}}{\partial a_{k,i}^{n+1}} + 2\delta_{k-1,i}^{n+1} \frac{\partial \delta_{k-1,i}^{n+1}}{\partial a_{k,i}^{n+1}} + 2\delta_{k,i-1}^{n+1} \frac{\partial \delta_{k,i-1}^{n+1}}{\partial a_{k,i}^{n+1}} = \\ &= 2 \left( A_{k,i+1}a_{k,i+1}^{n+1} + A_{k+1,i}a_{k+1,i}^{n+1} - \frac{T_{k,i}^{n+1} - T_{k,i}^n}{\tau} - A_{k,i}a_{k,i}^{n+1} \right) (-A_{k,i}) + \\ &+ 2 \left( A_{k-1,i+1}a_{k-1,i+1}^{n+1} + A_{k,i}a_{k,i}^{n+1} - \frac{T_{k-1,i}^{n+1} - T_{k-1,i}^n}{\tau} - A_{k-1,i}a_{k-1,i}^{n+1} \right) A_{k,i} + \\ &+ 2 \left( A_{k,i}a_{k,i}^{n+1} + A_{k+1,i-1}a_{k+1,i-1}^{n+1} - \frac{T_{k,i-1}^{n+1} - T_{k,i-1}^n}{\tau} - A_{k,i-1}a_{k,i-1}^{n+1} \right) \times \\ &\times A_{k,i} = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

В уравнении 7 неизвестных величин (запишем их опуская верхний индекс « $n+1$ »):  $a_{k,i+1}$ ,

$a_{k+1,i}$ ;  $a_{k,i}$ ;  $a_{k-1,i+1}$ ;  $a_{k-1,i}$ ;  $a_{k+1,i-1}$ ;  $a_{k,i-1}$ .

Для  $a_{0,0}^{n+1}$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_{0,0}^{n+1}} = \frac{\partial (\delta_{0,0}^{n+1})^2}{\partial a_{0,0}^{n+1}} = 2 \left( A_{0,1} a_{0,1}^{n+1} + A_{1,0} a_{1,0}^{n+1} - \frac{T_{0,0}^{n+1} - T_{0,0}^n}{\tau} - A_{0,0} a_{0,0}^{n+1} \right) (-A_{0,0}) = 0. \quad (26)$$

Для  $a_{K,0}^{n+1}$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_{K,0}^{n+1}} = \frac{\partial (\delta_{K-1,0}^{n+1})^2}{\partial a_{K,0}^{n+1}} = 2 \left( A_{K-1,i} a_{K-1,i}^{n+1} + A_{K,0} a_{K,0}^{n+1} - \frac{T_{K-1,0}^{n+1} - T_{K-1,0}^n}{\tau} - A_{K-1,0} a_{K-1,0}^{n+1} \right) \times A_{K,0} = 0. \quad (27)$$

В уравнениях (26) и (27) по три неизвестных в (26):  $a_{0,1}$ ;  $a_{1,0}$ ;  $a_{0,0}$ , в уравнении (27)  $a_{K-1,i}$ ;  $a_{K,0}$  и  $a_{K-1,0}$ .

Для  $a_{0,N}^{n+1}$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_{0,N}^{n+1}} = \frac{\partial (\delta_{0,N-1}^{n+1})^2}{\partial a_{0,N}^{n+1}} = 2 \left( A_{0,N} a_{0,N}^{n+1} + A_{1,N-1} a_{1,N-1}^{n+1} - \frac{T_{0,N-1}^{n+1} - T_{0,N-1}^n}{\tau} - A_{0,N-1} a_{0,N-1}^{n+1} \right) \times (-A_{0,N-1}) = 0. \quad (28)$$

В (28) – три неизвестные:  $a_{0,N}$ ;  $a_{1,N-1}$ ;  $a_{0,N-1}$ .

Для  $a_{0,i}^{n+1}$ ,  $i = 1, \dots, N-1$ ;

$$\frac{\partial S}{\partial a_{0,i}^{n+1}} = \frac{\partial ((\delta_{0,i-1}^{n+1})^2 + (\delta_{0,i}^{n+1})^2)}{\partial a_{0,i}^{n+1}} = 2 \left( A_{0,i} a_{0,i}^{n+1} + A_{1,i-1} a_{1,i-1}^{n+1} - \frac{T_{0,i-1}^{n+1} - T_{0,i-1}^n}{\tau} - A_{0,i-1} a_{0,i-1}^{n+1} \right) A_{0,i} + 2 \left( A_{0,i+1} a_{0,i+1}^{n+1} + A_{1,i} a_{1,i}^{n+1} - \frac{T_{0,i}^{n+1} - T_{0,i}^n}{\tau} - A_{0,i} a_{0,i}^{n+1} \right) \times (-A_{0,i}) = 0, \quad (29)$$

неизвестными являются величины:  $a_{0,i}$ ;  $a_{1,i-1}$ ;  $a_{0,i-1}$ ;  $a_{0,i+1}$ ;  $a_{1,i}$ .

Для  $a_{k,0}^{n+1}$ ,  $k = 1, \dots, K-1$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_{k,0}^{n+1}} = \frac{\partial ((\delta_{k-1,0}^{n+1})^2 + (\delta_{k,0}^{n+1})^2)}{\partial a_{k,0}^{n+1}} = 2 \left( A_{k-1,i} a_{k-1,i}^{n+1} + A_{k,0} a_{k,0}^{n+1} - \frac{T_{k-1,0}^{n+1} - T_{k-1,0}^n}{\tau} - A_{k-1,0} a_{k-1,0}^{n+1} \right) A_{k,0} + 2 \left( A_{k,1} a_{k,1}^{n+1} + A_{k+1,0} a_{k+1,0}^{n+1} - \frac{T_{k,0}^{n+1} - T_{k,0}^n}{\tau} - A_{k,0} a_{k,0}^{n+1} \right) \times (-A_{k,0}) = 0, \quad (30)$$

неизвестные величины:  $a_{k-1,i}$ ;  $a_{k,0}$ ;  $a_{k-1,0}$ ;  $a_{k,1}$ ;  $a_{k+1,0}$ ;

Для  $a_{s,N}^{n+1}$ ,  $s = 0, 1, \dots, K-1$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_{s,N}^{n+1}} = \frac{\partial (\delta_{s,N-1}^{n+1})^2}{\partial a_{s,N}^{n+1}} = 2 \left( A_{s,N} a_{s,N}^{n+1} + A_{s+1,N-1} a_{s+1,N-1}^{n+1} - \frac{T_{s+1,N-1}^{n+1} - T_{s+1,N-1}^n}{\tau} - A_{s,N-1} a_{s,N-1}^{n+1} \right) \times A_{s,N} = 0. \quad (31)$$

неизвестные:  $a_{s,N}$ ;  $a_{s+1,N-1}$ ;  $a_{s,N-1}$ .

Для  $a_{K,i}^{n+1}$ ,  $i = 1, \dots, N-1$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_{K,i}^{n+1}} = \frac{\partial (\delta_{K-1,i}^{n+1})^2}{\partial a_{K,i}^{n+1}} = 2 \left( A_{K-1,i+1} a_{K-1,i+1}^{n+1} + A_{K,i} a_{K,i}^{n+1} - \frac{T_{K-1,i}^{n+1} - T_{K-1,i}^n}{\tau} - A_{K-1,i} a_{K-1,i}^{n+1} \right) \times A_{K,i} = 0. \quad (32)$$

Неизвестные величины в (32):  $a_{K-1,i+1}$ ;  $a_{K,i}$ ;  $a_{K-1,i}$ .

Таким образом, система линейных алгебраических уравнений (25)–(32) состоит из:

$$\begin{aligned} N^* &= (N-1)(K-1) + 1 + 1 + 1 + N - 1 + \\ &+ K - 1 + K - 1 + N - 1 = NK - K - \\ &- N + 1 + 1 + 1 + 1 + 2N + 2K - 4 = \\ &= NK + N + K = (N+1)(K+1) - 1 \end{aligned} \quad (33)$$

уравнений относительно  $(N+1)(K+1) - 1$  неизвестных величин. Указанная система имеет единственное решение, если ее определитель не равен нулю. Система (25)–(32) позволяет восстановить поле  $a(x,y)$ .

### 5. Выводы

В работе предложена методика решения обратной задачи теплопроводности, а также построен алгоритм регуляризации некорректной задачи теплопроводности, который может быть положен в основу разработки метода диагностирования технического состояния регенератора.

С целью дальнейшей реализации указанного метода диагностирования необходимо провести следующие исследования:

- восстановление температурного поля площади поверхности регенератора по известным его значениям на некотором множестве точек поверхности;
- проведение экспериментальных исследований температурных полей поверхности регенератора;
- разработка программного обеспечения для реализации созданных моделей.

### Література

1. Jonsson, M. Humified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles [Text] / M. Jonsson, J. Yan // Energy. – 2005. – Vol. 30, Issue 7. – P. 1013–1078. doi: 10.1016/j.energy.2004.08.005
2. Петрів, С. Я. Причини і фактори, що зобумовлюють зміну технічного стану теплообмінних апаратів ГПА [Текст] / С. Я. Петрів // Наукові вісті. – 2012. – Вип. 2 (22).
3. Усеров, А. Г. Используемые аппараты и разработка новых эффективных регенераторов ГПА для повышения

КПД и утилизация высокопотенциальной теплоты с целью снижения выбросов в атмосферу [Текст] / А. Г. Усеров, К. К. Шалбаев // Алмата, Вестн. НАН РК. – 2009. – № 2.

4. Козачанко, А. Н. Энергетика трубопроводного транспорта газов [Текст] / А. Н. Козачанко, В. И. Никишин, Б. П. Поршаков. – Гуп Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Москва, 2001. – С. 327–355.

5. Коздоба, Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности [Текст] / Л. А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 170 с.

6. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 285 с.

7. Дьяченко, В. Ф. Основные понятия вычислительной математики [Текст] / В. Ф. Дьяченко. – М.: Наука, 1977. – 120 с.

8. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика теплообменника. Т. 1 [Текст] / Д. Андерсон, Д. Таннехел, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384 с.

#### References

1. Jonsson, M., Yan, J. (2005). Humified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles. Energy, 30 (7), 1013–1078. doi: 10.1016/j.energy.2004.08.005

2. Petriv, S. Y. (2012). Reasons and factors which contribute to changing the technical condition of heat exchangers compressor units. Science news, 2 (22).

3. Userov, A. G., Shalbaev, K. K. (2009). Used devices and development a new effective regenerators of compressor units for improve efficiency and utilization of high-grade heat in order to reduce emissions into the atmosphere. Almaty Herald. NAS RK, 2.

4. Kozachanko, A. N., Nikishin, V. I., Porshakov, B. P. (2001). Power engineering pipeline transport gas. PMU Publishing "Oil and Gas" Oil and gas RSU th. I. M. Gubkin. Moscow, 327–355.

5. Kozdoba, L. A. (1975). Methods for solving nonlinear heat conduction problems. Moscow: Science, 170.

6. Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y. (1979). Methods of solving incorrect problems. Moscow: Nauka, 285.

7. Diachenko, V. F. (1977). Basic concepts of computational mathematics. Moscow: Nauka, 120.

8. Anderson, D., Tannehel, D., Pletcher, R. (1990). Computational fluid dynamic of heat exchanger. Moscow: Mir, 1, 384.

9. Marchuk, G. I. (1989). Methods of computational mathematics. Moscow: Nauka, 608.

*Дата надходження рукопису 17.03.2015*

**Замиховский Леонид Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры, кафедра компьютерных технологий в системах управления и автоматике, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019  
E-mail: leozam@ukr.net

**Петрив Светлана Ярославовна**, аспирант, кафедра компьютерных технологий в системах управления и автоматике, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019  
E-mail: Svetlanapetriv@yandex.ru

УДК 004.896

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.41213

## ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ КОМПРИМИРОВАНИЯ ГАЗА

© Л. М. Замиховский, Р. М. Матвиенко

*Обоснована необходимость построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИС-ППР) при управлении технологическим процессом компримирования газа с включением в ее состав учебно-тренировочного модуля. Приведена структурная схема человеко-машинного взаимодействия в системе "Диспетчер – ИСППР – САУ ГПА – КЦ" и определены функции отдельных блоков интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении процессом компримирования газа*

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, система поддержки принятия решений, диспетчер, оператор, процесс компримирования газа

*The necessity to construct the intelligent decision support systems (IDSS) in the control of the gas compression process with inclusion in structure of the training module is substantiated. A block diagram of human-computer interaction in the system "Dispatcher – IDSS – ASC GCU – CS" is shown, and the functions of the separate blocks of the intellectual decision support system in the control of the gas compression process are defined*

**Keywords:** intelligent system, decision support system, dispatcher, operator, gas compression process

### 1. Введение

Современная газотранспортная система имеет свои специфические особенности:

- большую территориальную протяженность;
- значительное число элементов, которые формируют систему, иерархическую структуру;

- централизованное управление технологическим процессом транспортировки целевого продукта;
- децентрализованное распределение целевого продукта;
- возможность создания оперативных и стратегических запасов энергетического сырья в хранилищах.