

підтримка з боку держави, тому підприємства усіма силами намагаються скоротити енергетичну складову в собівартості готової продукції.

Останніми роками в Україні, дуже швидкі темпи розвитку показали малі підприємства, отже, можна припустити, що ці підприємства накопили істотний резерв обігових коштів на впровадження таких проектів. На дрібних підприємствах масштабність таких проектів, звичайно ж, менша, ніж на великих і навіть середніх. Отже, терміни окупності проектів скорочується, в зв'язку, з чим збільшується вірогідність отримання цими підприємствами кредитів на подальше здійснення програм з енергозбереження. Також малі підприємства мають більшу гнучкість, мобільність і варіативність при розрахунках, пов'язаних з постачанням сировини і матеріалів, готовій продукції і т.п., отже, період обігу тут нижчий, ніж у великих підприємств з трудомісткими і тривалими за часом циклами робіт. Відтак, можна говорити, про чинник часу, як про істотний критерій, який впливає на співвідношення централізації – децентралізації.

### **Висновки**

Отже, для великих підприємств в цій ситуації, основним джерелом подальшого розвитку буде держпідтримка, без якої, ці підприємства зможуть самотійно здійснювати лише заходи технологічного характеру, і за рахунок їх показувати економію енергетичних ресурсів. Компетенцією держави є повний перегляд системи роботи цих підприємств. І якщо дії в цьому напрямку будуть відсутні, такі підприємства не зможуть продовжувати конкурувати в сучасних ринкових умовах.

**Список літератури:** 1. Державне управління в Україні: централізація і децентралізація [Текст] : монографія / кол. авт. ; відпов. ред. Н. Р. Нижник. – К. : УАДУ при Президентові України, 1997. - 448 с. 2. Не путать федерализм с бюрократической централизацией [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.hrighs.ru/text/b12/Chapter12.htm> — Загл. с экрана. 3. Колесніченко, В. Ф. Інвестиційне забезпечення інноваційної діяльності підприємств [Текст] : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.06.01 / В. Ф. Колесніченко ; [Харківський національний економічний ун-т] . – Х., 2006. – 25 с. 4. Финансирование энергосберегающих проектов в российском коммунальном теплоснабжении [Электронный ресурс] / Немецкое энергетическое агентство, Фонд «Институт экономики города». — Режим доступа : [http://escosys.narod.ru/2010\\_3/art037.pdf](http://escosys.narod.ru/2010_3/art037.pdf) — Загл. с экрана. 5. Шаров, Ю. И. Парогазовые установки в системах централизованного теплоснабжения [Текст] : учеб. пособие / Ю. И. Шаров, И.В. Бородихин ; — Новосибирск, 2003. – 91 с. 6. Бланк, И. А. Инвестиционный менеджмент [Текст] : учеб. курс / И. А. Бланк. — К. : Ника-Центр, 2001. —448 с. 7. Комаринський, Я. Фінансово-інвестиційний аналіз [Текст] : навч. посібник / Я. Комаринський, І. Яремчук ; – К. : Укр. енциклопедія ім. М. П. Бажана, 1996. – 299 с.

*Поступила в редколлегию 23.11.2011*

### **УДК 631.2**

**А. П. СЛЕСАРЕНКО**, докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины им. А.Н. Подгорного, Харьков  
**А. С. СОРОКА**, канд. физ.-мат. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЗОН ПОМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Уперше запропонована методологія регіонального в часі перетворення дискретних даних контрольно-вимірювальних систем щодо теплових процесів в повітряних зонах приміщень в регіонально-аналитичну інформацію по координатам та часу. Запропонований підхід потребує незначного об'єму оперативної пам'яті мікро-ЕОМ та дозволяє реалізувати не тільки оптимальне керування тепловими режимами, але й дистанційний контроль теплового стану об'єкту.

**Ключові слова:** енергозбереження, ідентифікація параметрів мікроклімату, регулярний режим теплопровідності, регіонально-аналітична інформація.

Впервые предложена методология регионального во времени преобразования дискретных данных контрольно-измерительных систем о тепловых процессах в воздушных зонах помещений в регионально-аналитическую информацию по координатам и времени. Предложенный подход требует незначительного объема оперативной памяти микро-ЭВМ и позволит осуществить не только оптимальное управление тепловыми режимами, но и дистанционный контроль теплового состояния объекта.

**Ключевые слова:** энергосбережение, идентификация параметров микроклимата, регулярный режим теплопроводности, регионально-аналитическая информация.

For the first time the methodology of regional transformation in time of the discrete data of control and measuring systems about thermal processes in air zones of premises in regional-analytics information on coordinates and time is offered. The offered approach demands insignificant volume of operative memory of the micro-computer and will allow to carry out not only optimum control of thermal modes, but also remote control of a thermal condition of object.

**Keywords:** power savings, identification of microclimate parameters, regular mode of heat transfer, regional-analitical information.

**Постановка проблеми.** Рост цен на энергоносители при постоянном росте их дефицита выдвигает требования жесткого контроля энергопотребления во всех энергоемких процессах. Одним из таких секторов потребления является отопление промышленных, гражданских и жилых зданий. Рациональное использование энергоресурсов и энергосбережение в современных условиях достаточно частых и резких колебаний параметров климата не может быть выполнено только за счет повышения капитальных затрат на обеспечение высокой теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений. Задачи повышения энергоэффективности зданий и сооружений могут быть решены, в том числе, и на основе современных информационных технологий и компьютерных систем управления [1]. Применение информационных технологий к реальным данным о сравнительно медленных переходных процессах установления теплового режима помещений при изменении внешних тепловых условий позволит при использовании определенного набора априорных данных и математической тепловой модели помещения получить управляющие функции для системы обогрева.

Многопараметровость задач отопления и сложность получения их решения в аналитическом виде, трудоемкость и дороговизна натурных экспериментальных исследований объясняют тот факт, что в настоящее время отсутствует необходимый объем данных для оптимального проектирования рассматриваемых систем обогрева даже для случая стационарного режима. Таким образом, научные исследования, посвященные решению данной проблемы, являются актуальными.

**Анализ исследований и публикаций.** Системный анализ отечественных и зарубежных источников, посвященных данной проблеме, показывает рост применения электроотопления. Сдерживают развитие и внедрение электроотопления, например, "теплым полом", недостаточная изученность процессов теплопередачи в энергоаккумулирующих структурах. Как следствие, отсутствует расчетная и нормативная база для широкого применения рассматриваемых прогрессивных технологий. Значительные результаты в решении указанных проблем получены Д. И. Розинским, П. Г. Круковским и другими авторами [2,3] применительно к кабельным системам электротеплоаккумуляционного отопления.

Наряду с кабельными технологиями обогрев пола в промышленных помещениях различного назначения может быть осуществлен системой специальных электронагревателей трубчатого типа, описанных в работах [4-6], где обоснована актуальность задачи управления энергопотоками в таких нагревательных системах (НС). Реализация таких технологий позволит обеспечить заданные температурные режимы обогреваемых помещений различного функционального назначения при любых колебаниях параметров наружного климата.

Комплексное решение проблемы управления тепловыделением нагревателями НС с целью поддержания заданного уровня обогрева поверхности пола и прилегающей к ней воздушной области требует, чтобы система управления была способна оперативно производить диагностику и прогнозирование температурного поля рабочей зоны в любой момент времени. Это связано с необходимостью контроля изменений характеристик воздушных потоков во всем объеме помещения, обусловленных естественной и принудительной конвекцией, которыми сопровождается производственно-технологический процесс в помещении. Также необходима достоверная информация о температуре воздуха над поверхностью пола для корректного учета изменяющихся условий конвекции при комплексном моделировании системы нагреватель – воздушная среда и выработке сигналов, предназначенных для управления энергопотоками в НС.

**Цель работы.** Разработка теоретико-экспериментального подхода, позволяющего оперативно решать вопросы диагностики и прогнозирования температурных полей рабочих зон производственных помещений, а также обоснование возможности рационального размещения сети термодатчиков в припотолочной области, свободной от оборудования и персонала, без потерь полноты оперативной информации о температурных полях воздушной среды помещения.

**Основные материалы исследования.** Поверхность пола помещения контактирует с воздушной средой, где имеют место колебания температуры, обусловленные рядом возмущающих факторов. Прежде всего – это изменение погодных условий, которые при существующей степени теплозащиты зданий значительно влияют на температурный режим помещения, во-вторых – обязательное для рассматриваемых помещений вентилирование, в-третьих – количество тепловыделяющих объектов. Например, для животноводческих

помещений средняя температура воздушной среды отапливаемого помещения в осенне-зимний период при содержании КРС разных возрастных групп, должна поддерживаться в пределах 5-6°С...18-20°С, для свинарников – 16-18...32-39°С [7]. Однако, в ограниченных областях поверхности пола изменение условий теплоотдачи в воздушную среду может приводить к отклонениям температуры пола от заданной номинальной, особенно в холодный период. Поэтому при равномерном режиме нагрева НС температура пола оказывается разной в разных частях рабочей области помещения, что крайне нежелательно из-за отклонений от стандарта, предусматривающего поддержание заданного нормативного значения температуры в пределах 1°С. Традиционные системы микроклимата животноводческих помещений с подогревом вентилируемого воздуха не обеспечивают необходимую точность поддержания стандартных температурных условий в рабочих зонах.

Предлагаемое устройство НС [4] позволяет обеспечить не только термостабилизацию поверхности пола, но и дифференцированный нагрев путем секционирования нагревательных элементов НС [5]. Для управления нагревом секций НС необходимо знать температуру среды непосредственно над поверхностью пола (вблизи) данной секции. Прогнозирование ее величины расчетным путем не представляется возможным ввиду большого количества неконтролируемых воздействий на тепловой режим воздушной среды. Текущую информацию о состоянии воздушной среды может обеспечить многоканальная система температурных датчиков, установленных над секциями НС по всей площади помещения.

Для отыскания температурного профиля воздушной среды между поверхностью пола и потолочным перекрытием построим упрощенную физическую модель теплопередачи воздушного слоя над равномерно нагретой поверхностью пола помещения, которая бы учитывала и поперечное движение воздуха (конвекция по высоте помещения) и продольное, параллельное полу. Относительно медленные движения воздушных масс в помещениях подчиняются уравнению энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad}T = a\Delta T. \quad (1)$$

Для одномерной модели теплообмена в воздушном слое над НС примем такие допущения: а) поперечные движения воздуха отсутствуют, единственной отличной от нуля компонентой скорости частиц воздуха является поперечная компонента  $v_x = v$ , ориентированная по оси ОХ (по нормали к поверхности НС); б) зависимость температуры от времени отсутствует. Будем считать, что скорость в воздушном промежутке не постоянна. Примем квадратичную зависимость скорости по координате "х":  $v(\xi) = 4v_0(\xi - \xi^2)$ , где  $v_0 = v(0.5)$  – значение скорости в сечении  $x = 0.5$ . В соответствии с уравнением энергии (1) температурная модель рассматриваемого слоя будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} = \gamma \cdot (\xi - \xi^2) \frac{\partial t}{\partial \xi}; t|_{\xi=0} = t_n, t|_{\xi=1} = t_{mn}, \quad (2)$$

где  $t = t(\xi)$  – температура в области воздушного слоя,  $\xi = x/H$  – нормированная координата по высоте помещения,  $0 \leq x \leq H$  – область воздушного слоя;  $\gamma = 4\nu_0 Ha^{-1}$  – безразмерный конвективный параметр задачи,  $a = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент температуропроводности воздуха при температуре  $10^\circ\text{C}$  и нормальном давлении;  $t_n$  – температура поверхности пола,  $t_{nn}$  – температура нижней поверхности потолочного перекрытия.

Определим величину  $\gamma$  через среднюю на интервале  $0 \leq \xi \leq 1$  скорость конвекции  $\nu_{cp} = (4/3)\nu_0$ , при этом  $\gamma = (3Ha^{-1}) \cdot \nu_{cp}$ . Задавая характерные для помещений значения времени установления (за счет конвекции)  $t_1 = 10$  ч,  $t_2 = 15$  ч,  $t_3 = 20$  ч,  $t_4 = 25$  ч, определим значения безразмерного конвективного параметра:  $\gamma_1 = 37.5$ ,  $\gamma_2 = 25$ ,  $\gamma_3 = 18.8$ ,  $\gamma_4 = 15$ .

Решение уравнения (2) с переменным коэффициентом перед первой производной представим через неопределенный интеграл:

$$t(\xi, \gamma) = C_2 + C_1 \int F(\xi, \gamma) d\xi, \quad (3)$$

где подынтегральная функция имеет вид:

$$F(\xi, \gamma) = \exp \left[ \gamma \left( \frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi^3}{3} \right) \right]. \quad (4)$$

Константы  $C_1, C_2$  в (5) должны быть определены из граничных условий (2). Анализ решения показывает, что при учете лишь вертикального движения воздуха модель конвекции с поверхности пола дает температурное распределение экспоненциального характера только вблизи потолочного перекрытия, вблизи поверхности пола температура изменяется незначительно. Если же температуры поверхности пола и перекрытия одинаковы ( $t_n = t_{nn}$ ), то в рассматриваемой модели температура оказывается постоянной по высоте. Из-за неизбежных в помещении воздушных потоков имеет место отток тепла в направлениях параллельно поверхности пола, который приводит к заметному «провалу» температуры в среднем сечении ( $x=H/2$ ), оставаясь слабо возмущенным вблизи стенок из-за эффекта вязкого трения.

Имея это в виду, примем рабочую гипотезу для модели конвективного теплопереноса, которая состоит в том, что температурный профиль по высоте помещения имеет квадратичный характер. Таким образом, если на рассчитанный профиль температуры  $t(\xi, \gamma)$  наложить квадратичную функциональную поправку  $A \cdot (x^2 - x)$ , получим распределение, близкое к реальному:

$$t_{result} = t(\xi) + A \cdot (\xi^2 - \xi). \quad (5)$$

Величину коэффициента  $A$  в (4) следует определять из дополнительных условий, например, по показаниям датчика температуры в среднем сечении  $x=H/2$  рассматриваемого помещения.

В табл. 2 представлен ряд характерных температурных режимов подвижного воздушного слоя для различных помещений: 1, 2, 3 – животноводческие помещения, 4 – тепловой режим для жилого помещения при оптимальных условиях отопления [3].

Таблица 1 – Температурные режимы подвижного воздушного слоя

№	1	2	3	4
$t_{nn}$	6	11	12	16
$t_{cp}$	9.5	13.8	16.5	20.8
$t_n$	14	19	22	26

Значение температуры  $t_{cp}$  соответствует среднему сечению  $x=H/2$ . На рис. 1 представлены профили распределения температуры в помещении для типовых температурных режимов из табл. 1. На рис. 2 показаны профили температуры для случаев поперечного движения воздуха для 4-х конвективных параметров  $\gamma$  для ряда соотношений температур  $t_{cp}, t_n, t_{nn}$ :

(а) вентиляция холодным воздухом  $t_{cp} < t_n, t_{nn}$ ,  
 (б)  $t_n < t_{cp} < t_{nn}$ ,  
 (в) вентиляция подогретым воздухом  $t_{cp} > t_n, t_{nn}$ .

Кривые профилей температуры на рис. 1 позволяют оценить максимальные и минимальные отклонения температуры воздушной среды обогреваемых помещений над теплым полом и, тем самым, прогнозировать интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью пола и средой. Для различных реализаций по конвективному параметру этот перепад лежит в интервале от долей градуса до нескольких градусов.

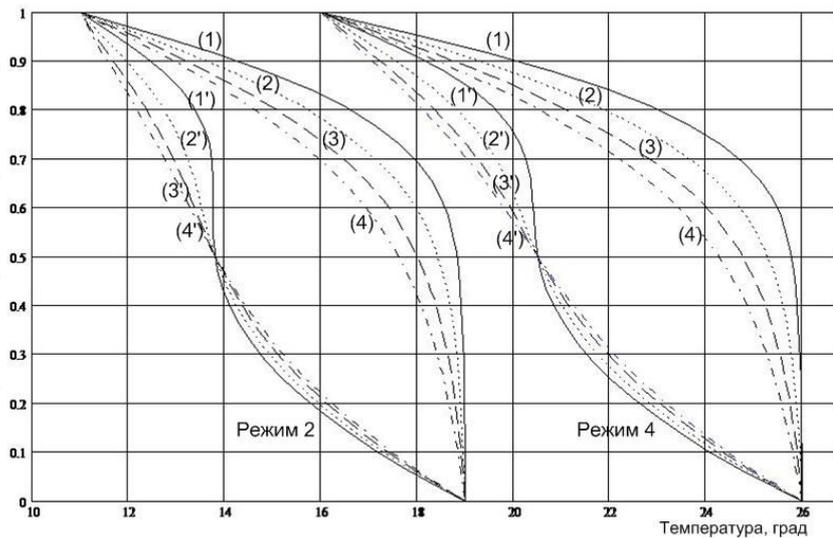


Рис. 1. Профили температуры в помещении для температурных режимов №2 и №4 без учета (кривые 1, 2, 3, 4) и при учете (кривые 1', 2', 3', 4') поперечного движения воздуха для 4-х значений конвективного параметра  $\gamma$

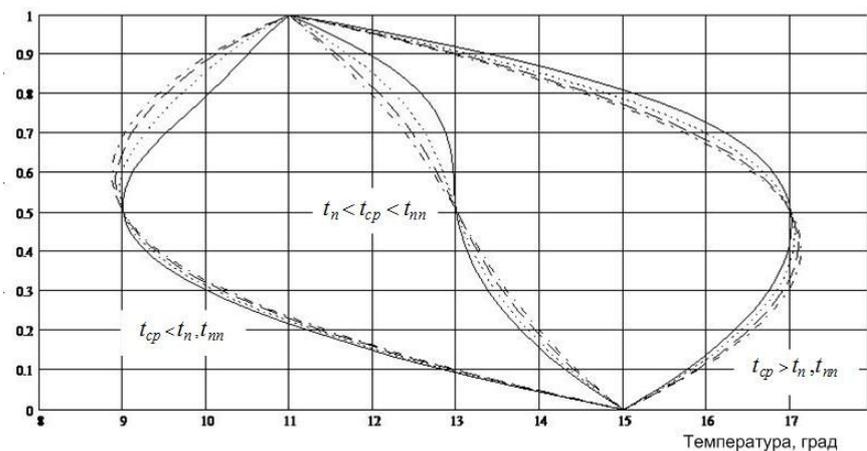


Рис. 2. Профили температуры для температурных режимов при учете поперечного движения воздуха для 4-х значений параметра  $\gamma$  (кривые 1', 2', 3', 4') для случаев

(а)  $t_{cp} < t_n, t_{nn}$ , (б)  $t_n < t_{cp} < t_{nn}$ , (в)  $t_{cp} > t_n, t_{nn}$

**Теоретико-экспериментальный подход.** Пространственно-временную картину теплового режима микроклимата помещения можно получить на основе включения в теоретическую модель данных, получаемых из эксперимента или контрольно-измерительной системы (КИС).

Рассмотрим пример теоретико-экспериментального подхода при диагностике теплового состояния помещения. Можно воспользоваться уравнениями Навье-Стокса на основе наблюдения температуры в дискретном ряде точек (см. рис. 3). Отыскание решения с учетом реальных граничных условий представляет довольно сложную задачу. Ее можно упростить, если разбить всю поверхность обогреваемого пола на ряд ограниченных регионов и предположить, что над каждым из них теплопередача протекает в вертикальном направлении с возмущениями в поперечных направлениях.

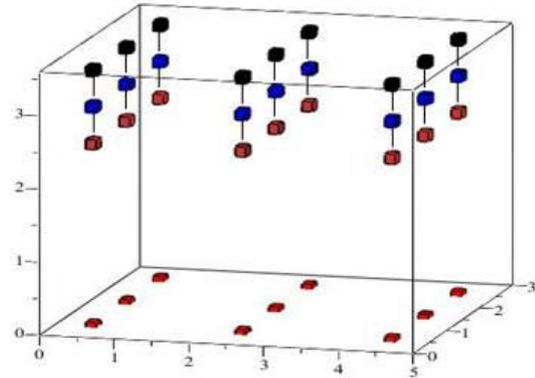


Рис 3. Размещение термодатчиков в воздушной среде помещения

В этом случае двумерная задача заменяется серией одномерных для ряда сечений  $z=z_i$  с соответствующими неопределенными функциями  $F_i(x)$  – аналогами фиктивных источников. Над каждой зоной  $z_i$ ,  $i$  – номер региона, уравнение для температуры воздуха представим в усеченном виде

$$v_x \frac{\partial T_i}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + F_i(x), \quad (6)$$

где  $F_i(x)$  – функции некоторых фиктивных источников, которые можно было бы найти, решив двумерную граничную задачу с соответствующими распределениям скоростей воздушной массы, и из решения этой задачи определить функции  $F_i(x) = a \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial T_i}{\partial z}$ .

Решениями (6) являются функции  $T_i(x) = T_{i,0}(x) + T_{i,1}(x)$ , где  $T_{i,0}(x)$  – решения уравнений с нулевой правой частью и реальными граничными условиями на поверхности пола и потолка;  $T_{i,1}(x)$  – частные решения неоднородных уравнений, которые можно заменить данными КИС.

Исходя из анализа процессов конвективного теплообмена в

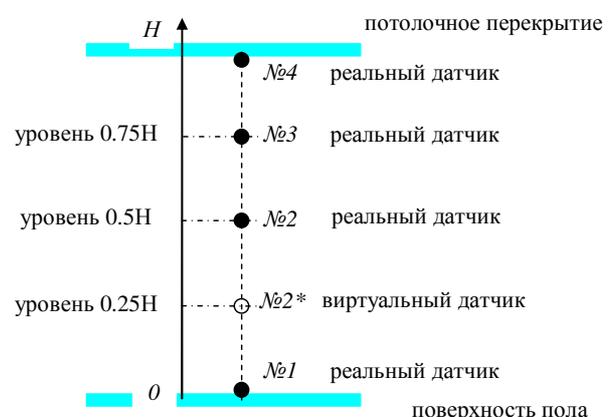


Рис. 4. Система датчиков в воздушной области над регионом

отапливаемых помещениях предполагаем, что в интервале  $0.25 \leq \xi \leq 0.75$  между поверхностью пола и потолком температура изменяется по линейному закону (см. рис. 1). Угол наклона этих зависимостей определяется показаниями датчиков №2 и №3. На основе этой гипотезы в области расположения датчика №2\* вычисляется значение температуры  $T_{2*} = 2T_2 - T_3$ . Такая схема расположения датчиков, включая виртуальные, полезна тем, что воздушная область над поверхностью пола до уровня  $H/2$ , или выше, будет свободна от каких-либо элементов КИС. При этом сохраняется точность диагностики и прогнозирования теплового состояния среды над регионами обогреваемого пола. ИВС, обрабатывая данные региональных датчиков, в режиме реального времени учитывает любые внешние изменения температуры и вырабатывает сигналы управления энергопотоками НС.

**Регионально-аналитические преобразования данных КИС.** При моделировании и прогнозировании процессов конвективного теплообмена в воздушной среде возникают проблемы обработки данных, получаемых от системы датчиков КИС. Рассмотрим возможное решение нестационарной задачи теплопроводности для определения распределения в однородном слое толщиной  $2 \cdot l_0$  температуры  $T = T(x, Fo)$ , являющейся функцией координаты и времени:

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad T(x, Fo)|_{Fo=0} = T_0; \quad T(x, Fo)|_{x=\pm 1} = T_0 + \Delta T^* Fo, \quad (7)$$

где  $x$  – нормированная на величину толщины слоя безразмерная координата;  $Fo = a \cdot t / l^2$  – безразмерное время (критерий Фурье);  $T_0$  – начальная температура слоя и среды;  $\Delta T^*$  – некоторый текущий параметр, имеющий размерность температуры, который в рамках принятого теоретико-экспериментального подхода может быть определен в любые заданные моменты времени с помощью датчиков. Принятый вид граничного условия, в общем случае зависящего от времени, подходит для условий теплообмена как 1-го рода, так и для 3-го рода.

Для отыскания аналитического решения краевой задачи (7) введем новую переменную  $u(x, Fo) = (T(x, Fo) - T_0) / \Delta T^*$ , для которой краевая задача будет иметь уже однородное начальное условие:

$$\frac{\partial u}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad u(x, Fo)|_{Fo=0} = 0; \quad u(x, Fo)|_{x=\pm 1} = Fo. \quad (8)$$

Решение рассматриваемой нестационарной задачи теплопроводности можно интерпретировать как некоторую дискретную во времени информацию от системы датчиков, расположенных вдоль оси  $Ox$  в ряде точек, например, по высоте помещения, если рассматривать задачу контроля теплового режима при отоплении помещения.

Применив к задаче (8) преобразование Лапласа, получим решение для образа искомой функции  $\tilde{u}(x, p)$ :

$$\frac{d^2 \tilde{u}}{dx^2} - p \cdot \tilde{u} = 0; \quad \tilde{u}(x, p)|_{x=\pm 1} = \frac{1}{p^2}, \quad (9)$$

В 1-м приближении решение задачи (9) представим в виде, который обеспечивает точное выполнение граничного условия при  $x = \pm 1$ :

$$\tilde{u}(x, p) = \frac{1}{p^3} + C_1(p)p(1-x^2). \quad (10)$$

Коэффициент  $C_1(p)$  определим из уравнения Бубнова-Галеркина, решение которого дает следующий результат:  $C_1(p) = -5/[2p(5+2p)]$ .

Полнос функции  $C_1(p)$  имеет место при  $p_1 = -2.5$ . Это дает возможность получить решение задачи – в нашей интерпретации задачи преобразования дискретной информации во времени от системы датчиков по высоте помещения – для первого региона по времени, точно удовлетворяющее начальному и граничному условиям. В этом случае искомое решение задачи (9) – "прогноз" температурного распределения:

$$u_1(x, Fo) = Fo + (1 - e^{-2.5Fo}) (C_1^{(1)} + C_2^{(1)}x^2)(1-x^2). \quad (11)$$

Выберем следующие границы регионов во времени:  $Fo_1 = 0.1$ ,  $Fo_2 = 0.2$ ,  $Fo_3 = 0.4$ ,  $Fo_4 = 0.8$ ,  $Fo_5 = 1.2$ ,  $Fo_6 = 1.8$ ,  $Fo_5 = 2.4$ ,  $Fo_8 \rightarrow \infty$ .

Следует заметить, что регионально-аналитическое прогнозирование известных функций распределения предполагает, что границы регионов во времени могут выбираться, исходя из расчетных данных, либо на основе опыта и инженерной интуиции при проектировании конкретных систем диагностирования, обеспечивая расчетную эффективность.

$C_1^{(1)}$  и  $C_2^{(1)}$  в выражении (11) определим исходя из заданной дискретной информации для функции  $u(x, Fo)$  в выбранных "базовых" точках  $x = 0.0$  и  $x = 0.8$ . Пусть при  $Fo_1 = 0.1$  имеет место  $u_1(0.0, 0.1) = 0.001$ ,  $u_1(0.8, 0.1) = 0.047$ . Тогда получим:  $C_1^{(1)} = -0.4475$ ;  $C_2^{(1)} = -0.3411$ .

Для второго региона по времени  $Fo_1 \leq Fo \leq Fo_2$  формулу аналитического прогнозирования известной функции распределения температуры представим в виде:

$$u_2(x, Fo) = u_1(x, Fo) + (e^{-0.25} - e^{-2.5Fo}) (C_1^{(2)} + C_2^{(2)}x^2)(1-x^2), \quad (12)$$

При этом в точке сопряжения региональных функций по времени  $Fo = Fo_1$  обеспечивается точное выполнение условия  $u_1(x, Fo_1) = u_2(x, Fo_1)$ .

Продолжая начатую процедуру построения региональных функций и сравнивая их численные значения, можно прийти выводу, что уже функции  $u_3(x, Fo)$  и  $u_4(x, Fo)$  демонстрируют хорошее согласование в точках "x", отличных от базовых.

Таким образом, для дальнейшего аналитического прогнозирования во времени достаточно ограничиться функцией  $u_3(x, Fo)$ . За три шага прогнозирования получен выход на значения  $u(x, Fo_{3+j})$ , достигающие в последующие моменты времени заданного уровня. Таким образом, здесь решена и обратная задача прогнозирования – определено число шагов прогнозирования. Данные вычислительного эксперимента подтверждают достаточно высокую эффективность предложенной методики регионально-аналитического

прогнозирования известных функций распределения. Прогнозирование времени выхода теплового состояния объекта на регулярный режим может быть осуществлено с помощью анализа величины

$$\max_{m,i} |T_3(x_m, Fo_i) - T_1(x_m, Fo_i)| \leq \varepsilon. \quad (13)$$

Проверка условия (13) позволяет определять время выхода исследуемой системы на регулярный режим, для которого в данном случае получено значение  $Fo = 2.4$ .

Предложенный здесь подход анализа нестационарных процессов может быть распространен также на 2- и 3-мерные объекты.

Приведем здесь решение трехмерной задачи регионально-аналитического преобразования данных КИС при моделировании и прогнозировании процессов конвективного теплообмена в воздушных зонах помещений. Для температурных распределений в прямоугольной призме с размерами  $2a \times 2b \times 2c$  и граничными условиями Ньютона-Рихмана на гранях (начало декартовой системы координат находится в центре призмы) в каждом из регионов по времени  $0..Fo_1, Fo_1..Fo_2, \dots, Fo_{k-1}..Fo_k$  можно построить такую цепочку функций:

$$T_1(x, y, z, Fo) = T_{cp}(Fo) + (1 - e^{-p_1 Fo}) \cdot X^{(1)}(x) \cdot Y^{(1)}(y) \cdot Z^{(1)}(z),$$

$$T_2(x, y, z, Fo) = T_1(x, y, z, Fo) + (e^{-p_1 Fo_1} - e^{-p_1 Fo}) \cdot X^{(2)}(x) \cdot Y^{(2)}(y) \cdot Z^{(2)}(z),$$

-----

$$T_k(x, y, z, Fo) = T_{k-1}(x, y, z, Fo) + (e^{-p_1 Fo_{k-1}} - e^{-p_1 Fo}) \cdot X^{(k)}(x) \cdot Y^{(k)}(y) \cdot Z^{(k)}(z),$$

$$\text{где } X^{(k)}(x) = \xi^{(k)}(x) - \omega_1(x) \cdot \left[ \frac{\partial \omega_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi^{(k)}}{\partial x} - Bi_1(Fo) \cdot \xi^{(k)}(x) \right]_{x=\pm a},$$

$$Y^{(k)}(y) = \eta^{(k)}(y) - \omega_2(y) \cdot \left[ \frac{\partial \omega_2}{\partial y} \cdot \frac{\partial \eta^{(k)}}{\partial y} - Bi_2(Fo) \cdot \eta^{(k)}(y) \right]_{y=\pm b},$$

$$Z^{(k)}(z) = \zeta^{(k)}(z) - \omega_3(z) \cdot \left[ \frac{\partial \omega_3}{\partial z} \cdot \frac{\partial \zeta^{(k)}}{\partial z} - Bi_3(Fo) \cdot \zeta^{(k)}(z) \right]_{z=\pm c},$$

$$\omega_1(x) = \frac{a^2 - x^2}{2a}, \quad \omega_2(y) = \frac{b^2 - y^2}{2b}, \quad \omega_3(z) = \frac{c^2 - z^2}{2c},$$

$\xi^{(k)}(x), \eta^{(k)}(y), \zeta^{(k)}(z)$  – функции, подлежащие определению.

Представленные выше функции непрерывны по параметру  $Fo$  на границах временных регионов, точно удовлетворяют граничным условиям на гранях призмы условиям Ньютона-Рихмана на аналитическом уровне и отражают динамику взаимодействия объекта с внешней средой.

**Выводы.** Предложен теоретико-экспериментальный подход контроля и автоматизированного поддержания теплового режима микроклимата в рабочих зонах помещений на основе использования в математических моделях теплофизических объектов данных контрольно-измерительных систем, что

позволит заметно повысить энергетическую эффективность производственных сооружений.

Предложенная методика регионально-аналитического преобразования данных контрольно-измерительных систем впервые позволила проводить аналитическое прогнозирование спектральных составляющих динамического процесса по регионам во времени. Она также позволяет решать обратную задачу, которая состоит в определении числа шагов прогнозирования  $m$ , через которые значения параметра прогнозирования  $\eta(t_{n+j})$  достигнут допустимого уровня в будущие моменты времени. Предлагается использовать новый подход к преобразованию дискретной информации от термодатчиков контрольно-измерительной системы во времени и по координате в регионально-аналитическую информацию для построения систем регулирования теплового режима микроклимата производственных помещений на основе прогнозирования тепловых процессов.

**Список литературы:** 1. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания [Текст] / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с. 2. Круковский, П. Г. Тепловые режимы полов различных конструкций с электрокабельными системами обогрева [Текст] / П. Г. Круковский, Н. П. Тимченко, О. Ю. Судак, Д. И. Розинский // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24. – №1. – С. 10–16. 3. Электротеплоаккумуляционное отопление греющим полом / Сб. научн. статей «К разработке государственных строительных норм Украины «Электрические кабельные системы отопления». – Под ред. Д. И. Розинского. – Киев. – 2001. – 152 с. 4. Романченко, М. А. Енергозберігаючі електротехнології забезпечення стандартів теплового режиму виробничих споруд АПК з електрообігрівними підлогами [Текст] / М. А. Романченко, Д. І. Мазоренко, А. П. Слесаренко, О. С. Сорока // Електрифік. та автоматиз. сільського господарства. – 2006, №2. – С. 82-92. 5. Слесаренко, А. П. Моделювання стаціонарної теплопередачі в 3-вимірній багаточастинній структурі з трубчастими нагрівачами для системи оптимального керування тепловим режимом приміщення [Текст] / А. П. Слесаренко, М.А. Романченко, О. С. Сорока // АСУ и приборы автоматики.– Харьков, 2009.– Вып.149. – С. 38-47. 6. Слесаренко, А.П. Математичне моделювання термостабілізації підлог приміщень з урахуванням максимального теплоакмулювання в системі обігріву [Текст] / А. П. Слесаренко, О. С. Сорока // Проблеми машиностроения. – Харьков, 2011. – Т.14, №1. – С. 72-85. 7. Пчолкін Ю.М. Машины та обладнання для створення мікроклімату на фермах / Ю. М. Пчолкін, В. К. Мурзин // К.: Урожай. – 1977. – 110 с.

*Поступила в редколлегию 23.11.2011*