УДК 620

ОЦЕНКА ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Игонин В.И., Белянский Д.А.

ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет», Вологда, e-mail: igonvlad@yandex.ru

В настоящее время, в связи с успехами в изучении и построении инновационных теплоэнергетических объектов, в которых идет множество интенсивных энергопреобразований, возросли требования к моделированию их энергетического состояния. Модель должна отражать возможности комплексного энергетического воздействия на исследуемые структуры источниками разнотипного преобразования энергии [1].

Ключевые слова: энтропийный нелинейный функционал, критериальные формулы дробной размерности. Единый обобщенный энергетический показатель для двух структур

ASSESSMENT OF THE GENERALIZED ENERGY STATE OF SEVERAL OF HEAT ENGINEERING SYSTEMS

Igonin V.I., Belanckij D.A.

Vologda State Technical University, Vologda, e-mail: igonvlad@yandex.ru

At the present time, in connection with the successes in studying and building Innova-operating heat and power facilities, in which there are a multitude of intensive энергопреобразований, increased requirements to the modeling of their energy state. The model should reflect the possibilities of complex energy effects on the studied structure of the sources of various energy conversion [1].

Keywords: Entropy non-linear functional criteria formula fractional dimension. Unified generalized energy indicator for the two structures

Опробована методика функционального моделирования энергетического пространства состояния многоструктурного объекта. Состояние объекта оценивается с помощью обобщенного интегрального параметра. Обобщенный параметр получен на основе идентификации априорных и экспериментальных данных на лабораторно-вычислительном комплексе.

Получены новые экспериментальные зависимости, связывающие обобщенный интегральный показатель с потоками, силами и свойствами разных по назначению структур.

По своей значимости результаты аналогичны решению комплекса дифференциальных нелинейных уравнений высокого порядка. Искомые решения получены в алгебраическом виде. Что затруднительно сделать даже при наличии мощных ЭВМ.

Экспериментальные выходные параметры в виде безразмерных удельных потоков энергии связаны с термодинамическими, геометрическими, временными параметрами систем.

Функций коэффициентов неравновесности позволяют сравнивать затраты энергии для каждой структуры и выбирать их оптимальные значения.

Выходные траектории функционала нелинейны, что указывает на свойства неравновесности и необратимости исследуемых процессов.

Процедуры получения выходных траекторий итерационные и открыты для варьирования из условий минимума отклонения удельной энергии от нормированных значений.

Энергетическое пространство состояния разнородной структуры удовлетворяет условиям однозначности и целевой функции полезности сформулированных краевых энергетических задач.

Результаты натурного и численного экспериментов косвенным путем сопоставлены с данными других исследований.

Предлагаемая методика функционального моделирования состояния структуры увеличивает скорость восприятия материала и поэтому применима в междисциплинарных исследованиях, в том числе для обучения.

Методика создана на основе методов системного анализа, неравновесной, феноменологической термодинамики, синергетики численного и натурного экспериментов.

Энтропия как калорический параметр широко используется для описания теплоэнергетических процессов. Основополагающими в этом отношении являются работы М.П. Вукаловича, И.И. Новикова, А.И. Андрющенко, Л.И. Седова, В.М. Бородянского, Д.П. Гохштейна, и др. [5, 6, 7]. Понятие энтропии широко принято в эксергетических расчетах теплотехнических систем [13]. В работах А.В. Дмитриенко, В.Г. Попова наиболее полно проведён системный анализ существующих законов неравновесной термодинамики, которая использует для построения своих моделей

феноменологические уравнения теории энтропии [8].

Из обзора следует, что энтропийные постановки хорошо приспособлены для оценки состояния исследуемой диссипационной структуры. Сформулированные в [9, 10, 11] основные законы энергоэнтропики функционально увязывают движущие силы, свойства, потоки вещества и энергии рабочего тела. Действия сил и потоков в условиях недалеких от равновесия указывают на справедливость феноменологических законов Ома, Дарси, Фурье и т.д. Проверка уместности их использования в связи с ростом интенсивности потребления энергии становится все актуальнее, и должна проводиться в каждом конкретном случае экспериментальным путем с установлением связей функционального характера (1)

$$S = f\,[\text{потоки, силы ,свойства, геометрические параметры}]. \qquad (1)$$

Для каналов круглого и прямоугольного сечений с различными свойствами движущихся теплоносителей зависимость (1) имеет вид с дробными параметрами [12, 14], (2), (3), (4):

$$\varphi\left(\frac{F}{\omega}\right)^{0.9} = S^{1.25}, \qquad (2)$$

где $S = \dfrac{\Delta S}{\Delta S_{\max}}$ – безразмерный критерий термодинамического подобия; φ – критерий Стантона, F – поверхность теплообмена, м^2; ω – площадь поперечного сечения канала, м^3;

$$\phi = 0.8\frac{\Psi_S^{1.2}}{\Psi_{\text{геом.}}^{0,9}},$$

где $\Psi_S = \dfrac{\Delta S}{\Delta S_{\max}}$,

$$\Psi_{\text{геом.}} = \frac{F}{\omega}. \qquad (3)$$

$$St \cdot K_{\text{геом.}}^{0,9} = f\left[\left(\frac{\Delta S}{\Delta S_{\max}}\right)^{1.2},\ \tau\right]. \qquad (4)$$

В функционале (4) энтропийный параметр содержится в неявном виде. Однако доказана его корреляция в функциональных связях между тепловыми потоками, свойствами теплоносителя, временем течения процесса [7, 12].

Для доказательства существования «обобщенного параметра» субъект получает новые зависимости в виде «обобщенного параметра» состояния для новых условий энергообмена на новых лабораторных вычислительных комплексах.

Ниже представлен состав комплекса, алгоритмическая структура и методика обработки результатов исследований рис. 1.

Для достижения цели эксперимент проведен на нескольких установках типа источник-приемник энергии (ИПЭ). В каждой паре ИПЭ изучается свой набор энергопреобразований: условия взаимодействия газового инфракрасного излучателя с металлической пластиной (ИГИ-МП), электрического инфракрасного излучателя с поверхностью из кирпичной стенки (ЭИИ-КС), электрического тепловыделяющего элемента через изоляционный материал и цилиндрическую металлическую поверхность с окружающей средой (Э-ТВЭ-ОС).

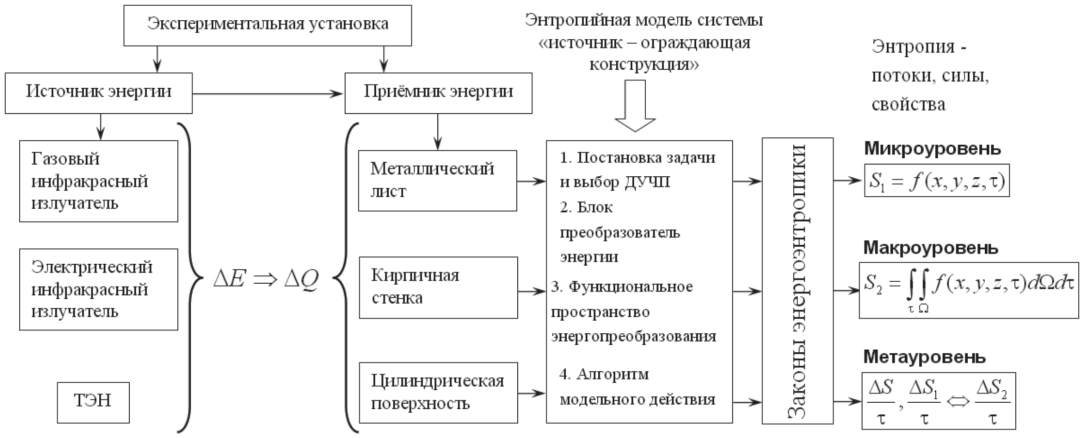

Рис. 1. Системная идентификация «обобщенного» структурного параметра

Набор установок и приборные возможности позволяют провести экспериментальные исследования для основных явлений нестационарной теплопередачи теплоты теплопроводностью, конвекцией, излучением.

На рис. 1 представлена обязательная последовательность действий для получения результатов: постановка краевой задачи в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных; рассмотрение каждой структуры в образе «обобщенного преобразователя энергии»; формирование структуры в терминах «пространства состояния»; построение алгоритма «конечного действия»; в априорную составляющую входят законы энергоэнтропики [15, 20]; апостериорную – результаты экспериментальных исследований; анализ полученного материала и его математическая обработка представлена в трех иерархических уровнях. [15].

В процессе системного изучения априорной информации выявляется структура объекта и ее параметры.

Структуризация термодинамической системы подразумевает совокупность блоков [15, 18] «преобразователей энергии». Блок преобразователь энергии представлен на рис. 2. Структура отражает в общем виде характерный потоковый баланс энергии и массы для условий существования объекта: семи потоковых форм, двух типов энергопреобразований, наличия трех рабочих тел.

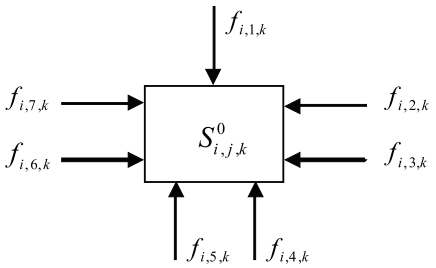

Рис. 2. Модель – блок «преобразователь разнородной энергии» типа «источник – приёмник энергии»

$f_{i,1,k}$ – электрической энергии,

$f_{i,2,k}$ – естественная конвекция,

$f_{i,3,k}$ – вынужденная конвекция,

$f_{i,4,k}$ – теплопроводность,

$f_{i,5,k}$ – инфракрасное излучение,

$f_{i,6,k}$ – топливо (газ).

$f_{1,j,k}$ – трансформатор энергии,

$f_{2,j,k}$ – преобразователь энергии,

$f_{i,j,1}$ – жидкость,

$f_{i,j,2}$ – воздух,

$f_{i,j,3}$ – твёрдое тело.

Характеристические данные в таком виде позволяют субъекту строить функциональные зависимости (5):

$$\overline{Y} = F_S(X(\tau), H(\tau), V(\tau), \tau) = 0\,, \qquad (5)$$

состояния системы. $\overline{Y}$ – вектор траектории выходных параметров. *X, H, V*, – множества для векторов входных, внутренних, внешних параметров:

$$\overline{x}_{n_x}(\tau) \in X, x = \overline{1, n_x}\,, \quad \overline{h}_{n_h}(\tau) \in H, h = \overline{1, n_h}, \quad \overline{v}_{n_v}(\tau) \in V, v = \overline{1, n_v}\,. \qquad (6)$$

Параллельно с созданием функциональной записи, формируются условия краевой задачи в виде систем алгебраических и дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Оценивается возможность решения такой системы численными методами. В случае большой нелинейности предпочтение отдается эксперименту, решаются инверсная и обратные задачи при известных из эксперимента граничных условиях рабочих тел участвующих в энергообмене.

Реализация численных процедур в любом случае нужна для определения градиентных или дивергентных характеристик соответствующих скалярных и векторных полей.

Для удобства классификации решаемых или нужных для решения задач результаты систематизированы на трех иерархических

уровнях их представления. Как правило, после обработки экспериментальных данных нестационарное скалярное поле описывается в виде функции двух и или трех переменных (7).

$$S_1^0 = F_1\left(x, y, z, \tau\right). \qquad (7)$$

Макроуровневое описание модели(7) требует получения функции (8). Для этого (7) интегрируется по объему, поверхности или времени, в зависимости от цели поставленной задачи:

$$S_2^0 = \iint\limits_{\tau\ \Omega} F_1(x, y;\ z, \tau)\, d\Omega d\tau. \qquad (8)$$

Уравнения (9) дают потоковые переменные, которые удобно сопоставлять между собой, а значит определять энергетические характеристики структур типа (9).

$$\frac{\Delta S_{3,n=1}}{\tau} \Leftrightarrow \frac{\Delta S_{3,n=2}}{\tau} \Leftrightarrow \frac{\Delta S_{3,n=3}}{\tau}. \qquad (9)$$

Схема экспериментальной установки, реализует модельное силовое состояние процесса теплопроводности в металлическом листе (рис. 3,а), кирпичной стенке (рис. 3,б), двухслойном цилиндрическом теле (рис. 3,в).Условия принуждения формируются от газового топливного инфракрасного излучателя белого типа, электрического инфракрасного излучателя и тепловыделяющего элемента под действием электрического тока.

Регулирование мощности источников теплоты позволяет реализовывать условия переключения с одного силового режима на другой и тем самым формировать переходные и нестационарные процессы в материале изделий. Предусмотрена система «аналог код» для передачи и выработки цифрового сигнала на компьютер.

Экспериментальная установка как комплекс источников и приемников энергии [4, 20] изображена на рис. 3.

а б в

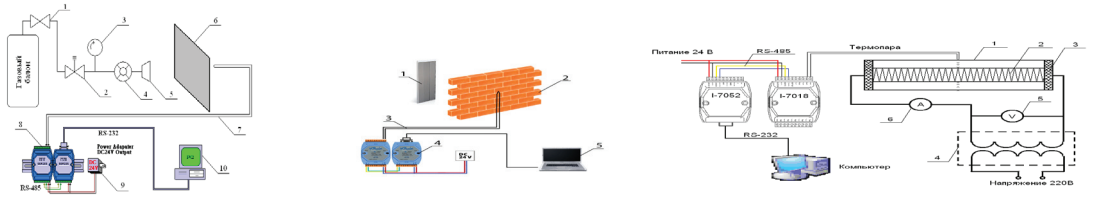

Рис. 3. Структурное отражение лабораторно-вычислительного комплекса: а – (ИГИ-МП) – инфракрасный газовый излучатель, металлическая пластина, система аналог код с термопарами и компьютером. б – (ЭИИ-КС) –электрический инфракрасный излучатель, кирпичная стенка, система аналог код с компьютером; в – (ЭН-ЦТ)-электрический нагреватель с изоляцией и цилиндрической оболочкой, система аналог код и компьютер

Макроуровневый функционал вида (9) получен после интегрирования поля энтропий по объёму кирпичной стенки рис. 3б.

$$S_{\text{к}}(\tau) = F_{2S}\left(f_{2,2,k}, f_{2,4,\text{k}}, f_{2,5,\text{k}}, \tau\right) \qquad (10)$$

Управление через лучистый поток $f_{2,5,\text{k}}$ позволяет осуществлять воздействие на поле энтропии. На рис. 4 показано развитие интегрального энтропийного поля во времени в четырех координатных точках сечения кирпичной стенки.

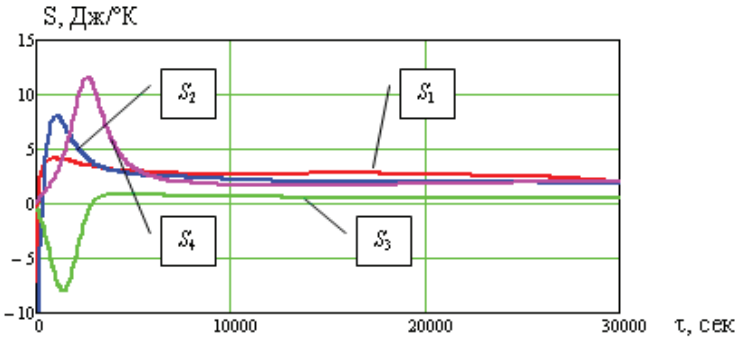

Рис. 4. Макроуровневые потоки S_1, S_2, S_3, S_4 при x = 0.01, 0.035, 0.065, 0.09 м

Энергетическое состояние сформировано на основе модели процесса теплопроводности. Поскольку другие составляющие (лучистая и конвективная) при малом уровне температур незначительно влияли на общий уровень энергообмена.

В первой задаче прим малой толщине пластины и быстрого прогрева ее по толщине основное внимание обращено решению задачи естественной конвекции.

Измерения температур и скоростей проведены термопарами и термоанемометрами.

Использование методов интерполяции и конечноразностной аппроксимации измеренных значений теплоносителя позволила найти температурные поля и потоки теплоты в движущейся воздушной среде. Отношение полей потоков и температур позволили определить поля локальной энтропии, рис. 5.

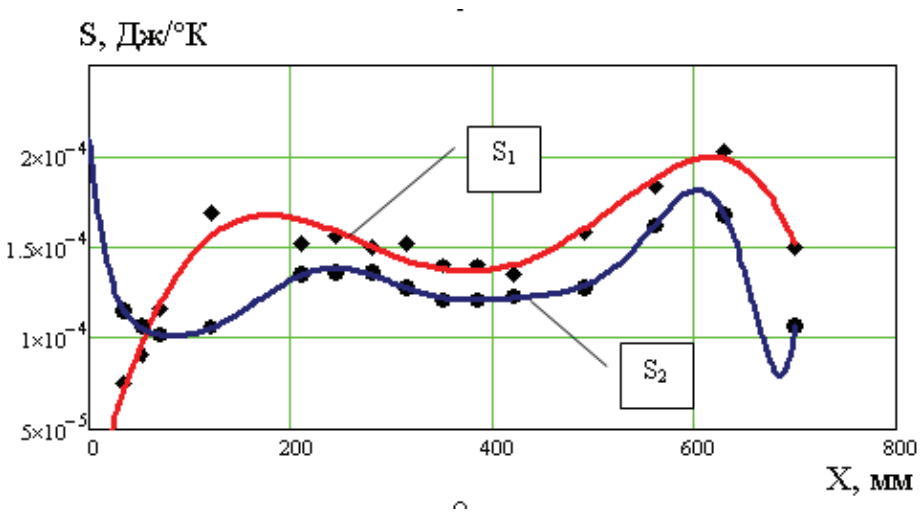

Рис. 5. Микроуровневые представления энтропийных конвективных потоков воздуха около пластины: 1 – 15 мм от пластины; 2 – 25 мм от пластины

Траектория развития функционала после интегрирования поля энтропий по объёму пограничного слоя имеет вид

$$S_{\text{i}}(\tau) = F_{2S}\left(f_{2,2,k}, f_{2,4,\text{k}}, f_{2,5,\text{k}}, \tau\right), \quad (10)$$

где $f_{2,5,\text{k}}$ принуждающее воздействие (11).

В наиболее общей постановке проведены экспериментальные исследования для задачи рис. 6,в.

На рис. 6,А,В показаны силовые характеристики поля механической и термической форм движения энергии в условиях естественной конвекции около цилиндра. Синим цветом (рис. 6,С) представлены расчётные скорости, красным – экспериментальные данные. Анализ полей показал, что в зоне малых скоростей экспериментальные и расчетные данные совпадают. С увеличением ω от 0,3 до 1,8 м/с погрешность расчётных и экспериментальных данных достигает 46 %.

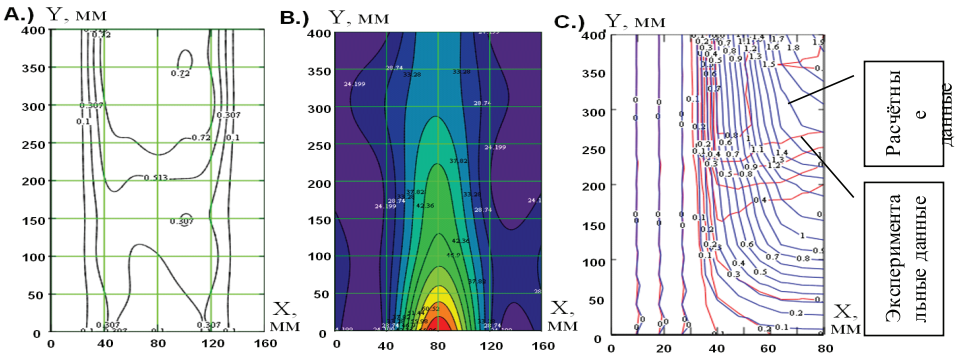

Рис. 6. Силовые поля термической и механической форм движения энергии в условиях естественной конвекции

Методами теории поля в движущемся потоке воздуха **найдены касательные напряжения и плотности потоков** теплоты.

На рис. 7 представлены экспериментальные нестационарные поля температур в цилиндрическом теле.

После перехода на макроуровневый вид представления **тепловой и механической форм энергии определены функции энтропии в тепломеханической и теплопроводной частях** объекта. А затем и суммарная величина удельной энергии для всей установки. Для цилиндрического тела $S = 7.547$ Дж/°К., механическая составляющаяв пограничномслое $S_W = 2.4 \cdot 10^{-5}$ Дж/°К., термическая составляющая пограничном слое $S_T = 0.087$ Дж/°К.

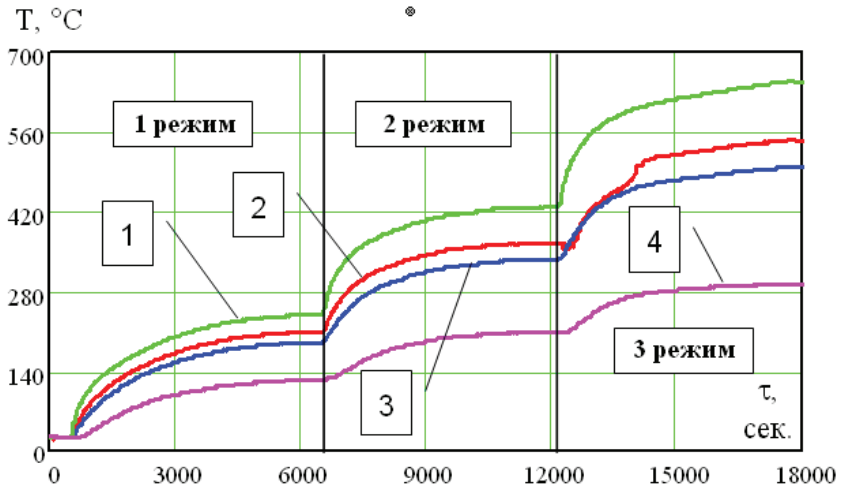

Рис. 7. Силовые термические характеристики теплопроводности в теле на 3-х режимах: 1 – температура ТЭНа, 2 – температура вещества на глубине 12 мм, 3 – температура вещества на глубине 6 мм, 4 – температура поверхности

Удельная обобщенная энергетическая характеристика системы за время ее работы составила

$$S_{ц} = F_{2S}\left(f_{i,1,k}, f_{i,2,k}, f_{i,4,k}, f_{i,5,k}\right) = 7.634 \text{ Дж/°К.} \quad (12)$$

Уравнение (12) указывает на получение **единого энергетического показателя в виде воспроизводства «обобщенной энтропии»**, характеризующего суммарное энергетическое состояние многоструктурной системы. Структура состоит из энергии присутствующей в формах «гидравлического» и «теплового» пограничного слоев, «теплопроводности» цилиндрического тела.

Разница в энергетическом состоянии системы на двух режимах ее работы $S_{цk} - S_{цi} = \Delta S_{цk,i} \Rightarrow 0$, где k и i режимы работы, дает возможность субъекту сохранять интервал оптимального управления.

На рис. 8 представлены потоковые макроуровневые функции воспроизводства обобщенной энтропии в разных структурах (ЭИИ-КС) и (Э-ТВЭ-ОС).

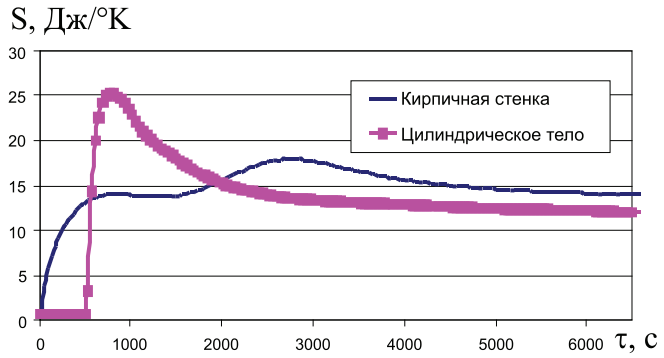

Рис. 8. Макроуровневое воспроизводство потоков энтропии различными теплотехническими структурами

Графики на рис. 8 построены на основе третьего закона энергоэнтропики (8) и позволяют сравнивать меняющийся во времени «обобщенный энергетический показатель» двух разных структур, который указывает на состояния этих энергетических структур. Динамика изменения позволяет вести оценку количества и качества энергии требуемой для термодинамических процессов.

Попытка обобщения полученных результатов на **целый класс объектов с помощью критэриальной формулы** (4) дала ряд функций рис. 9 при $n = -2.05$ – для цилиндрической металлической поверхности, $n = -0.71$ – для кирпичной стенки достаточно близко расположенные от области значений представленных другими авторами. Из рис. 9 следует, что разные по своему принципу работы тепловые системы описываются графиками с разбросом экспериментальных данных в 20%. А формула (4) указывает на возможность управления энергетическими ресурсами трёх рассматриваемых структур. Связь энтропийных, потоковых, геометрических критериев позволяет наглядно демонстрировать на одном графике особенности и направление изменения «обобщенной энергии» в разных теплотехнических системах.

Такого рода результаты дают основание для построения параметрических номограмм, для групповой структуры, в которой «обобщенный относительный энтропийный критерий» замыкает на себя относительные «силы», «потоки», «свойства» исследуемой структуры. На рис. 10 раскрыт функционал (13) для системы «б» рис. 3.

$$S_* = f(q,\ L,\ t,\ \alpha,\ \lambda,\ a), \qquad (13)$$

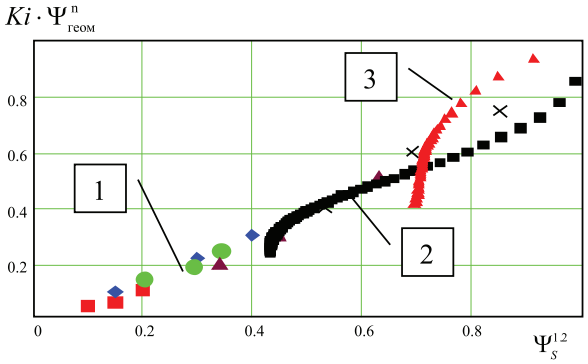

Рис. 9. Сравнение энтропийного представления для разных производственных объектов: 1 – авторы по формулам (2, 3, 4), 2 – цилиндрическая ограждающая поверхность, $n = -2.05$, 3 – кирпичная ограждающая поверхность, $n = -0.71$

где S_* – безразмерная энтропия системы; q, L, t, α, λ, a – соответственно безразмерные плотность теплового потока от источников энергии разной мощности: 1 – 1 кВт, 2 – 2 кВт, 3 – 3 кВт; геометрический параметр, температура, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности и температуропроводности.

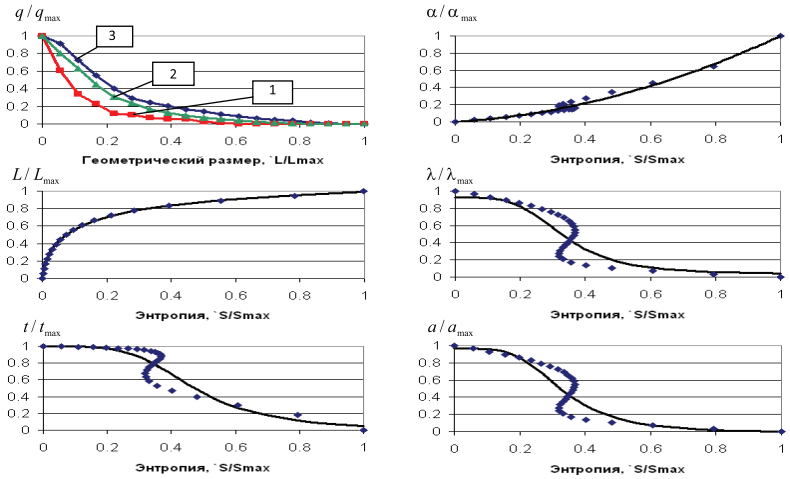

Рис. 10. Энтропийный функционал и его функции

Использование построенных номограмм освобождает исследователя множество раз пересчитывать системы нелинейных равнений для разных граничных условий в заданной области определения рабочих функций. Как следствие напрашивается вывод, что **макроуровневое энтропийное** представление удельного энергетического состояния структуры позволяет находить условия оптимального управления и функционирования объекта путем контроля минимизации отклонений воспроизводства энтропии (8), [20]. Для примера построим функционал (13), который позволяет записать, а затем и найти практически все параметры системы через связь «обобщенной суммарной энтропии» системы и входящих в нее структур. Функциональные зависимости, раскрывающие функционал (14) для двух структур показаны на рис (11).

$$S_* = f(S,\ Ki,\ Bi,\ Fo), \qquad (14)$$

где S_* – безразмерная суммарная энтропия двух систем; S, Ki, Bi, Fo – безразмерные параметры: энтропия одной из систем; критерий Кирпичёва; Критерий Био; время соответственно.

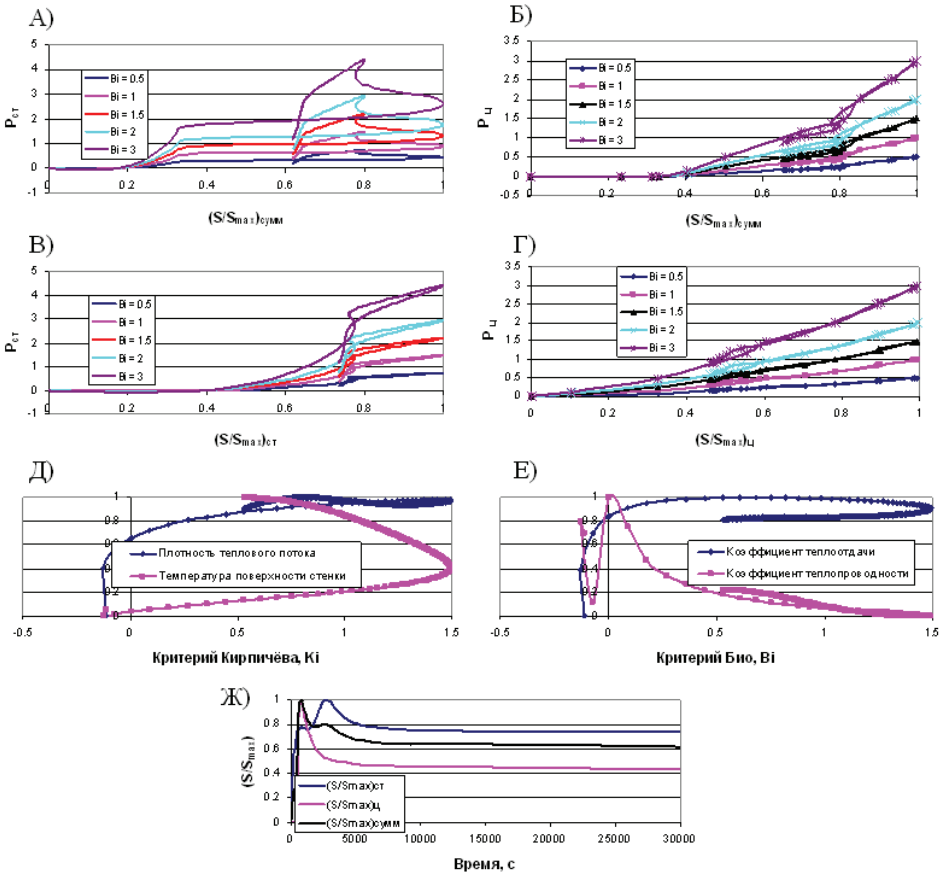

Рис. 11. Функциональные решения, связывающие в термодинамической системе через энтропийные критерии потоки, силы и свойства двух структур

На рис. 11 показаны следующие функциональные зависимости в виде произведений: А – $P_{ст} = KiBi(S/\ S_{max})_{ст}$ критериев Кирпичёва, Био, энтропийного критерия от суммарной безразмерной энтропии для системы (ЭИИ-КС); Б – $P_{ц} = KiBi(S/\ S_{max})_{ц}$ Кирпичёва, Био, энтропийного критерия от суммарной безразмерной энтропии для системы (ЭН-ЦТ); В, Г – указывают на потоковые связи для кирпичной и цилиндрической стенок;. Д – функция связи безразмерных температур поверхности и плотности теплового потока с критерием Кирпичёва;. Е –связи безразмерных коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности и критерия Био. Ж – связи безразмерной энтропии системы с реальным временем процесса. «Склеивание» двух структур в неравновесной термодинамической системе по параметру «суммарная безразмерная энтропия» позволяет определять параметры связи любого блока структуры. На рис. 11,А,Б экстремумы функций соответствуют харак-

терному изменению свойств структуры и системы. Алгоритм работы с графиками рис. 11 требует по заданным значениям безразмерной энтропии и числа Bi, определить критерий K_i. Из графиков Д и Е по значениям K_i и B_i находятся свойства рабочих тел, плотности тепловых потоков, температур, коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи. По Ж определяется реальное время процесса, по А доля энергии, которую необходимо затратить на прогрев кирпичной стенки в зависимости от общей суммарной энергии всей системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов, В.С., Беляков, А.В. Технология керамики как процесс аккумулирования и диссипации энергии // Конструкции из композиционных материалов. – № 2. – М. 2005. – С. 5-18.

2. Игонин, В.И. Расчетно-экспериментальная идентификация балансовой модели теплообмена в ограждающей поверхности / Д.А. Белянский, В.Г. Пычёв // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Т. 14. – № 1. – 2009. – С. 79-94.

3. Игонин, В.И. К расчетно-экспериментальному определению энергетических параметров и балансовой модели теплообмена в приемнике лучистой энергии / Д.А. Белянский // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». – №1 (23). – 2009. – С. 175-183.

4. Игонин, В.И. Энтропийная оценка процессов энергообмена в ограждающих конструкциях / Д.А. Белянский // Academia. Архитектура и строительство. – М., 2010. – С. 253-260.

5. Аснин, Я.И. Тепловое подобие, конвективный теплообмен и энтропия /Я.И. Аснин. – Харьков: Изд-во Харьковского ордена Трудового красного знамени государственного университета им. А.М. Горького, 1962.

6. Вукалович, М.П. Термодинамика: учеб. пособие для вузов / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.: ил.

7. Гохштейн, Д.П. Энтропийный метод расчета энергетических потерь. – 2-е изд., перераб. / Д.П. Гохштейн. – Госэнергоиздат, 1963. – 112 с.

8. Дмитриенко, А.В., Попов В.Г. Введение в феноменологическую неравновесную термодинамику: учеб. пособие / А.В. Дмитриенко, В.Г. Попов. – М.: МАТИ, 2007. – 180 с.

9. Дьярмарти, И. Неравновесная термодинамики. Теория поля и вариационные принципы / И. Дьярмати. – М.: МИР, 1974. – 304 с.

10. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

11. Самарский, А.А., Вабищевич, П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

12. Титов, Д.В. К локально-модульной организации лучисто-конвективного энергообмена элемента промышленной теплоэнергетической системы / Игонин В.И., Титов Д.В., Чучин В.Н. // Вестник Московского авиационного института. – Т. 14. – № 4. – 2007. – С. 62-67.

13. Эксергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1967.

14. Игонин, В.И. К разработке системы управления процессами сушки керамических изделий / Д.А. Белянский, В.А. Боровков // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы пятой междунар. науч.-техн. конф., 23-25 нояб. 2009. – в 2 т. – Т. 1 . – Вологда, 2009. – С. 52-54.

15. Игонин, В.И. Пути повышения эффективности теплоэнергетических систем: Монография / В.И. Игонин. – Вологда: ВоГТУ, 2007. – 119 с.

16. Игонин, В.И. О принципах интегральности и системности и жизневоспроизводства / Игонин В.И. // Экология и безопасность. Газета МАНЭБ- №7. – 2009.

17. Igonin V.I. // Research Journal of International Studies. – [Режим доступа]: http://research-journal.org/featured/technical/obochevidnosti-proyavleniya-svojstv-integralnosti-pri-sistemnom-termodinamicheskom-analize-energeticheskoj-ustanovki. – 2012.

18. Игонин В.И. Особенности системной идентификации человекомерной модели функционирования технической энергосистемы // Современные наукоёмкие технологии. Технические науки. – №1 – 2013. – С. 22-26.

19. Игонин, В.И. Об очевидности проявления свойств интегральности при системном термодинамическом анализе энергетической установки / В.И. Игонин // Вестник Череповецкого государственного университета. – №1(45). – 2013. – С. 12-14.

20. Игонин, В.И. Особенности энтропийной идентификации неравновесной синергетической системы / Д.В.Титов, В.И. Игонин // Вестник МАНЭБ. – №4 (17). – 2012. – С. 59–65.