

## К ЛОКАЛЬНО-МОДУЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЛУЧИСТО-КОНВЕКТИВНОГО ЭНЕРГООБМЕНА ЭЛЕМЕНТА ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Владимир Иванович ИГОНИН родился в 1944 г. в селе Романовка Шкотовского района. Профессор Вологодского государственного технического университета. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области исследования задач нестационарной теплопроводности, моделирования теплоэнергетических процессов и оценки параметров энергоресурсосбережения в сопряжённых системах элементов теплоэнергетических установок, разработки методик повышения энергоэффективности промышленных теплоэнергетических систем, энергообследования предприятий и сооружений различного профиля. Автор 170 научных работ.

Vladimir I. IGHONIN, D.Sci., was born in 1944 in the Vologda Region. He is a Professor at the Vologda State Technical University. His major research interests are in non-stationary heat-conductivity, heat-and-power process simulation and energy-resource saving parameters evaluation for coupled parts of heat-and-power plants, techniques of energy efficiency enhancement for industrial heat-and-power systems, techniques of energy efficiency inspection for various enterprises and buildings. He has published 170 technical papers.

Виктор Николаевич ЧУЧИН родился в 1951 г. в городе Великий Устюг Вологодской области. Генеральный директор ООО «Устюггаз». Основные научные интересы — в области разработки и внедрения энергосберегающих технологий в системах газо- и теплоснабжения на промышленных объектах. Автор 15 научных работ.

Viktor N. CHUCHIN, was born in 1951 in the Vologda Region. He is the Director General at the Ustiug-Gas Company Ltd. In Vologda. His research interests are in development and realization of energy-resource saving technologies in gas and heat supply systems for industrial plants. He has published 15 technical papers.

Дмитрий Валерьевич ТИТОВ родился в 1979 г. в поселке Вычегодский Архангельской области. Преподаватель кафедры информатики и математики Вологодского института права и экономики ФСИН России. Основные научные интересы — в области разработки и использования моделей информационных процессов в технических и социально-экономических системах, применения методов неравновесной термодинамики к анализу сопряжённых систем элементов теплоэнергетических установок. Автор 20 научных работ.

Dmitry V. TITOV, was born in 1979 in the Arkhangelsk Region. He is a Lecturer at the Vologda Institute for Law and Economics. His research interests are in nonequilibrium thermodynamics for analysis of coupled parts of heat-and-power plants, development and using of information process models for technical and socio-economic systems. He has published 20 technical papers.

*В статье показано, что при достаточной разработанности каждого элемента структурной схемы промышленной теплоэнергетической системы (ПТЭС) ее можно собирать, используя алгоритмические возможности сетевой методической системы. Для этого каждый элемент надо представлять как преобразователь энергии с описанием основных параметров системы с помощью функциональной связи функции состояния системы — энтропии через используемое Дьяр-мартти, а затем Лыковым и Михайловым понятие “поток и силы”. Чтобы выделить алгоритмически такие потоки, удобно использовать предлагаемое В.И. Игониним трехуровневое иерархическое представление элемента ПТЭС, где на микро-, макро- и мета-уровневых описаниях имеются свои процедурные физические и математические представления, которые сочетаются с представлениями через термодинамические потоки и силы. Эта методология использует преимущества системного анализа при обучении, анализе, построении новых систем. В выбранном для анализа климатологическом лучисто-конвективном элементе рассматриваются основы транспорта лучистой и конвективной форм представления энергии при ее практически стопроцентном использовании. Рассматриваются методики получения коэффициентов преобразования энергии для каждого элемента схемы с источником теплоты в виде газового инфракрасного излучателя и потребителями-преобразователями энергии в форме теплоты для пластин различной конфигурации. Показаны возможности определения свойств элемента структурированной системы путем построения четырехслойной энтропийной модели. Излагаются методики численного и натурного экспериментов.*

В настоящее время все более широкое распространение получают системы промышленного производства и отопления, в которых в качестве источника преобразователя энергии топлива применяются инфракрасные излучатели [3, 13].

Основные принципы элементарной организации (промышленной теплоэнергетической системы) ПТЭС изложены в работах [5, 7, 8, 12].

В [5] описана трехуровневая иерархия представления ПТЭС. Чтобы оценить эффективность рабо-

ты существующей промышленной системы «первичной реальности» или эффективность проекта системы «вторичной реальности», удобны микро-, макро- и метауровневые модельные ее представления.

Наличие модельных представлений в виде локальных скалярных полей температур и векторных полей скоростей в деталях узлов ТЭС приводит к изучению процессов и явлений на микроуровне. Здесь мы имеем описание в виде функции:

$$Y = f(x, y, z, \tau). \quad (1)$$

Чтобы перейти к описанию системы на макроуровне, эту функцию надо проинтегрировать как в пространстве, так и во времени:

$$y_{cp} = \int_{\tau} \iiint_V f(x, y, z, \tau) dx dy dz d\tau. \quad (2)$$

Связи и соотношения параметров макроуровня оцениваются на третьей ступени — метауровне.

Процессы, которые проходят в деталях узлов промышленного предприятия, можно выразить на первых двух уровнях через потоки и силы [8, 9]. С точки зрения неравновесной термодинамики под силами понимаются движущие силы процесса. Их так называют потому, что они образуются за счёт существующих разностей потенциалов исследуемой субстанции. В математике принято описывать действие таких сил с помощью понятия градиента функции.

Таким образом, операция дифференцирования приводит к определению градиента от функции (1). Чтобы определить потоки в каждой точке пространства, требуется знание его теплофизических и гидравлических свойств. Например, произведение коэффициента теплопроводности и градиента функции температуры дают потоки теплоты. Таким образом, связываются между собой термодинамические потоки и силы. Если отнести поток к температуре, получим поток на один градус, т.е. количество энергии на один градус. Такое отношение совпадает с размерностью энтропии  $\Delta S$ . Тогда отношение приращения энтропии к приращению времени  $\Delta t$  характеризует свойства исследуемой системы. Применяя соответствующие математические операции с использованием формулы

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} \rightarrow \min, \quad (3)$$

можно найти оптимальные параметры основных показателей исследуемой системы [1]. Отобразим энтропию как функцию состояния теплотехнической системы:

$$\Delta S = f(T, J, X, Y_{ik}, \tau). \quad (4)$$

В такой системе она зависит от вида микро- и макроуровневых представлений, например температуры  $T$ , потоков теплоты  $J$ , термодинамических сил  $X$ , теплофизических и гидравлических коэффициентов  $Y_{ik}$ , времени существования изучаемой системы.

Последнее выражение справедливо для любого узла и для всей ПТЭС. Действительно, если ПТЭС — сложная система — структурируется в более простые детали и узлы, то ее можно рассматривать как последовательность теплообменных подсистем или элементов преобразователей энергии, соединенных последовательно, параллельно либо в виде кольца. Если предположить существование для выражения (4) свойства аддитивности, то при создании, анализе самой системы и ее подсистем можно говорить о методической энтропийной цепи (рис. 1). Моделирование энергетической системы становится возможным в макроуровневом представлении путем построения цепи энтропийных элементов  $S_k$ , где  $k = 1, \dots, 7$  — число элементов; I, ..., IV — число узлов. Оптимизация такой задачи позволяет создать теплотехническое устройство (систему охлаждения, тепловую сеть), реализованное в виде термогидравлической методической цепи [7].

Допустим, что энтропийное поле в элементе ПТЭС создается за счет лучистого конвективного или кондуктивного переноса потоков энтропии, ее воспроизводства путем последовательности взаимопревращений одних форм энергии в другие. Покажем некоторые возможности анализа и представлений блока энергосистемы с помощью описанных выше представлений. Рассмотрим вопросы климатизации на примере какой-то блочной структуры (рис. 2). На рисунке показана схема подвода теплоты к рабочему месту, основанная на использовании возможности транспорта и генерации процессов конвективно-лучистого теплообмена.

С позиций системного анализа каждая структура состоит из подструктур. Примем за основное допущение представление о том, что сама структура и ее подструктуры являются блоками — преобразователями энергии. Это значит, что подструктура может состоять из источников энергии, систем распределения и потребления. Назовем такую под-

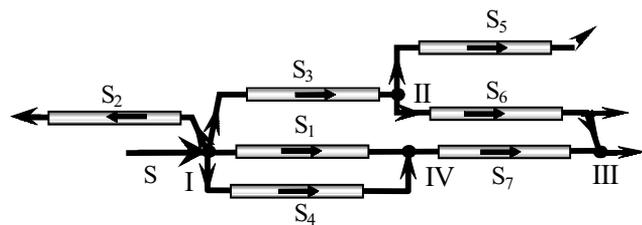


Рис. 1. Сеть гидротермических энтропийных элементов

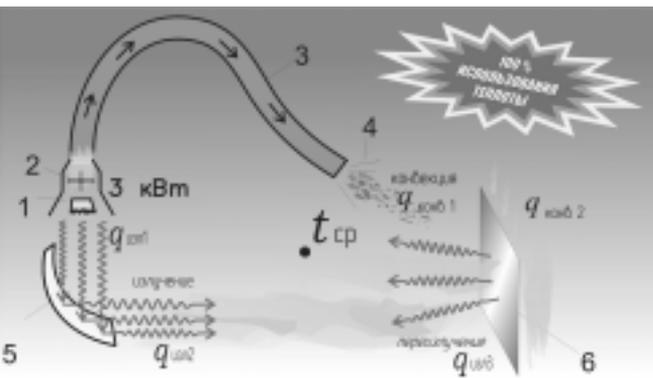


Схема подвода тепла к рабочему месту

- 1 - Измеритель
- 2 - реверсивный вентилятор
- 3 - воздуховод
- 4 - рассеиватель
- 5 - отражатель №1
- 6 - отражатель №2

Рис. 2. Лучисто-конвективный элемент

структуру блоком — преобразователем энергии. Особенность рассматриваемой системы состоит в том, что в ней присутствуют потоки лучистой и конвективной передачи энергии по лучеводам и через воздушное пространство. Тогда система распределения энергии описывается с помощью выражений типа (2), (4). Данный элемент характеризуется энергетическим воздействием наружного климата на оболочку блока, энергией, содержащейся в оболочке, внутри объема, во внутреннем оборудовании и т.д., подводимой к блоку в виде первичных и вторичных энергоресурсов.

В общем случае для максимального использования подводимых энергоресурсов источник теплоты помещается в замкнутое пространство. Источник представляет собой излучатель инфракрасного потока энергии.

Ставится задача создать в замкнутом объеме определенный климатический фон. При этом силы и потоки должны распределяться в пространстве и во времени функционально заданным образом.

Основные элементы и потоки энергии в установке показаны на рис. 2. Излучатель заданной мощности располагается в устье воздуховодной трубы 3 и создает поток излучения  $q_{изл1}$ , направленный на изогнутую определенным образом пластину 5. Она раскаляется и в зависимости от степени черноты поверхности переизлучает поток  $q_{изл2}$  в окружающее пространство и отдает в окружающую среду поток конвективной энергии. Этот поток может быть захвачен устьем трубы 3, а может рассеяться в объеме.

Таким образом, около этой пластины организуется производство потоков переизлучения  $q_{изл3}$  вынужденной или естественной конвекции  $q_{конв2}$ .

Здесь мы имеем два потребителя теплоты в виде пластин и одного в виде окружающей их среды, находящейся в оболочке системы.

Потоки теплоты не только создаются за счет конечной разности температур и скоростей, но и зависят от свойств материалов, конструктивных характерных размеров всей системы «источник теплоты — потребители».

В связи с указанной постановкой задачи (4) для создания методики расчета вышеуказанной системы были рассмотрены вопросы экспериментально-расчетного определения основных параметров каждого из элементов этой системы, таких, как излучатель, воздуховод, лучевод-концентратор лучистой энергии, изогнутые под разными углами и вертикальные пластины.

Функциональное уравнение для расчета потока теплоты, достигающей потребителя, имеет вид

$$Q_{F_n df} = f(F_n, T_n, C_n, \Phi_{F_n df}), \quad (5)$$

где  $F_n$  — площадь излучателя;  $T_n$  — температура излучающей поверхности;  $C_n$  — коэффициент излучения поверхности;  $\Phi_{F_n df}$  — угловой коэффициент облученности.

Расчёт поверхностной плотности энергии можно установить аналитически на основании законов лучистого теплообмена. При этом вопрос их определения в системах и установках лучистого обогрева связан с расчётом угловых коэффициентов облученности [2, 10].

Сложность определения последних обусловлена тем, что излучатели расположены на разном расстоянии от облучаемых поверхностей, а число излучателей и потребителей, участвующих в теплообмене, может быть различным.

В общем случае поверхностная плотность облучения от излучателя на поверхность  $df$  выражается зависимостью (5).

Угловой коэффициент облученности зависит от взаимного расположения поверхностей облучения  $F_n$  и  $df$ , от расстояния между ними  $S$  и угла наклона излучателя  $\gamma$  по отношению к облучаемой поверхности:

$$\Phi_{F_n df} = f(F, df, \gamma, S). \quad (6)$$

Радиационное взаимодействие излучателя с любой поверхностью в общем случае можно рассматривать как взаимодействие между серыми телами, разделёнными прозрачной средой.

Чтобы реализовать выражение (5), требуется найти температуры излучающей и принимающей поверхностей. Чтобы знать эти температуры, надо иметь представление о соотношении потоков лучистой и конвективной составляющих источника и приемника излучения.

Покажем возможности экспериментального получения недостающих для исследований данных. Пусть излучатель небольшой мощности и размеров помещен в замкнутое пространство. Параметры излучателя выбраны из условий возможности построения лабораторной установки в небольшом помещении. Экспериментальная установка показана на рис. 3. На рис. 4 изображена ее схема. Описание схемы следующие. Газовый инфракрасный излучатель 5 работает на пропане. Расход газа и



Рис. 3. Экспериментальный стенд

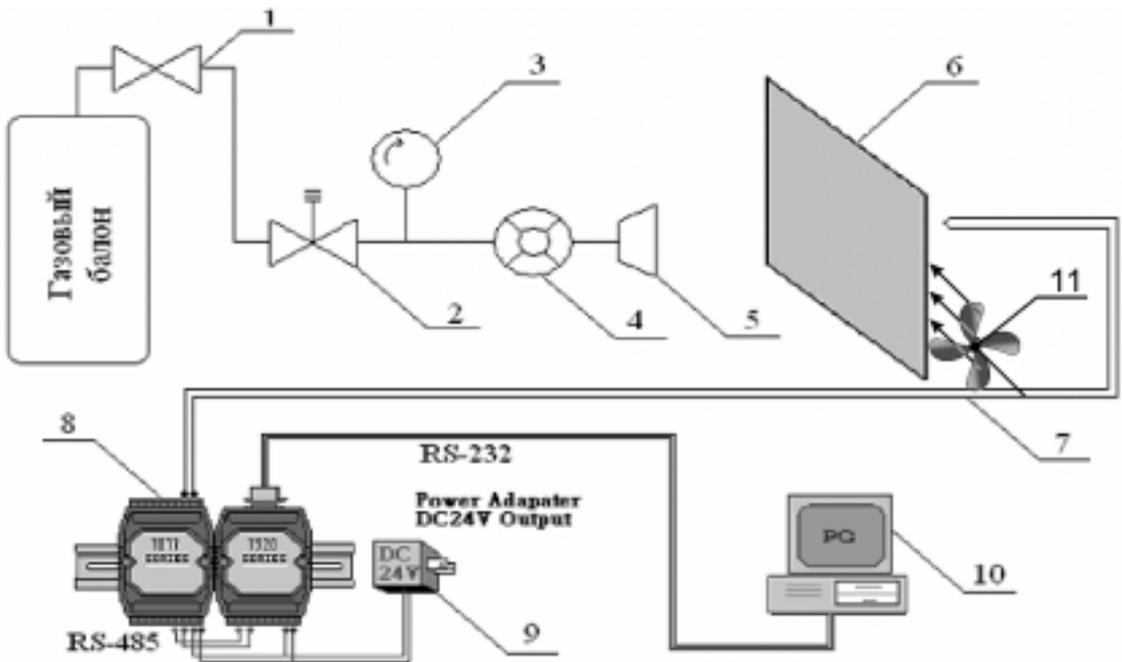


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — вентиль; 2 — регулятор давления; 3 — манометр; 4 — газовый счётчик СГК-4; 5 — газовый инфракрасный излучатель; 6 — теплоотдающая поверхность — металлический лист; 7 — термопара (ХА); 8 — блок АЦП; 9 — блок питания; 10 — компьютер; 11 — вентилятор

заданное давление контролируются регулятором давления 2. Для измерения температуры на поверхности металлического листа припаяны хромель-алюмелевые спаи термопар 7, подключённые к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) 8. Блок АЦП посредством кабеля RS 232 соединён с персональным компьютером 10, по монитору которого в режиме реального времени можно следить за изменением температуры. Программа по визуализации процессов нагрева или охлаждения позволяет записывать данные эксперимента в файл; 11 — вентилятор, создающий вынужденную конвекцию теплоотдачи от пластины.

Обработка результатов экспериментальных исследований показала, что теплота, которая получена при сгорании определенного количества топливного газа, равна энергии, которая выделилась при излучении и конвекции. График баланса энергии излучателя показан на рис. 5.

Из графика следует, что КПД устройства по инфракрасному излучению составляет порядка 45% при вертикальном расположении излучателя и 35% при горизонтальном. Поэтому поворачивать излучатель нерационально, поскольку в этом случае КПД по излучению снижается в полтора-два раза. Более разумно воспользоваться различными отра-

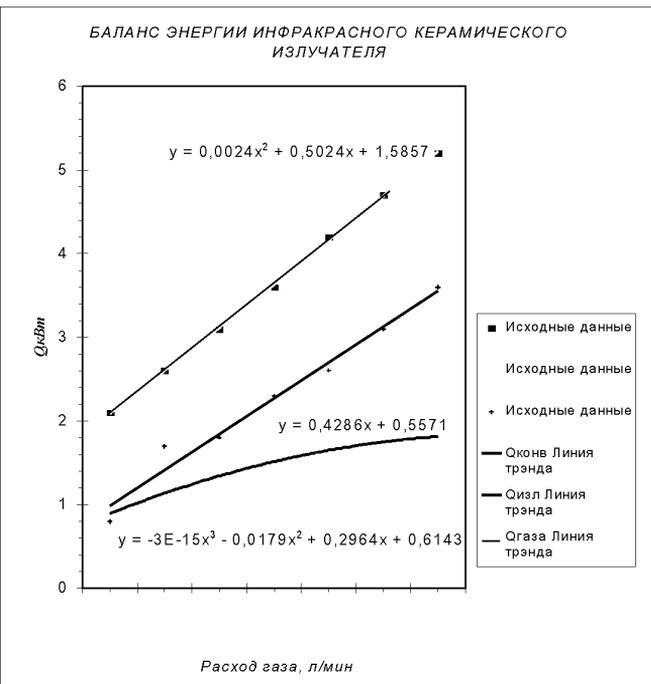


Рис. 5. Баланс конвективных и лучистых потоков

жателями, которыми можно перераспределить тепловые потоки в необходимом направлении. Функция потока теплоты для изогнутой пластины 5 (рис. 2) показана на рис. 6. Она имеет сложный вид и может быть использована при реализации формулы (5).

Результаты опытов по транспорту лучистой энергии по трубопроводу с зеркальной поверхностью представлены на рис. 7.

Особенностью луча, выходящего из трубы, является его малая расходимость. Так, например, при

изменении расстояния от конца трубы в пять раз (от 10 до 50 см) интенсивность луча снижается не в 25 раз, как от точечного источника, а всего в несколько раз. Диаметр луча при этом увеличивается лишь вдвое.

Другая особенность луча, выходящего из трубы, состоит в том, что плотность излучения у конца трубы получается в 2–3 раза выше, чем в той же точке в случае отсутствия трубы. Если входное сечение концентратора (максимальное) составляет примерно 4 дм<sup>2</sup>, то при изменении выходного сечения от 2,5 до 0,25 дм<sup>2</sup> увеличение плотности излучения (отношение плотности на выходе к плотности на входе) получается от двух до пяти-шести раз.

Поскольку климатические условия создаются не только за счет лучистых потоковых составляющих источника теплоты, но и за счет конвективной составляющей потребителя лучистой энергии, то рассмотрим некоторые представления о сопряженной термогидравлической системе, которая получила энергию от горячего источника. В соответствии с формулой (4) покажем возможности микро- и макроуровневой энтропийной обработки выражений типа (1) и (2). Элемент термогидравлической системы в виде 4-слойной балансовой энтропийной модели представлен на рис. 8.

Теплопередача через металлическую стенку от горячего к холодному источнику осуществляется в условиях нестационарной задачи. Модель состоит из нагреваемой горячим источником металлической стенки (I) и получающих теплоту путем вынужденной конвекции вязкого подслоя (II), переходной зоны (III) и турбулентного ядра (IV). Энтропийный

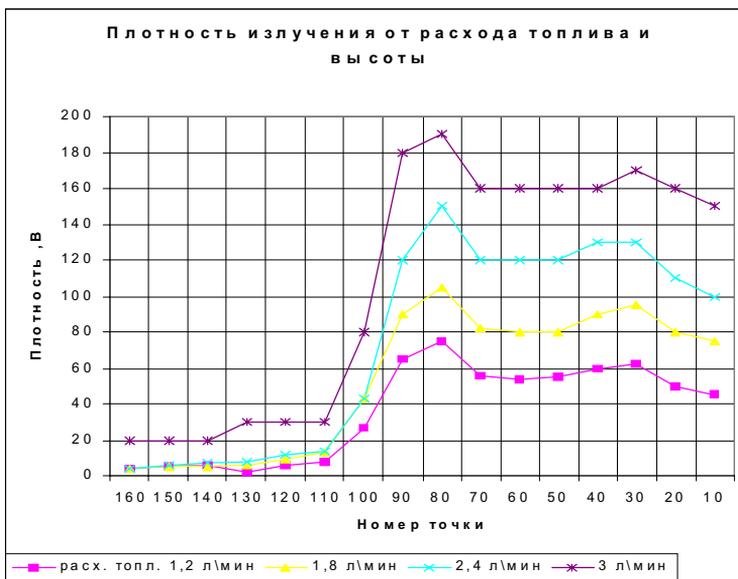


Рис. 6. Функция потока теплоты для изогнутой пластины

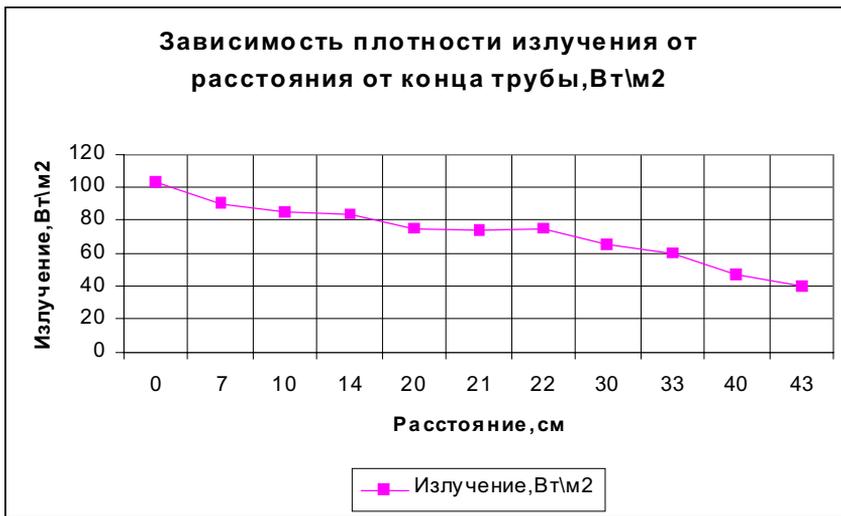


Рис. 7. Транспорт потоков энергии по лучеводам

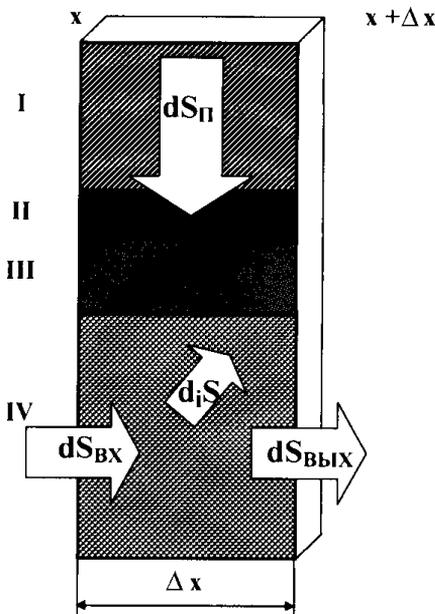


Рис. 8. Четырехслойная энтропийная модель элемента

конечноразностный элемент предусматривает наличие потоков тепловой и гидравлической энергии в условиях плоской задачи. Здесь  $\Delta x$  — шаг вдоль плоского сечения;  $dS_{ВХ}$ ,  $dS_{ВЫХ}$  — энтропия на входе и выходе энтропийного элемента сопряженной системы, рассматриваемой при граничных условиях четвертого рода на границах ее слоев;  $d_i S$  — энтропия, возникающая в системе за счёт диссипации энергии в гидравлической системе;  $dS_{П}$  — энтропия, поступающая через твёрдое тело-стенку к движущемуся теплоносителю.

Для программной конечноразностной реализации показан алгоритм на рис. 9.

Функции температурного и энтропийного состояния системы показаны на рис. 10, 11.

Волны на поверхностях температур объясняются неравномерностью коэффициентов теплоотдачи по горячей стороне теплообменного устройства.

Получение пространственных функций обобщенной энтропии, термодинамических потоков и сил позволяет найти зависимости между функцией состояния системы и ее параметрами. Подставив выражения для потоков, сил и коэффициентов, их связывающих, для термической и гидравлической подсистем (рис. 9) в выражение для энтропии (4), получим функцию изменения энтропии от потоков и сил и кинетических свойств сопряженной теплообменной системы:

$$dS(\tau) = \frac{\tau \text{grad} T}{T} \times \left[ (0,5 \cdot 10^{-4} (T + 273) + 0,011) C_p \rho^2 l^2 (\text{grad} \omega_x)^2 \right], \quad (7)$$

где  $\omega_x$  — функция скорости;  $l$  — длина пути перемешивания;  $\rho$  — плотность среды;  $C_p$  — теплоемкость по сечению пограничного слоя.

Проследив изменение функций потоков и сил в координатном и временных пространствах, мы можем говорить об изменении обобщенной функции состояния исследуемой системы. Таким образом, появляется возможность прогнозировать ценностные энергетические свойства и сами потоки и силы как в пространстве, так и во времени.

После интегрирования (7) по поверхности соответствующей подсистемы оказывается возможным найти функции воспроизводства обобщенной (или средней) энтропии для гидравлической и термической подсистем, работающих на переходном во времени режиме (рис. 12 и 13).

Анализируя эту функцию, видим, что максимум воспроизводства энтропии приходится на девятую секунду работы системы, хотя в гидравлической подсистеме максимальное значение наблюдается на нулевой секунде.

Функция текущего накопления энтропии в единицу времени имеет вид

$$k(\tau) = \frac{S(\tau)}{\tau} \quad (8)$$

Ее можно назвать коэффициентом неравновесности системы.

Покажем возможности построения зависимости обобщенной безразмерной энтропии для каждой изучаемой зоны или подсистемы и рассмотрим из-

менение этого критерия в зависимости от изменения геометрических параметров.

Зависимость безразмерной энтропии для разных безразмерных времен как функция состояния от геометрического параметра толщины сопряженной системы приведена на рис. 14. Воспользуемся среднеинтегральными величинами безразмерных полей энтропий и критерием Фурье. ( $F_0$  — безразмерное температуропроводное время.)

График показывает, что среднеинтегральная эпюра обобщенной безразмерной энтропии зависит не от времени, а только от безразмерного геометрического размера системы.

Этот график говорит о том, что существует среднеинтегральное временное обобщенное энер-

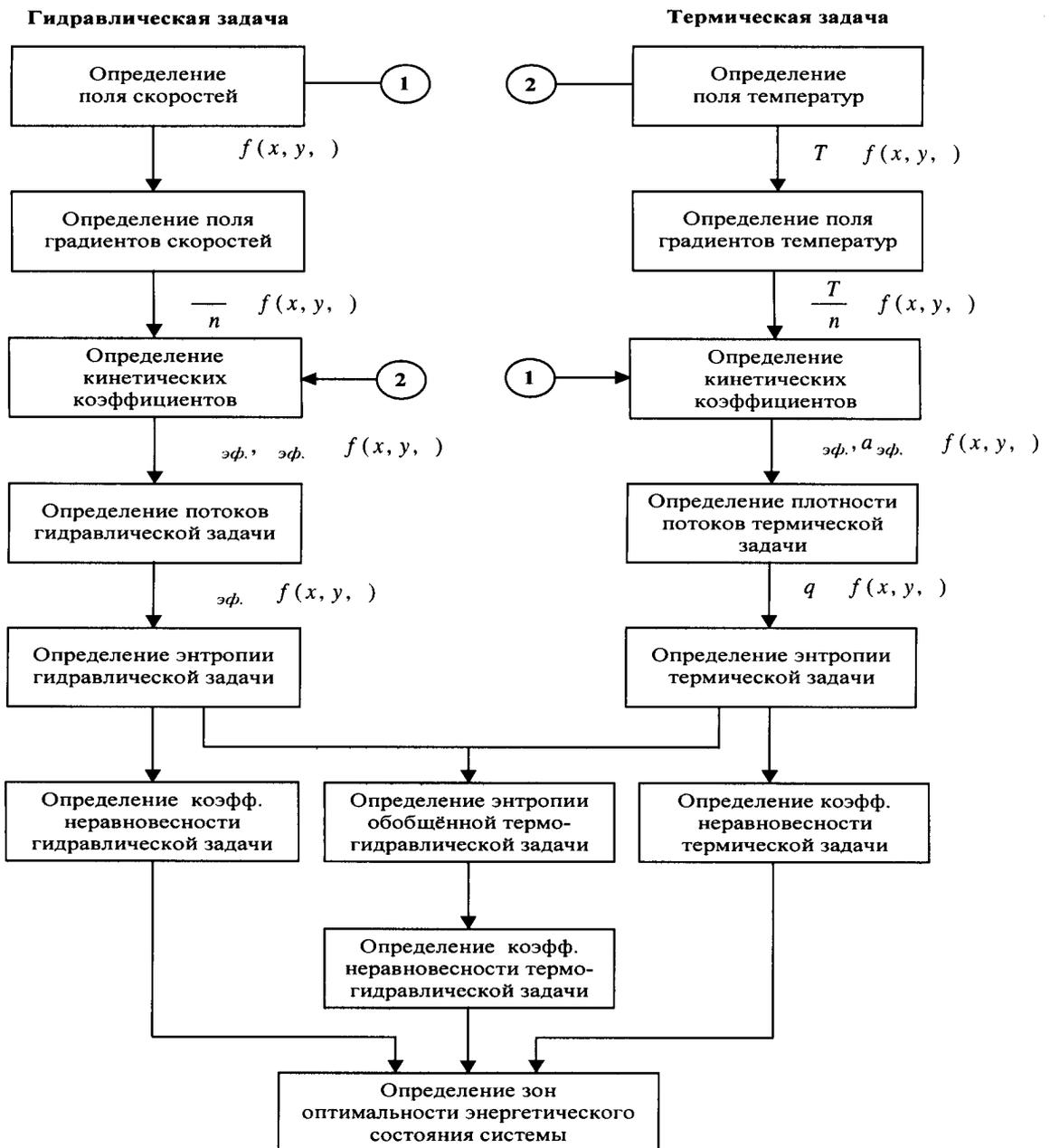
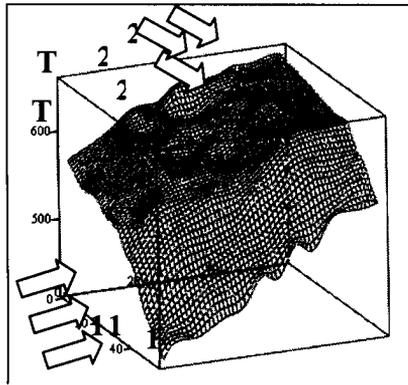


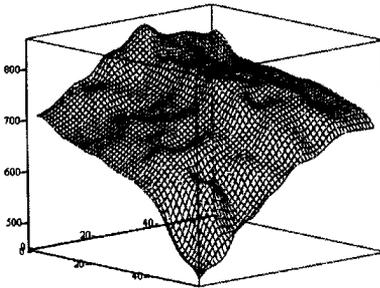
Рис. 9. Алгоритм вычисления энтропии, потоков, сил, свойств

**Исходные данные. Поля температур во временных точках процесса**

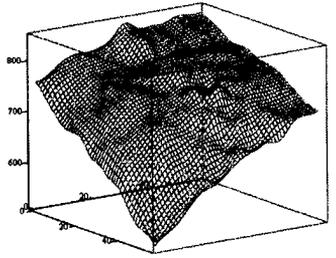
Поле температур  
 $T = f(x, y)|_{\tau=0}$



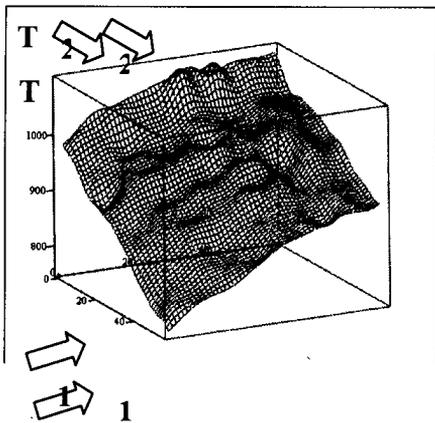
Поле температур  
 $T = f(x, y)|_{\tau=3}$



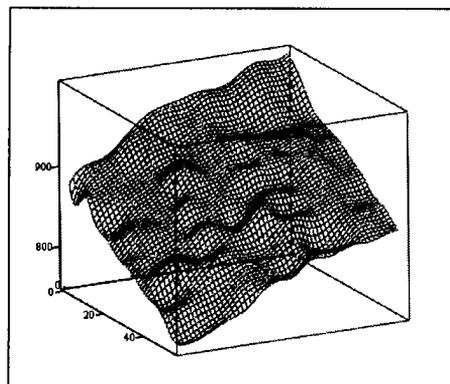
Поле температур  
 $T = f(x, y)|_{\tau=5}$



Поле температур  
 $T = f(x, y)|_{\tau=9}$



Поле температур  
 $T = f(x, y)|_{\tau=14}$



T – температура, °C

Стрелками показаны:

- 1 – направление движения теплоносителя;
- 2 – стенка канала теплообменного устройства.

Рис. 10. Функции полей температур на каждом из режимов работы сопряженной системы

гетическое состояние энтропийной системы или энергоэнтропийный образ системы в пространстве геометрических ограничений.

После получения среднеинтегрального энтропийного состояния системы имеется возможность получить связи между функцией состояния, потоками, силами в безразмерном виде и по известному энтропийному состоянию системы или её подсистем прогнозировать потоки механической и тепловой энергии, термодинамические силы, термодинамические свойства в каждой точке её пространства состояния.

Представим обобщённые (безразмерные) параметры системы в виде следующих матриц коэффициентов:

— кинетических коэффициентов гидравлической и термической частей сопряжённой системы

$$K_K = \begin{pmatrix} K_{KT} \\ K_{KG} \end{pmatrix}; \quad (9)$$

— эффективной теплопроводности

$$K_{KT} = \lambda_{\text{эф}}; \quad (10)$$

— эффективной динамической вязкости

$$K_{KG} = \mu_{\text{эф}}; \quad (11)$$

— термодинамических сил

$$K_C = \begin{pmatrix} K_{CT} \\ K_{CG} \end{pmatrix}; \quad (12)$$

— градиентов температуры

$$K_{CT} = \text{grad} T; \quad (13)$$

— градиентов скорости

$$K_{CG} = \text{grad} v; \quad (14)$$

**Поля энтропии во временных точках процесса**

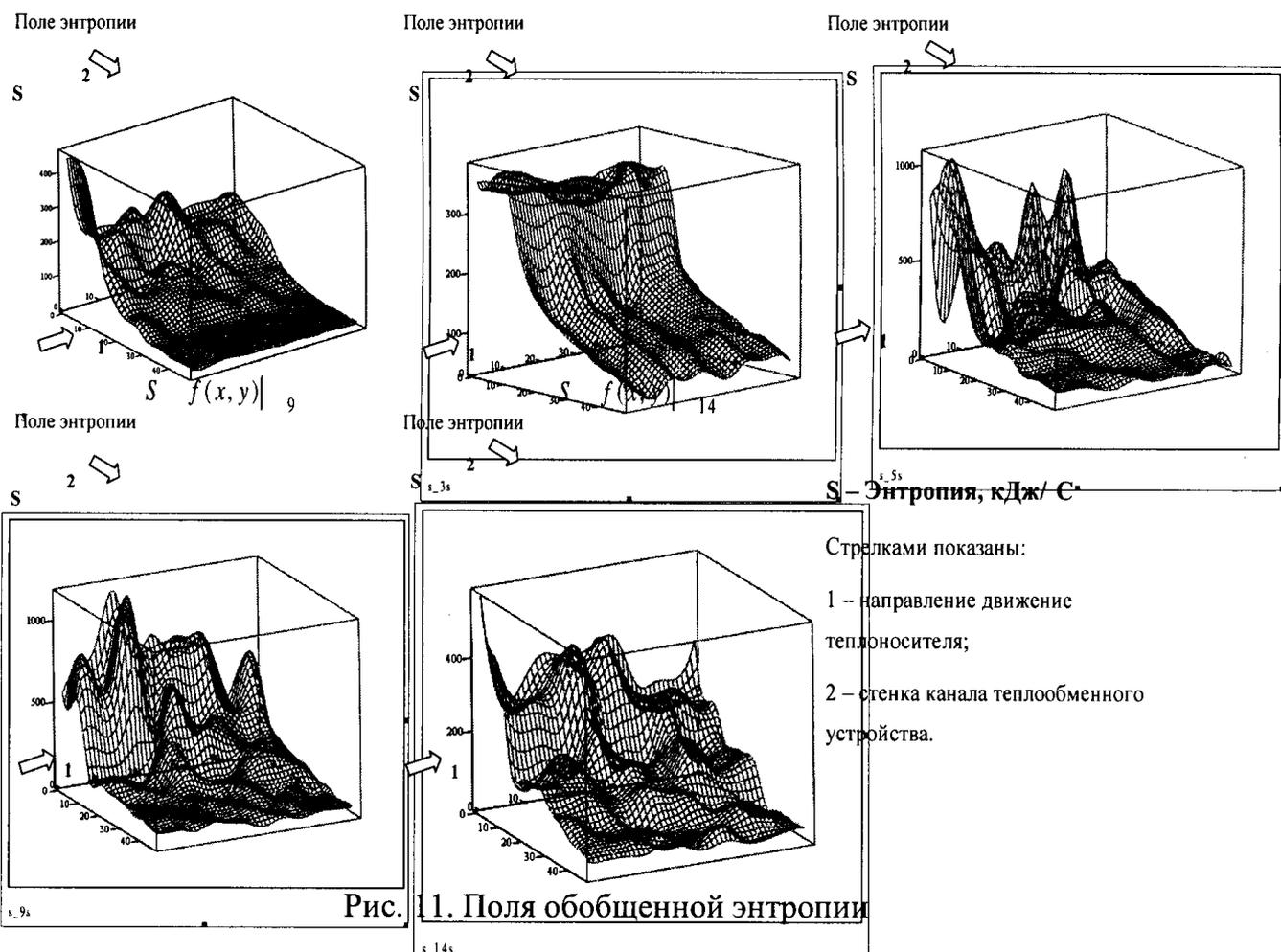
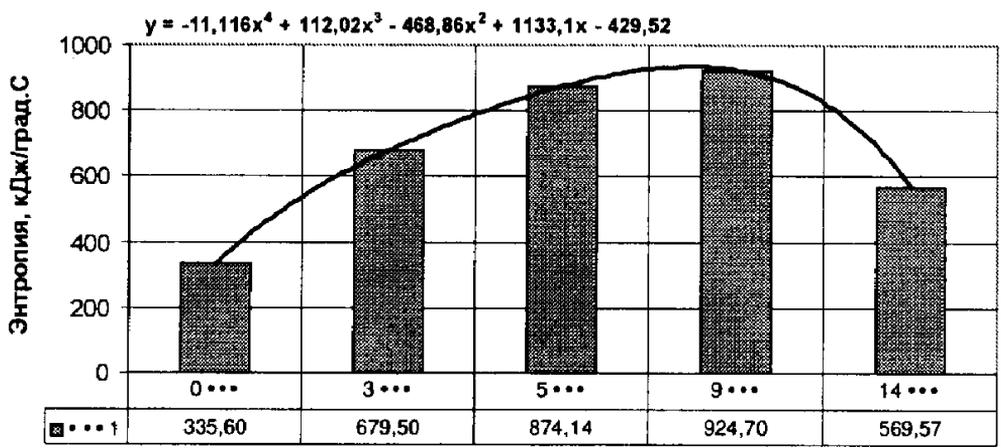


Рис. 11. Поля обобщенной энтропии

**Функция воспроизводства энтропии термической подсистемы.**

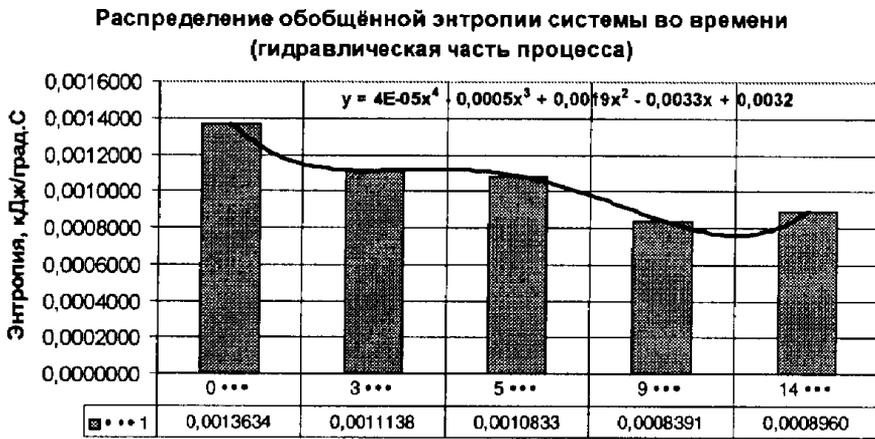
Распределение обобщенной энтропии системы во времени



$S() = -11,116^4 + 112,02^3 - 468,86^2 + 1133,1 - 429,52$

Рис. 12. Динамика макроуровневого воспроизводства

### Функция воспроизводства энтропии гидравлической подсистемы.



$$S(\eta) = 0,0004 \eta^4 - 0,0005 \eta^3 + 0,0019 \eta^2 - 0,0033 \eta + 0,0032$$

Рис. 13. Динамика воспроизводства во времени

### Зависимость функции состояния от геометрического параметра по времени в обобщённом безразмерном виде

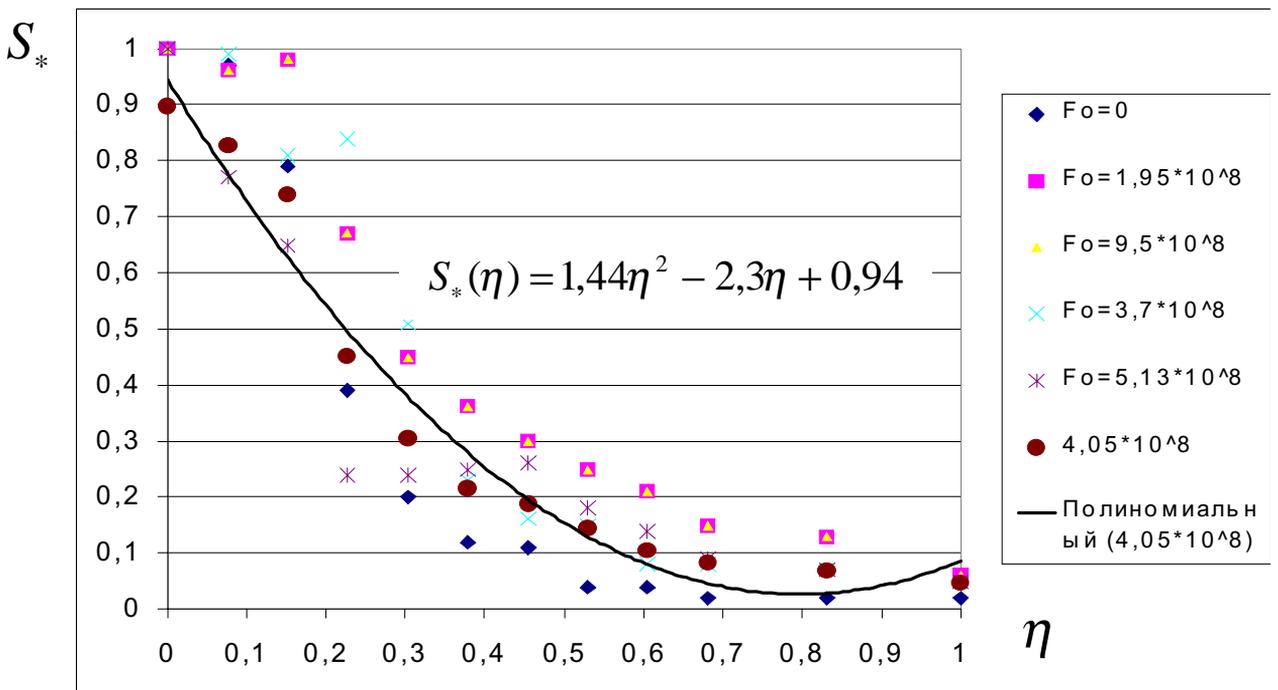


Рис. 14. Получение макроуровневой энтропии  $S_*$  по сечению пограничного слоя. Интегрирование по безразмерному времени

— термодинамических потоков

$$K_{\Pi} = \begin{pmatrix} K_{\Pi T} \\ K_{\Pi \Gamma} \end{pmatrix}; \quad (15)$$

— плотности потоков теплоты

$$K_{\Pi T} = q = \lambda_{\text{эф}} \text{grad} T; \quad (16)$$

— плотности потоков механической энергии

$$K_{\Pi \Gamma} = \tau_{\text{эф}}; \quad (17)$$

— безразмерных геометрических параметров

$$K_{\text{геом}} \cdot \quad (18)$$

Функциональное уравнение воспроизводства безразмерной энтропии для сопряжённой термодинамической системы в обобщённых (безразмерных) переменных через «потоки и силы» имеет вид

$$S_* = f(K_K, K_C, K_{\Pi}, K_{\text{ГЕОМ}}), \quad (19)$$

где  $S_*$  — воспроизводство безразмерной энтропии;  $K_K, K_C, K_{\Pi}, K_{\text{ГЕОМ}}$  — матрицы коэффициентов, сил, потоков и геометрических параметров. Область определения функции состояния системы через параметры ее коэффициентов имеет вид :

$$K_{\text{МИН}} \leq K_{\text{ТЕК}} \leq K_{\text{МАКС}}. \quad (20)$$

Это выражение аналогично выражению (4) и может учитывать полученные расчетные и экспериментальные термодинамические данные.

В заключение покажем полученные расчетным путем связи между функцией состояния системы и ее параметрами в виде термодинамических сил, потоков, и свойств. Графическое отображение функциональных уравнений (4) и (19) иллюстрируется графически на рис. 15–17.

Если за ось абсцисс взять безразмерную энтропию, а по оси ординат расположить оси коэффициентов, то по заданному значению любого параметра (например, геометрического) можно определять коэффициенты, силы и потоки и функцию энергетического состояния в системе «металл —

движущиеся теплоносители» для любого состояния элемента данной теплоэнергетической системы.

### Выводы

1. Использование трехуровневого иерархического представления моделируемой энергетической системы позволяет алгоритмически сформулировать для анализа, проектирования и эксплуатации ПТЭС задачу минимального приращения функции состояния системы и ее энтропии во времени.

2. Наряду с исследованием климатического лучисто-конвективного элемента с максимальным использованием вносимой извне энергии топлива, рассматриваются возможности анализа системы с помощью экспериментальных и расчетных моделей.

3. Последовательно рассмотрены свойства и параметры преобразователей энергии топлива в лучистую энергию и лучистой энергии в тепловую.

4. Для генератора лучистой энергии установлен баланс лучистых и конвективных потоков.

5. Для трансформаторов энергии в виде пластин различной конфигурации получены функциональные зависимости, связывающие их геометрические характеристики с пространственным распределением предполагаемой плотности лучистого потока.

6. Показаны методологические особенности реализации процедуры численного эксперимента в условиях четырехслойной энтропийной модели, сформулированной в сопряженной контактной по-

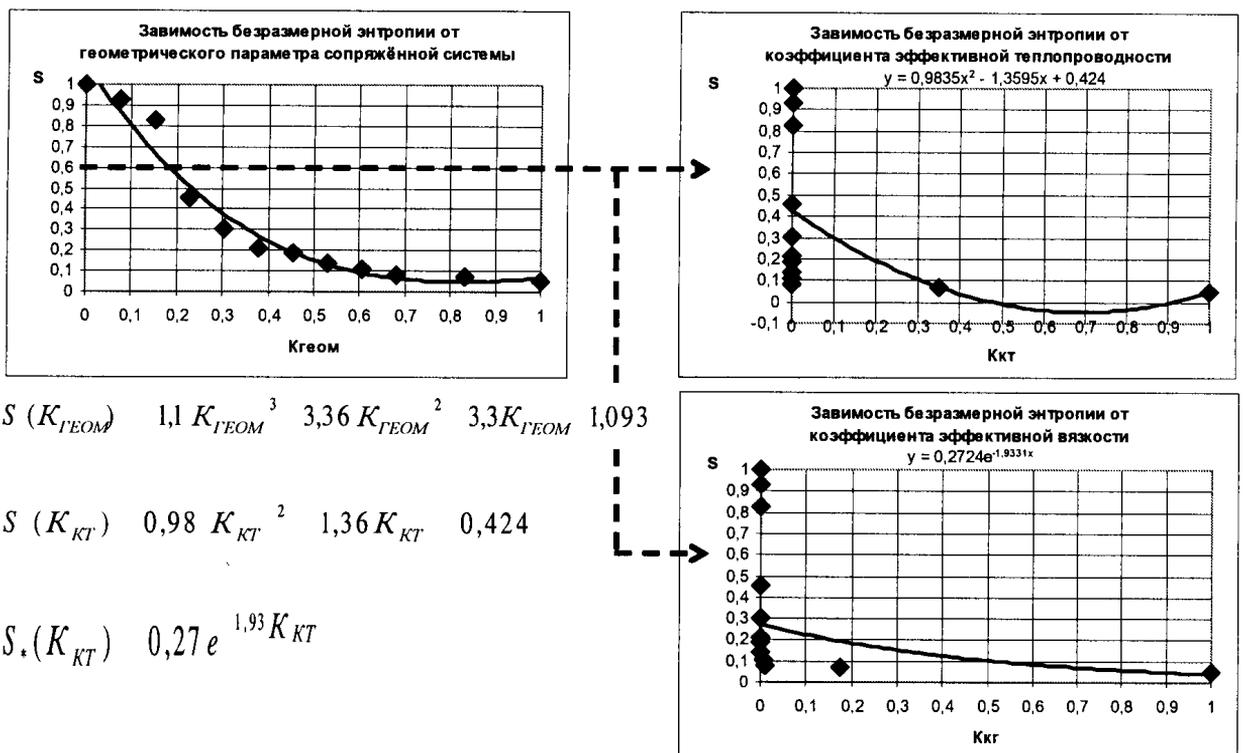


Рис. 15. Энтропия и кинетические коэффициенты

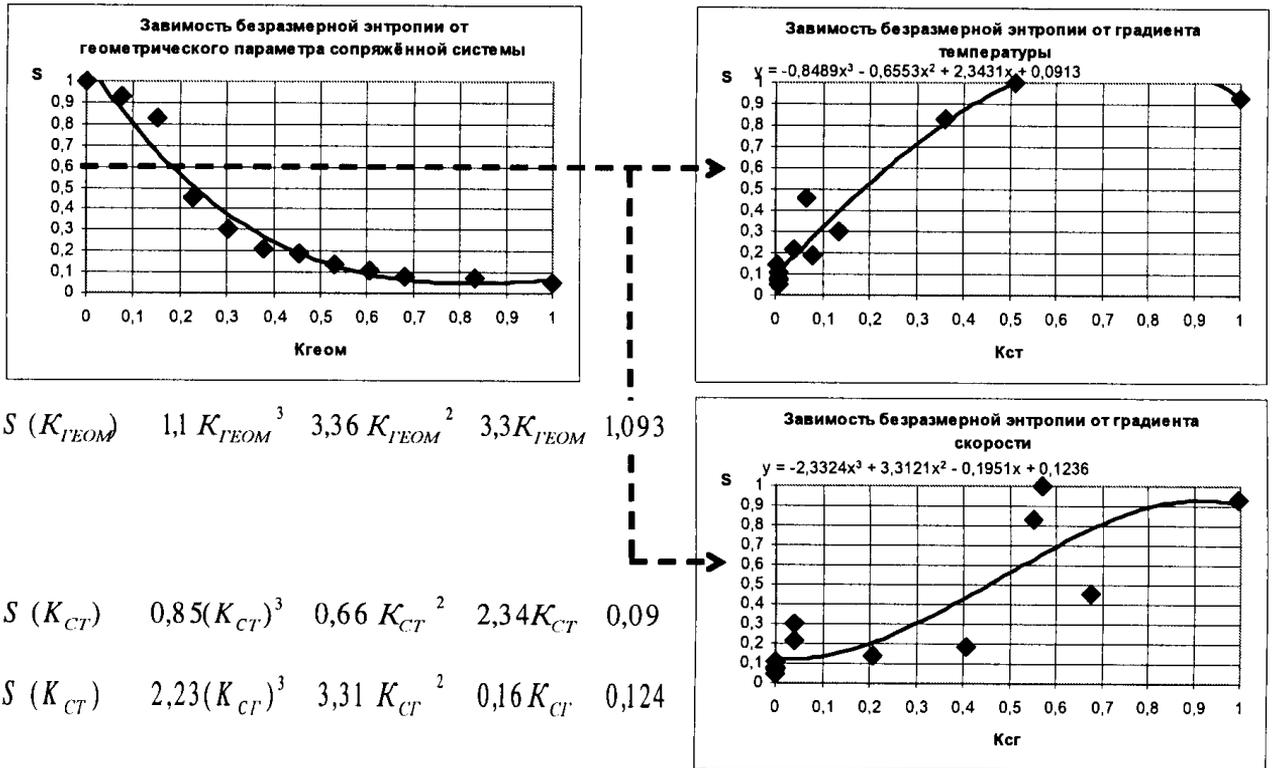


Рис. 16. Энтропия и термодинамические силы

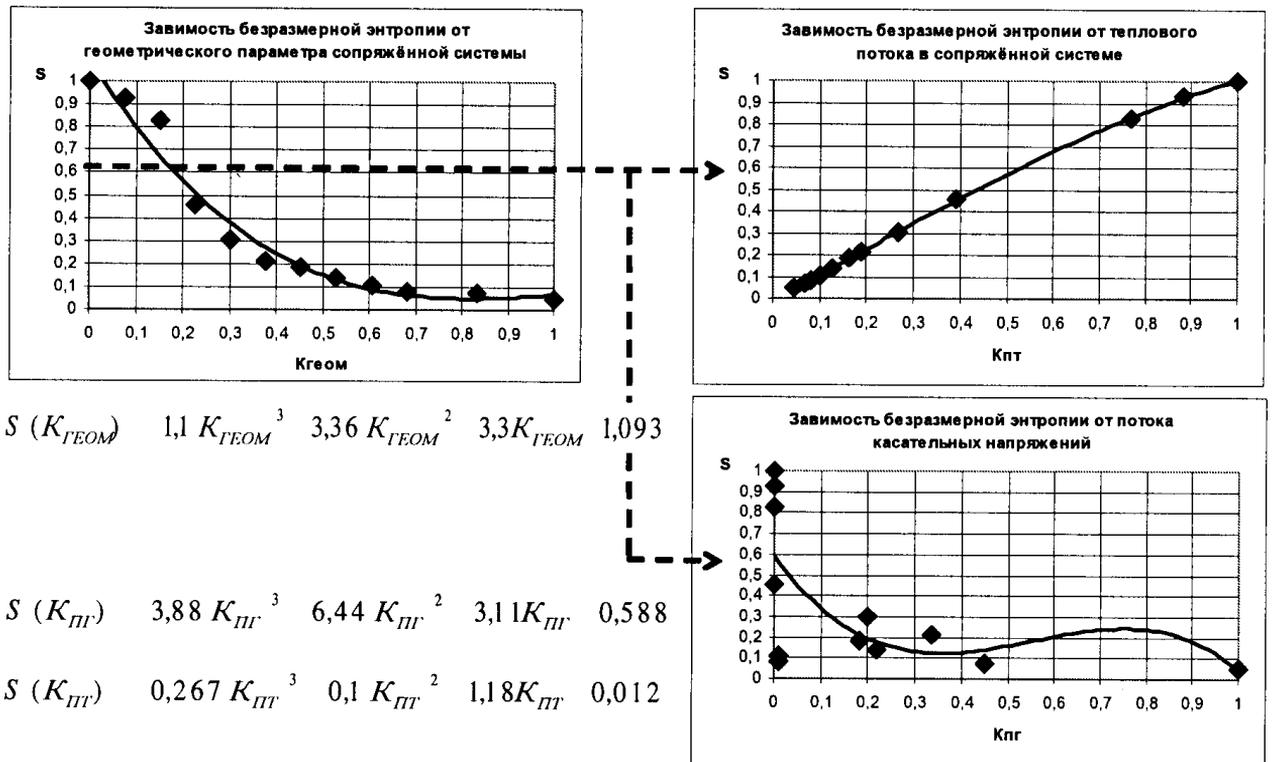


Рис. 17. Энтропия и термодинамические потоки

станковке для термогидравлического элемента в виде пластины через поверхность, в которой идет процесс теплопередачи от горячего источника теплоты к холодному.

7. В результате моделирования получены микроуровневые и макроуровневые энтропийные функциональные представления, позволяющие связать процессы воспроизводства энтропии в системе с ее

геометрическими, силовыми и качественными характеристиками.

### Summary

A locally modular arrangement of radiative-convective energy exchange is analyzed for a part of industrial heat-and-power system. Each part of the system is interpreted as a energy converter. The parts are described basing on functional relationships between system parameters and system entropy using the «flows and forces» concept. A model for integrated heat-and-power system can be constructed in the form of interconnected system parts. It is suggested to use three-level hierarchical representation of the system analyzed in the paper including micro-level, macro-level and meta-level.

### Библиографический список

1. *Prigogine, I.* Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes, Charles C. Thomas, Springfield, Ill., 1955; русский перевод: Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов, ИЛ, 1960.
2. *Адрианов В.Н.* Основы радиационного и сложного теплообмена. — М.: Энергия, 1972.
3. *Андреев Ю.П., Бурд С.А.* Красный и инфракрасный излучатели с повышенным выходом для оксиметрии // Медицинская техника. 1992. №5. С. 21—25.
4. *Дьярматти И.* Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы/ И. Дьярмати. — М.: Мир, 1974.
5. *Игонин В.И.* Пути повышения эффективности теплоэнергетических систем: Монография. — Вологда: ВоГТУ, 2007.
6. *Игонин В.И.* Некоторые особенности методологического конструирования моделей ресурсопереноса в промышленных системах // Вестник ВоГТУ. 2001. №2 . С.18-20.
7. *Ковалева Т.М.* Разработка методики построения энтропийной модели гидротермодинамической промышленной теплоэнергетической системы: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. — Вологда, 2004.
8. *Коваленко А.Н.* Теплофизические возможности повышения эффективности энергетических установок. — СПб.: ОЭЭП РАН, 2003.

9. *Лыков А.В.* Теория тепло- и массопереноса/ А.В.Лыков, Ю.А.Михайлов. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.

10. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением / Пер. с английского под ред. В.Н. Хрусталева. — М.: Мир, 1975.

11. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Т.1. — М.: Наука, 1976.

12. *Титов Д.В.* Моделирование объекта ПТЭС на макроуровне / Титов Д.В., Игонин В.И, Ковалева Т.М., Кондратьева С.А. // Материалы Второй общероссийской научно-технической конференции «Вузовская — наука региону». Вологда: ВоГТУ, 2004. С. 457-460.

13. *Чучин В.Н. Игонин В.И., Воронин А.Н., Клепиковский А.В., Григоруца Ю.А.* Вопросы энергосбережения при использовании систем инфракрасного отопления в промышленных энергетических системах // Энергетика, экология, экономика средних и малых городов. Проблемы и пути их решения. Вторая всероссийская научно-практическая конференция. Великий Устюг. М., 2003. С. 25—30.

Московский авиационный институт

Статья поступила в редакцию 15.12.2007