

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЕМ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ФИЗИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть 2. Принципы, связанные с максимальной мощностью. Синтез функциональных операторов ФТС

Введение

Основные концепции рационального использования материальных и энергетических ресурсов базируются на системном анализе проблемы. При этом именно системный анализ позволяет сформулировать основные стратегические принципы и определить тактические приёмы реализации этого направления на основе принципов устойчивого развития сложных технических систем.

В первой части статьи рассмотрены особенности решения задач энергосбережения на трех стадиях жизненного цикла ФТС с помощью топологоэнергетического подхода. Сформулированы понятия эффективности топологоэнергетического описания и параметрической эффективности ФТС. Решение задачи управляемости ФТС с точки зрения энергоресурсосбережения требует предварительной формулировки основных принципов управления термодинамическими процессами, используя особый подход к смыслу времени для них. Рассмотрены термодинамические принципы управления системами – принципы упрощения проблемы (0-2 принципа) и принципы, связанные с минимальным производством энтропии (3-6 принципы).

Особый теоретический и практический интерес представляют термодинамические принципы управления системами, связанные с максимальной мощностью.

При разработке теоретических основ энергоресурсосбережения не решены задачи синтеза функциональных операторов ФТС.

Постановка задачи. Целью работы является: 1) формулирование термодинамических принципов управления ФТС, связанных с максимальной мощностью; 2) рассмотрение особенностей синтеза функциональных операторов ФТС.

Методика исследований.

Принципы, связанные с максимальной мощностью.

Существует много результатов, характеризующих управление тепловым двигателем для получения максимальной мощности [1]. Так как эти результаты касаются извлечения работы так быстро, как возможно, то они входят в иное направление, нежели асимптотический подход предыдущего раздела. Эти результаты необходимы только для предположения того, что рассматриваемые процессы являются достаточно медленными и переменные остаются хорошо определёнными. Однако всеобщность этих результатов ограничена потребностью в дополнительном предположении относительно теплового взаимодействия между рабочим потоком и средой. В случае линейного теплообмена, в котором тепловой поток пропорционален разности температур, было получено множество простых и полезных результатов. Два результата, рассмотренные ниже, отобраны из-за простоты и устойчивости.

Принцип 7 (А.Вежан [2]).

Максимальная мощность, которая может быть произведена тепловым двигателем, связанным со средой через постоянный проводник теплоты, является половиной обратимой мощности, то есть, половиной работы, соответствующей квазистатической траектории, пройденной рабочим потоком, деленной на время цикла.

Эта сильная теорема очень проста в использовании и нашла свое применение в таких разнообразных примерах как термоакустические двигатели [3]. Ее точная обобщенность неизвестна, но выходит за пределы линейного режима теплопроводности, для чего она, собственно, и была выведена.

Принцип 8 (F.L. Curzon, B. Ahlborn [4]).

Эффективность η_{MaxP} при максимальной мощности теплового двигателя, соединенного со средой через постоянный проводник теплоты, определяется зависимостью:

$$\eta_{MaxP} = 1 - \sqrt{\frac{T_{cold}}{T_{hot}}}, \quad (1)$$

где T_{cold} - абсолютная температура отходящего потока теплоты;

T_{hot} - абсолютная температура подведенного потока теплоты.

Поразительная простота этого уравнения, так же как и подобная ему хорошо известная эффективность Карно, принесла ему скорое признание. К сожалению, это часто неверно истолковывается; η_{MaxP} не означает максимальную эффективность. Фактически, общее доказательство дано в работе [4] относительно экономического оптимума, являющегося компромиссом между стратегиями *напрячь-все-силы* и *экономить-на-завтра*. Мы же всегда хотим действовать при эффективностях, больших чем η_{MaxP} . Например, R. Kosloff [18] показал, что η_{MaxP} данное в уравнении (5), справедливо даже для квантового механического двигателя, состоящего из трехуровневой системы, связанной излучением с двумя тепловыми ваннами, и производящего работу в виде лазерного источника света.

Разработанный нами термодинамический принцип 9 управления энергоресурсосбережением базируется на сформулированном ранее *ТД* - критерии [7,8]:

$$ТД = \epsilon - (\Phi + \Psi), \quad (2)$$

где $\epsilon \equiv ОЭД\Phi \equiv \sum_{i=1}^N f_i \cdot e_i$ - обобщенная эксергодиссипативная функция (*ОЭДФ*),

характеризующая производство потерь эксергии;

Φ и Ψ - обобщенные модифицированные функции рассеяния Рэлея:

$$\Phi \equiv \Phi(f, f) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N R_{ik} \cdot f_i \cdot f_k \geq 0, \quad (3)$$

$$\Psi \equiv \Psi(e, e) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N L_{ik} \cdot e_i \cdot e_k \geq 0, \quad (4)$$

где e_i - i -ое обобщенное эксергетическое усилие (удельная эксергия);

f_i - i -й массовый расход;

L_{ik} - коэффициент проводимости;

R_{ik} - коэффициент сопротивления.

ТД - критерий (2) показывает отклонение реального производства потерь эксергии от суммы обобщенных модифицированных функций рассеяния Рэлея (3) и (4).

Получим аналитическое выражение принципа локального экстремума из обобщенной модифицированной функции Дьярмати [6]. Этот принцип отражает наименьшее рассеяние эксергии в локальной форме, т.е. термодинамический принцип управления энергоресурсосбережением.

Представим этот принцип, варьируя (2), по потокам:

$$\{\epsilon(f, e) - \Phi(f, f)\}_e = \max, \quad (5)$$

где f - обобщенный поток;

e - обобщенное эксергетическое усилие.

В результате варьирования и получим:

$$\delta\left\{E(e_i, f_i) - \Phi(f_i, f_k)\right\}_e = \delta\left(\sum_{i=1}^m e_i f_i - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i,k=1}^N R_{ik} \cdot f_i \cdot f_k\right)_e = 0, \quad (6)$$

Далее (6) представим так:

$$\begin{aligned} \delta\left(\sum_{i=1}^m e_i f_i - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i,k=1}^N R_{ik} \cdot f_i \cdot f_k\right)_e &= \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{\partial(e_i \cdot f_i)_{e_i}}{\partial f_k} - \frac{\partial[\Phi(f_i, f_k)]}{\partial f_k} \right\} = \\ &= \sum_{k=1}^m \left(f_k - \frac{\partial \Phi}{\partial f_k} \right) \cdot \delta f_k = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Равенство нулю вариации является необходимым условием экстремума, так как потенциал рассеяния Φ по (3) является положительно определенной функцией, поэтому экстремум может быть только максимумом:

$$(E - \Phi)_e = \max. \quad (8)$$

Если варьировать (2) по эксергетическим усилиям, получим, что

$$\delta(E - \Phi)_f = \sum_{k=1}^m \left(f_k - \frac{\partial \Psi}{\partial e_k} \right) \cdot \delta e_k = 0, \quad (9)$$

или

$$(E - \Psi)_f = \max, \quad (10)$$

Представим универсальную локальную форму принципа наименьшего рассеяния эксергии.

Если одновременно варьировать (2) по потокам и по эксергетическим усилиям, то после преобразований получим:

$$\delta\{E(f, e) - [\Psi(e, e) + \Phi(f, f)]\} = 0, \quad (11)$$

и

$$E - (\Psi + \Phi)_k = \max, \quad (12)$$

Этот принцип является локальным дифференциальным принципом наименьшего рассеяния эксергии, который должен соблюдаться в каждой точке рассматриваемого пространства изменения состояния системы.

Если проанализировать справедливость этого принципа для всего рассматриваемого континуума, то в модифицированной форме интегральный принцип Дьярмати имеет вид:

$$\int_V [(E - \Psi + \Phi) - E] dV = \min, \quad (13)$$

Этот принцип объединяет принцип наименьшего рассеяния эксергии и принцип наименьшего производства потерь эксергии.

Синтез функциональных операторов ФТС

В пределах рассматриваемой ФТС происходят физико-химические превращения, сопровождающиеся изменением технологических и теплофизических параметров, а также характеристик потоков энергии, подводимых к ФТС при ее взаимодействии с окружающей средой и затрачиваемых на реализацию процесса.

Для описания реальных физико-химических превращений в ФТС применяют понятие технологического оператора T , который формализует отображение пространства переменных входа в пространство переменных выхода:

$$Y = T(u), \quad (14)$$

где Y - вектор выходных переменных ФТС;

u - вектор входных переменных ФТС.

Так как реальные процессы в ФТС взаимосвязаны, то оператор T характеризуется сложной структурой, которая в свою очередь обусловлена суперпозицией ряда «элементарных» технологических операторов: диффузионного, конвективного и турбулентного переноса вещества и тепла; химического и фазового превращения и т.п.

Реальному отображению (14) соответствует математическая модель в форме

функціонального оператора Φ , представляючого функціональне простір входних змінних u і простір змінних стану самої ФТС x в простір оцінок вихідних змінних y :

$$y = \Phi(u, x), \quad (15)$$

де Φ – функціональний оператор ФТС,
 x – вектор змінних стану ФТС,
 y – вектор вихідних станів ФТС, визначається по моделі.

В явній формі оператор, здійснює відображення (15), представляє замкнуту систему диференціальних, інтегральних, інтегро-диференціальних рівнянь і співвідношень емпіричного характеру, доповнену необхідними початковими і граничними умовами.

В подальшому під синтезом функціонального оператора ФТС буде розумітися побудова згаданої системи рівнянь спільно з доповнювальними умовами. Для аналізу функціонування ФТС недостатньо отримати в формі вказаної системи рівнянь розгорнуту форму функціональних операторів всіх фізико-хімічних систем, входять в фізико-технологічну систему. Попередньо необхідно виконати ідентифікацію цих операторів (т.е. визначити їх параметри шляхом розв'язання обернутих завдань), а потім звести математичні описи в явній формі зв'язу між u і y – змінними в формі кінцевих співвідношень, т.е. к так званому модулю. Модулем ФТС, характеризується функціональним оператором Φ , будемо називати рівняння в кінцевій формі, розв'язане відносно вектора вихідних змінних

$$y = \varphi(u), \quad (16)$$

в якому вектор-функція φ є результатом точного або наближеного розв'язання системи рівнянь, визначає даний функціональний оператор Φ . В загальному випадку функція модуля може бути лінійною і нелінійною, раціональною і ірраціональною, алгебраїчною і трансцендентною або є результатом розв'язання вихідної системи рівнянь. Таким чином, після процедури ідентифікації відображення (16) можна вважати готовим для вивчення властивостей ФТС в робочій області зміни її параметрів; визначення оптимальних конструктивних і режимних параметрів технологічного процесу; синтез оптимального управління системою і т.п. При цьому практика системних досліджень [9-11] показує, що для ефективного розв'язання завдань вищих рівнів ієрархії (наприклад, аналіз і синтез ФТС, оптимізація і управління ФТС, автоматизоване проектування ФТС і т.п.) переважним є модульний принцип представлення інформації, поступової з нижчих рівнів ієрархії ФТС.

Аналогічний підхід можна застосувати і для відображення енергетичних процесів в ФТС. Для опису реальних енергетичних або ексергетичних взаємодій, перетворень в ФТС застосовують поняття енергетичного або ексергетичного оператора Ω , який формалізує відображення простору енергетичних змінних входу в простір змінних виходу

$$\mathcal{E} = \Omega(Z), \quad (17)$$

де \mathcal{E} – вектор вихідних енергетичних або ексергетичних змінних розглядаємої ФТС;

Z – вектор входних енергетичних або ексергетичних змінних розглядаємої ФТС;
 Ω – оператор енергетичних або ексергетичних перетворень системи.

Реальному відображенню (17) відповідає математична модель в формі функціонального енергетичного або ексергетичного оператора A , представляючого функціональне простір входних енергетичних змінних Z в простір оцінок вихідних енергетичних змінних \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = A(Z, W), \quad (18)$$

де \mathcal{E} – вектор вихідних енергетичних або ексергетичних змінних розглядаємої математичної моделі ФТС;

A – функціональний оператор енергетичних або ексергетичних перетворень в ФТС;

Z – вектор входних енергетичних або ексергетичних змінних ФТС;

W – вектор енергетичних або ексергетичних змінних стану ФТС.

Оператор A представляет собой замкнутую систему алгебраических, дифференциальных, интегральных, интегро-дифференциальных уравнений и эмпирическую информацию с указанием начальных и граничных условий. Для того, чтобы раскрыть содержание оператора A , необходимо выбрать способ получения этого оператора в аналитическом или численном виде.

Модель (18) является идеализацией отображения (17) и отражает степень наших знаний о процессе. Для эффективного решения задач энергосбережения, возникающих на всех уровнях иерархии ФТС, необходимо выполнить идентификацию операторов (Ω, A) отдельных физико-химических систем, составляющих ФТС, т.е. оценить входящие в эти операторы параметры. Проведенная идентификация позволяет считать отображение (18) готовым для изучения свойств ФТС с точки зрения энергосбережения. Реализация этой задачи связана с решением системы уравнений, соответствующих отображению (18), что равносильно получению явной функциональной связи между переменными \mathcal{E} и Z либо в аналитической форме конечных соотношений, либо в виде результата численного решения задачи на ЭВМ. Это решение представляется в виде отображения (модуля)

$$\mathcal{E} = a(Z), \tag{19}$$

в котором вектор-функция a отражает результат аналитического или численного решения вышеупомянутой смешанной системы уравнений, определяющей функциональный оператор энергетических или эксергетических преобразований A . Опыт системных исследований в моделировании энергетических процессов физико-химических систем показал [4,6], что в таком моделировании целесообразно использовать модульный принцип описания, заключающийся в создании модулей на самых низших ступенях иерархии ФТС.

В соответствии с этим принципом системно рассматриваются энергетические процессы, происходящие во внутренних элементах и структурах ФТС. При этом физико-технологическая система представляется в виде набора типовых элементов и связей. Стратегия этого этапа состоит в получении полной модели всей ФТС из элементарных модулей с учетом их взаимосвязей. Для этого используется топологический принцип формализации ФТС [7,12,13], который позволяет реализовать координирование отдельных модулей и блоков с соблюдением причинно-следственных отношений в процессах, происходящих в ФТС. При этом энергетическая структура многосвязанной системы представляется с учетом второго закона термодинамики, что обеспечивает возможность анализа и оптимизации рассматриваемых термодинамических процессов и систем. Примеры определения функциональных операторов представлены в работах [8,14-17]. Этот этап в стратегии системного подхода к физико-технологической системе является самым трудным на пути получения математической модели. Метод математического моделирования при решении задач анализа, синтеза и энергосбережения, позволяет разработать математические модели ФТС - символические, либо иконографические (топологические, структурные блок-схемы и сетевые). Символические математические модели ФТС отображают совокупность математических зависимостей в виде формул, уравнений, операторов, логических условий или неравенств, которые представляют характеристики состояния ФТС в зависимости от параметров элементов системы и от параметров входных технологических и энергетических потоков системы. Для решения задач энергоресурсосбережения представим математическую модель ФТС в виде функционального оператора, осуществляющего нелинейные преобразования вида:

$$\begin{aligned} \tilde{Y} &= F_1(X, K, V, G) \\ S &= F_2(X, K, V, G) \\ \psi_0 &= F_3(X, K, V, G), \end{aligned} \tag{20}$$

где \tilde{Y} - вектор выходных переменных;

F_1, F_2, F_3 - нелинейные (в частном случае линейные) вектор-функции;

X - вектор входных переменных;

K - вектор (технологических, конструктивных или энергетических) параметров элементов ФТС;

V - вектор параметров внешней среды;

G - технологическая или энергетическая топология ФТС;

ψ_0 - значение критерия эффективности ФТС;

S - вектор функциональных характеристик (количественных оценок) характеристических свойств ФТС).

Например, при анализе теплообменных систем изучаются их свойства и эффективности в

зависимости от структуры технологических, энергетических связей между элементами ФТС, а также от конструктивных и технологических параметров системы и параметров технологических и энергетических режимов рассматриваемого объекта. К конструктивным параметрам относятся: поверхность теплообмена F , диаметры кожуха D_k и труб $D_{тр}$, длина трубы L , количество ходов в трубном пространстве теплообменного аппарата N , площади проходных сечений в трубах $S_{тр}$ и межтрубном пространстве $S_{мтр}$. Технологическими параметрами ФТС являются линейные скорости потоков в трубном $V_{тр}$ и межтрубном $V_{мтр}$ пространствах, коэффициенты теплоотдачи в трубном $\alpha_{тр}$ и межтрубном $\alpha_{мтр}$ пространствах, коэффициент теплопередачи k , среднеарифметическая разность температур $\Delta\theta_{ср}$, тепловая нагрузка ФТС Q . Параметры технологических и энергетических режимов ФТС – это массовые расходы потоков, температуры входных и выходных потоков, давление потоков, входные и выходные эксергии. Основная задача анализа теплообменных систем ФТС с точки зрения изучения их свойств и эффективности (параметрический анализ) заключается в том, чтобы математически связать характеристики состояния системы (значения температур входных технологических потоков) с параметрами и характеристиками состояния элементов ФТС в зависимости от структуры технологических связей между ними.

Математическая постановка задачи параметрического анализа теплообменных систем ФТС формулируется следующим образом: необходимо определить

$$\begin{aligned} T_{вых} &= f(T_{вх}, K, D, G) \\ \Psi_0 &= \psi(T_{вх}, K, D, G) \end{aligned} \quad (21)$$

где $T_{вх}$ – вектор температур входных технологических потоков для совокупности элементов, входящих в ФТС;

Ψ_0 – значение критерия эффективности тепловой системы, в частности приведенные затраты на ФТС;

$T_{вх}$ – вектор заданных температур входных потоков;

K – вектор заданных конструктивных параметров ФТС;

D – вектор заданных или рассматриваемых технологических параметров ФТС;

G – заданная структура технологических связей (технологическая топология) ФТС.

Основная задача анализа теплообменных ФТС с точки зрения энергоресурсосбережения – это изучение их энергетических или эксергетических свойств и эффективности (эксергетический анализ) заключается в том, чтобы математически связать энергетические или эксергетические характеристики состояния системы (значения эксергий входных технологических потоков) с параметрами и характеристиками состояния элементов ФТС в зависимости от структуры энергетических связей между ними.

Математическая постановка задачи энергетического или эксергетического анализа теплообменных систем ФТС формулируется следующим образом: необходимо определить

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{вых} &= f(\mathcal{E}_{вх}, K, D, G_2) \\ \Psi_{э} &= \psi(\mathcal{E}_{вх}, K, D, G_2) \end{aligned} \quad (22)$$

где $\mathcal{E}_{вх}$ – вектор эксергий входных технологических потоков для совокупности элементов, входящих в ФТС;

$\Psi_{э}$ – значение эксергетического критерия эффективности тепловой системы, в частности, приведенные эксергетические затраты на ФТС;

$\mathcal{E}_{вх}$ – вектор заданных эксергий входных потоков;

G_2 – заданная структура энергетических связей (энергетическая топология) ФТС.

На практике при проектировании или реконструкции теплотехнологических систем, а также при определении оптимальных технологических и энергетических (эксергетических) режимов их функционирования задача анализа наиболее часто трактуется как оценка возможных альтернативных вариантов системы (выбор возможной структуры технологических и энергетических связей между элементами, параметров теплотехнической системы). Для каждого из возможных исследуемых вариантов ФТС необходимо вычислить совокупность показателей эффективности функционирования и получить представление о недостатках и достоинствах тех или иных вариантов их построения.

С математических позиций задача анализа ФТС с точки зрения энергоресурсосбережения сводится к решению многомерных нелинейных систем уравнений с использованием различных численных методов, в частности методов нелинейного программирования.

Выводы

1. Рассмотрены термодинамические принципы управления системами, связанные с максимальной мощностью.
2. Выполненная работа даёт общее представление о термодинамических принципах управления энергоресурсосбережением ФТС.
3. Сформулированный принцип 9 - модифицированный принцип Дьярмати - является термодинамическим принципом управления, позволяющим решать вопросы энергоресурсосбережения с точки зрения эксергетического подхода.
4. Выполнен синтез функциональных операторов ФТС, позволяющих реализовать модульный принцип представления информации для решения задач энергоресурсосбережения.

Литература

1. Hoffmann KH, Burzler J, Schubert S. Endoreversible thermodynamics. J Non-Equilib Thermodyn 1997; 22:311-55.
2. Bejan A, Paynter HM. Solved problems in thermodynamics. Cambridge: Department of Mechanical Engineering, MIT, 1976.
3. Reid RS, Ward WC, Swift GW. Cyclic thermodynamics with open flow. Phys Rev Lett 1998;80: 4617.Новиков И.И., Воскресенский В.Б. Прикладная термодинамика и теплопередача. - М: Атомиздат, 1977. - 327 с.
4. Curzon FL, Ahlborn B. Efficiency of Carnot engine at maximum power output. Am J Phys 1975;43:22-4.Kosloff R A quantum mechanical open system as a model of a heat engine. J Chem Phys 1984;80:1625.
5. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Принципы энергосбережения физико-технологических систем и основные направления их реализации (топологоэксергетический подход)// Математичне моделювання. – 2007.- № 4(22).- С.45-51.
6. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Чернышов А.В., Носков В.А. Системный подход к энергосбережению физико-технологических систем (топологоэксергетический подход)// Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов. Сборник научных статей 15 Международной научно-практической конференции в 2-х т. Т.1.УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: «Сага», 2007. - С. 375-385.
7. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В., Кичигин А.Ф. Топологоэксергетический подход как единая база данных при системотехническом проектировании канонических ансамблей физико-технологических систем. Часть 1,2. // Энергетика: економіка, технології, екологія. - 2006.- № 2 (19).- С.31-47.
8. Долгополов И.С., Словиковский П.А., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к анализу теплообменного аппарата // Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины – Днепропетровск: «Пороги», том 12, 2005.- С.183-194 :
9. Кафаров В.В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии.- М.: Наука, 1976. -500 с.
10. Кафаров В.В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации.- М.: Наука, 1979.- 394 с.
11. Долгополов И.С., Носков В.А., Чернышов А.В., Тучин В.Т., Минаева А.С. Топологоэксергетический анализ параметров агрегата для сушки промышленных отходов (сообщение 1) // Металлургическая и горнорудная промышленность №5, 2005, С. 84-89.
12. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод моделирования физико-технологических систем (ФТС). 5 Minsk International Heat and Mass Transfer Forum Proceedings. MIF 2004 ММФ.
13. Тучин В.Т., Долгополов И.С. Основы формализма топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки). - Днепродзержинск: ДДТУ, 2006.- С. 202-213.
14. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // Промышленная теплотехника. - 2003.- т. 25 , № 24. -С. 116 – 118.
15. Дорохов И.Н., Кафаров В.В., Тучин В.Т. Синтез математического описания элементов систем автоматического управления методом диаграмм связи // Изв. АН Армянской ССР.- т. XXXI. №6- 1978. - С.47-54.

16. Долгополов И.С., Словицкий П.А., Тучин В.Т, Топологоэксергетический подход к анализу теплообменного аппарата // Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины – Днепропетровск: «Пороги», том 12, 2005.- С.183-194.
17. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический анализ сушильной камеры трубы-сушилки (стационарный режим) // Математичне моделювання.- 2004, №2 (12).- С.55-61.
18. Kosloff R. A quantum mechanical open system as a model of a heat engine. J Chem Phys 1984;80:1625.