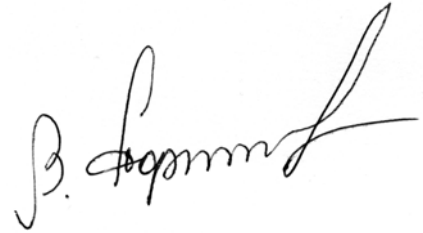


*На правах рукописи*



**АФАНАСОВ ВЛАДИМИР ХРИСТОФОРОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ  
СЕКЦИОНИРОВАННОГО БИОРЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО  
АЭРОБНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

Иваново 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пятигорский государственный технологический университет».

Научный руководитель: *доктор технических наук, профессор*  
Першин Иван Митрофанович

Официальные оппоненты: *доктор технических наук, профессор*  
Жуков Владимир Павлович

*кандидат технических наук, доцент*  
Лихачев Алексей Кириллович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Ивановский государственный  
химико-технологический университет»

Защита состоится « 18 » декабря 2009 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.03 при ИГЭУ по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34, аудитория Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, с авторефератом можно ознакомиться на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Шульпин А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационного исследования.** Биотехнологии играют все возрастающую роль во многих отраслях народного хозяйства и, в первую очередь, в пищевой промышленности. Большинство биотехнологических процессов идет при температуре, превышающей температуру окружающей среды, то есть осуществляется в разного рода биореакторах с подводом теплоты. Спецификой большинства биохимических процессов является то, что они эффективно протекают в весьма узком интервале температур. Кроме того, на определенной из стадии процесса начинаются эндо- и экзотермические реакции, возмущающие стационарный тепловой режим в секциях биореактора.

Типичным примером секционированного биореактора периодического аэробного культивирования является инкубатор, в котором яйца должны выдерживаться длительное время при постоянной температуре (точнее, в узком допустимом интервале температур, например, 36,8...38,3 °С для куриных яиц) и где на определенной стадии происходят экзотермические процессы.

При небольшом числе секций (в том числе, в естественных условиях) выравнивание температуры по секциям и ее стабилизация во времени не представляет особого труда. Однако такой режим соответствует низкой производительности аппарата. Значительное увеличение его объема с целью повышения единичной производительности приводит к температурным неоднородностям, и часть секций может оказаться в неприемлемых температурных условиях. Компенсация этих перекосов требует секционирования внешних источников теплоты и их работы в индивидуальных режимах. Очевидно, что усложнение процесса приводит к тому, что система приобретает все большее число степеней свободы, и эмпирический подбор рациональных параметров ее функционирования становится крайне затруднительным. Поэтому важное значение здесь имеют математические модели тепловых процессов в подобных аппаратах, позволяющие если и не прогнозировать точно базовый режим, то хотя бы достоверно оценивать поведение системы при отклонениях от него.

Отсутствие таких моделей и определило цель настоящей работы, которая выполнялась в рамках ФЦП «Интеграция» и планов НИР Пятигорского государственного технологического университета.

**Объект исследования** – тепловые процессы в секционированном биореакторе с нагревательными элементами и вентилирующим газом.

**Предмет исследования** – Температурное поле секционированного биореактора и подходы к его стабилизации по пространству и во времени.

**Цель исследования** – исследование теплового состояния в секциях секционированного биореактора периодического аэробного культивирования (например, инкубатора) и способов влияния на пространственную и временную неравномерность этого состояния на основе ячеечных математических моделей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи диссертационного исследования:

1. Разработать математическую модель процессов тепломассообмена в секционированном биореакторе

2. Разработать методику построения программ регулирования теплового состояния в секциях биореактора.

3. На основе разработанных математических моделей тепломассообменных процессов создать инженерный метод расчета нестационарного и установившегося теплового состояния секционированного биореактора периодического аэробного культивирования и построения программ регулирования теплового состояния в секциях при возникновении в них нестационарных тепловых возмущений

#### ***Методы исследования.***

Математическое моделирование процессов тепломассообмена и аэродинамики, вычислительный эксперимент.

#### ***Научная новизна.***

1. Разработана ячеечная математическая модель прогрева секций секционированного биореактора периодического аэробного культивирования с учетом теплопередачи между секциями, неравномерности распределения температуры секций нагревательных элементов и параметров потока вентилирующего газа.

2. В численных экспериментах выявлены рациональные распределения температуры секций нагревательных элементов и параметры потока газа, обеспечивающие равномерное распределение температуры по секциям с заданной точностью.

3. Разработанная модель обобщена на случай тепловых возмущений в секциях, вызванных экзотермическими биохимическими реакциями, протекающими в случайные моменты времени.

4. Предложена математическая модель регулирования процесса стабилизации температурного поля объекта путем отключения нагревательных элементов и изменения расхода газа для поддержания температуры в секциях в заданном допустимом интервале.

#### ***Практическая ценность.***

1. Разработан инженерный метод расчета нестационарного и установившегося теплового состояния секционированного биореактора периодического аэробного культивирования и его компьютерная реализация.

2. Предложена методика расчета рациональных программ регулирования теплового состояния в секциях биореактора при возникновении в них нестационарных тепловых возмущений.

3. Разработанный метод расчета и его программно-алгоритмическое обеспечение используется в практике проектирования и модернизации инкубаторного оборудования в ЗАО «Пятигорксельмаш».

#### ***Реализация результатов работы.***

Практические рекомендации по стабилизации теплового состояния в инкубаторе нашли применение в ЗАО «Пятигорксельмаш».

#### ***Апробация результатов работы.***

Основные положения диссертации были заслушаны и одобрены на следующих международных конференциях: «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22», Псков, 2009, 14-ой МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, 2009, XV

МНК «Информационная среда вуза», Иваново, 2008, XV МНК «Состояние и перспективы развития электротехнологий», Иваново, 2009.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе, 2 работы в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация представлена на 136 стр. и состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка использованных источников (94 наименования) и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** на основе литературных источников исследовано современное состояние проблемы моделирования теплового режима в секционированных биореакторах периодического аэробного культивирования - инкубаторах как весьма представительных объектах всего класса биореакторов. Выполнен обзор и сравнительный анализ аэродинамических и тепловых схем отечественных инкубаторов и проанализированы типовые требования к температурному режиму в них.

Выделяя из весьма сложного биохимического процесса только тепловую задачу, можно сформулировать ее следующим образом. На плоскости регулярным образом расположены обрабатываемые объекты, размещенные в отдельных ячейках, между которыми возможна теплопередача. Над объектами расположены нагревательные элементы, перекрывающие часть из них и в общем случае имеющие разную температуру. Между нагревательными элементами и обрабатываемыми объектами организован поток вентилирующего газа, в общем случае имеющий неравномерное распределение скоростей. Требуется обеспечить температуру всех обрабатываемых объектов в достаточно узком интервале допустимых значений в течение длительного времени, несмотря на действующие в системе внешние и внутренние тепловые возмущения, причем наиболее существенным из внутренних возмущений является тепловыделение биохимической реакции, начинающейся на определенной стадии обработки объектов.

Строгое решение задачи на основе фундаментальных уравнений гидродинамики и теплопереноса (например, с использованием коммерческих программ типа FLUENT) не является возможным (или, по крайней мере - эффективным) инструментом моделирования процесса. Представляется разумным введение упрощений с самого начала моделирования. В частности, предположение о возможности пренебречь неравномерностью температуры внутри обрабатываемых объектов позволяет представить каждый объект как конечную ячейку с одинаковой во всех точках температурой, и именно на этом уровне декомпозиции системы ставить и решать описанную выше технологическую задачу. Ячеечные модели и связанный с ними математический аппарат теории цепей Маркова являются эффективным инструментом моделирования процес-

сов переноса и важной составной частью системного подхода к моделированию. Основные положения системного подхода применительно к механическим и тепломассообменным процессам развиты и систематизированы в работах В.В. Кафарова и его школы. Идея подхода состоит в том, что из процесса выделяется элементарная подсистема (ячейка), свойства которой могут быть описаны на основе базовых уравнений переноса в их исходной, часто простейшей форме. Основная задача моделирования состоит в описании потоков между ячейками, заполняющими весь рабочий объем процесса. Для этого наиболее эффективным оказывается применение аппарата теории цепей Маркова, описывающего эволюцию дискретных случайных состояний некоторой системы, у которой будущее состояние определяется только настоящим состоянием и не зависит от прошлого. Несмотря на то, что эта теория использовалась для описания теплофизических процессов многими авторами, новый всплеск интереса к ней вызван появлением эффективных средств компьютерной поддержки операций с матрицами (например, MATLAB). В значительной степени этот интерес инспирирован появлением монографии А. Тамира, а также работ международной исследовательской группы под руководством А. Бертье и В.Е. Мизонова, первоначально ориентированных на моделирование механических процессов в дисперсных средах, а затем получивших развитие в направлении тепловых и массообменных процессов. Именно эта стратегия моделирования была положена в основу нашей работы.

В заключение главы приведены детализированные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке ячеечной математической модели процесса. Ее построение начато с одномерной расчетной схемы, представленной на рис.1. Теплота от источника передается к вентилирующему воздуху и нагревает его, то есть повышает его температуру. Этому соответствует тепловой поток  $\Delta Q_{csg}$ , природой которого в основном является вынужденная конвекция. Также путем вынужденной конвекции теплота от нагретого газа передается к нагреваемым телам (тепловой поток  $\Delta Q_{cgb}$ ). Кроме того, теплота от источника может непосредственно передаваться к обрабатываемым телам путем радиационного теплообмена (тепловой поток  $\Delta Q_{rsb}$ ). В продольном направлении теплота переносится в воздушном зазоре вместе с массой протекающего в нем вентилирующего воздуха, а между неравномерно нагретыми ячейками секционированного объема путем теплопередачи, преодолевая термическое сопротивление перегородок между ячейками. Кроме того, на определенной стадии термообработки тел в них могут возникать экзотермические биохимические реакции, приводящие к появлению в телах внутренних источников теплоты.

Рассматриваемая система представляет собой совокупность элементарных подсистем – ячеек, внутри которых в каждый момент времени все термодинамические параметры считаются равномерно распределенными по объему ячеек. Общая длина процесса  $L$  разбита на отрезки  $\Delta x$ , которые и формируют упомянутые ячейки. Считается, что длина отрезка  $\Delta x$  совпадает с длиной секции контейнера, то есть процесс разбивается на  $m=L/\Delta x$  ячеек. В результате получаются две параллельные цепи ячеек: одну для газа, между ячейками которой

возможен перенос и массы и теплоты, и одну для обрабатываемых тел, вдоль которой возможен только перенос теплоты. Кроме того, сходственные ячейки обеих цепей могут обмениваться теплотой друг с другом и с источниками теплоты, то есть каждая из цепей является источником (стоком) теплоты для другой.

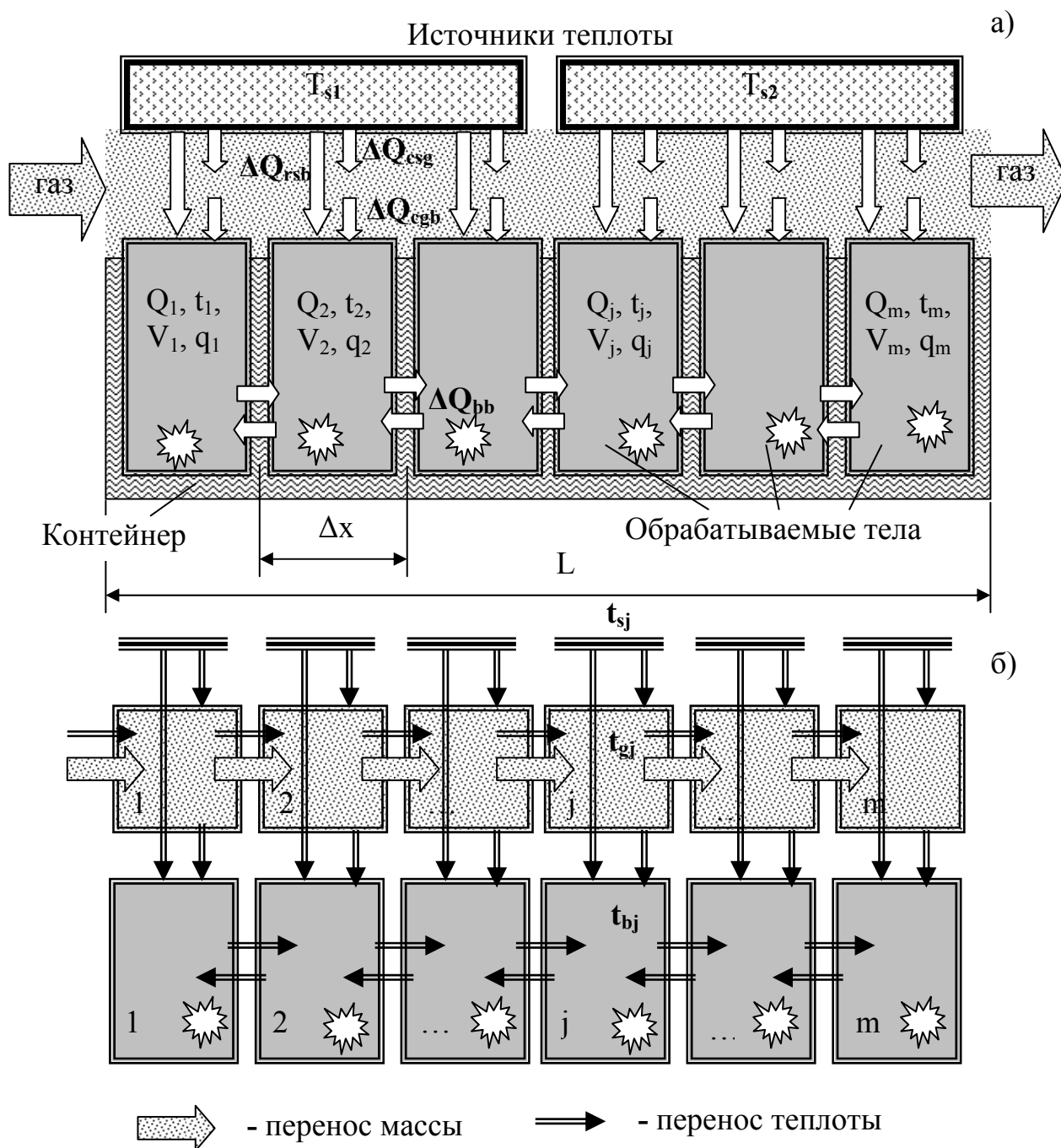


Рис.1. Расчетная схема процесса (а) и его ячейное представление (б).

Состояние системы рассматривается через малые дискретные промежутки времени  $\Delta t$ . Тогда текущие моменты наблюдения состояния системы могут быть записаны как  $\tau^k = (k-1)\Delta t$ , где  $k=1, 2, 3, \dots$  - номер временного перехода или целочисленный аналог текущего времени. Таким образом, все переменные

процесса становятся целочисленными: пространственная координата характеризуется номером ячейки  $j=1, 2, 3, \dots, m$ , время – номером перехода  $k=1, 2, \dots$

Состояние цепи в некоторый момент времени описывается вектором-столбцом состояния размером  $1 \times m$ . Например, распределение температуры газа по ячейкам в  $k$ -й момент выглядит как

$$\mathbf{t}_g^k = \begin{bmatrix} t_{g1}^k \\ t_{g2}^k \\ \dots \\ t_{gm}^k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Аналогично записывается распределение по ячейкам цепей всех других параметров процесса.

Эволюция теплового состояния системы газа определяется рекуррентными матричными равенствами

- цепь для газа

$$\mathbf{Q}_g^{k+1} = \mathbf{M}_g * (\mathbf{Q}_g^k + \Delta \mathbf{Q}_g^k) + \mathbf{Q}_{gf}^k, \quad (2)$$

$$\mathbf{m}_g^{k+1} = \mathbf{M}_g * \mathbf{m}_g^k + \mathbf{m}_{gf}^k, \quad (3)$$

$$\mathbf{t}_g^k = \mathbf{Q}_g^k ./ (\mathbf{c}_g * \mathbf{m}_g), \quad (4)$$

- цепь секций обрабатываемых объектов

$$\mathbf{Q}_b^{k+1} = \mathbf{P}_Q * (\mathbf{Q}_b^k + \Delta \mathbf{Q}_b^k), \quad (5)$$

$$\mathbf{t}_b^k = \mathbf{Q}_b^k ./ (\mathbf{c} * \mathbf{m}). \quad (6)$$

Здесь  $\mathbf{Q}_g$  и  $\mathbf{Q}_b$  – векторы запасов теплоты в ячейках газа и твердого,  $t_g$  и  $t_b$  – векторы температур,  $\mathbf{m}_g$  – вектор масс газа в ячейках (для несжимаемого газа равенство (3) дает тривиальное решение  $\mathbf{m}_{gj} = \text{const}$  и может быть исключено из рассмотрения),  $\mathbf{m}_{gf}$  – вектор источников газа (при подаче газа только в первую ячейку имеет единственный первый ненулевой элемент  $\mathbf{G}_g \Delta \tau$ ,  $c_g$  и  $c$  – удельная теплоемкость газа и твердого.

Векторы  $\Delta \mathbf{Q}_g$  и  $\Delta \mathbf{Q}_b$  описывают поперечные тепловые потоки и соответственно равны

$$\Delta \mathbf{Q}_g^k = \alpha_{sg}^k * (b \Delta x) * (\mathbf{t}_s^k - \mathbf{t}_g^k) * \Delta \tau - \alpha_{gb}^k * (b \Delta x) * (\mathbf{t}_g^k - \mathbf{t}_b^k) * \Delta \tau, \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{Q}_b^k = \{ \alpha_{gb}^k * (\mathbf{t}_g^k - \mathbf{t}_b^k) + \alpha_{sb}^k * [((\mathbf{t}_s^k + 273)/100)^4 - ((\mathbf{t}_b^k + 273)/100)^4] \} b \Delta x \Delta \tau, \quad (8)$$

где  $\alpha_{sg}^k$  и  $\alpha_{gb}^k$  – векторы коэффициентов теплоотдачи от нагревательных элементов к газу и от газа к твердому,  $\alpha_{sb}^k$  – приведенный коэффициент излучения от нагревательных элементов к твердому, зависящий от соотношения степеней черноты источника и приемника излучения, который иногда трактуют как коэффициент радиационной теплоотдачи (все эти коэффициенты могут меняться от ячейки к ячейке, то есть по длине, и от перехода к переходу, то есть по времени),  $b$  – ширина ячеек.

Матрицы  $\mathbf{M}_g$  и  $\mathbf{P}_Q$  описывают продольные переходы массы и теплоты (газ) и теплоты (твердое) между ячейками и, в простейшем случае одинаковых по объему ячеек, имеют вид



$$P_Q = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d & 1-d \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_g = \begin{bmatrix} 1-v & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v & 1-v & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v & 1-v & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v & 1-v & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & v & 1-v \end{bmatrix} \quad (10)$$

где  $v=V_g\Delta\tau/\Delta x$  ( $V_g$  – расходная скорость газа в ячейках),  $d=(kS\Delta\tau)/(c_pV)$ ,  $k$  – коэффициент теплопередачи между ячейками твердого.

В диссертации приведены матрицы для более сложной структуры ячеек и их взаимодействия. Формулы (1)-(10) полностью описывают эволюцию теплового состояния системы при известном начальном состоянии.

Модель протестирована на физически очевидных случаях, а также выполнены численные эксперименты, выявившие влияние конструктивных и режимных факторов на распределение температуры по ячейкам с обрабатываемыми объектами. Пример результатов моделирования показан на рис.2, где действует двухступенчатый тепловой источник и существует значительная продольная теплопередача между ячейками.

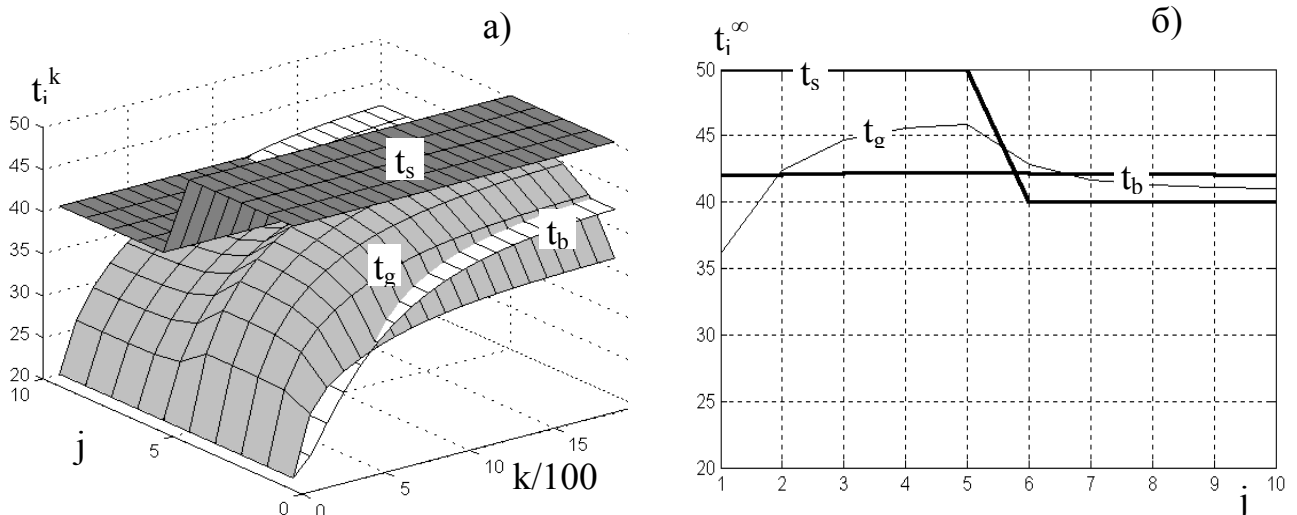


Рис.2. Эволюция температуры источника, газа и твердого при подвижном газе (а) и установившиеся распределения температур (б) при продольной теплопередаче в твердом.

Ступенчатое изменение температуры источника. ( $v_g=0,005$ ;  $d=0,4$ )

Несмотря на то, что температура газа значительно меняется по длине, эта теплопередача выравнивает распределение температуры по ячейкам твердого, где она практически одинакова.

Данная ячеечная модель была обобщена на двумерный случай с плоской прямоугольной совокупностью обрабатываемых объектов. Схема процесса и его ячеечная модель показана на рис.3.

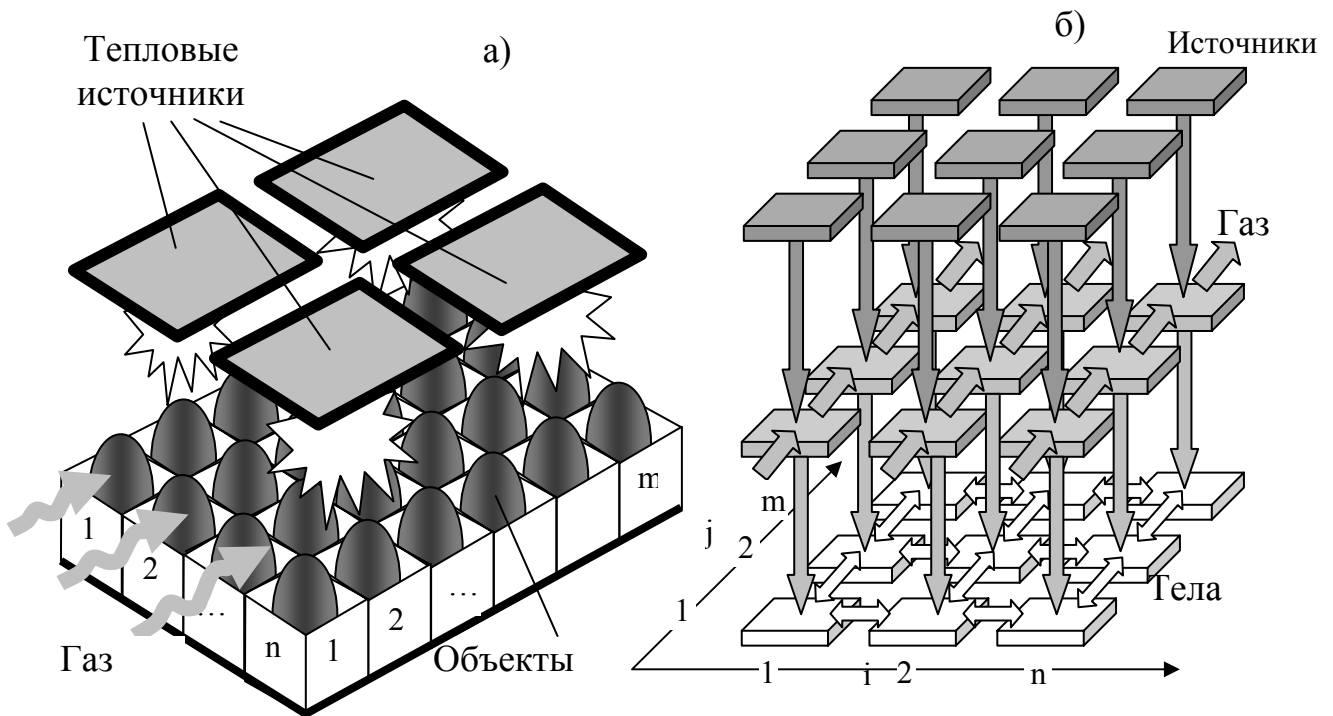


Рис.3. Расчетная схема (а) и многослойная двумерная ячеечная модель процесса (б).

Распределение параметров состояния представляется в матричной форме, но для дальнейших расчетов необходимо ввести сквозную нумерацию ячеек по столбцам и преобразовать матрицу в вектор-столбец, как это показано ниже для сетки ячеек размером 3x3

$$\mathbf{Qm} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Qm} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_4 & Q_7 \\ Q_2 & Q_5 & Q_8 \\ Q_3 & Q_6 & Q_9 \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_8 \\ Q_9 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Переходные матрицы строятся по правилу, совпадающему с правилом для одномерной цепи, с учетом ячеек, в которые возможен переход при сквозной нумерации. Например, при изотропной теплопередаче между ячейками твердого, для сетки ячеек размером 3x3 матрица для переходов теплоты между ячейками твердого имеет размер 9x9 и следующий вид

$$P_Q = \begin{bmatrix} 1-2d_s & d_s & 0 & d_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_s & 1-3d_s & d_s & 0 & d_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_s & 1-2d_s & 0 & 0 & d_s & 0 & 0 & 0 \\ d_s & 0 & 0 & 1-3d_s & d_s & 0 & d_s & 0 & 0 \\ 0 & d_s & 0 & d_s & 1-4d_s & d_s & 0 & d_s & 0 \\ 0 & 0 & d_s & 0 & d_s & 1-3d_s & 0 & 0 & d_s \\ 0 & 0 & 0 & d_s & 0 & 0 & 1-2d_s & d_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_s & 0 & d_s & 1-3d_s & d_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_s & 0 & d_s & 1-2d_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

а такая же матрица для переноса массы газа может быть записана в виде

$$M_g = \begin{bmatrix} p_{11} & d_{gy} & 0 & d_{gx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{gy} & p_{22} & d_{gy} & 0 & d_{gx} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{gy} & p_{33} & 0 & 0 & d_{gx} & 0 & 0 & 0 \\ d_{gx}+v_{x1} & 0 & 0 & p_{44} & d_{gy} & 0 & d_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & d_{gx}+v_{x2} & 0 & d_{gy} & p_{55} & d_{gy} & 0 & d_{gx} & 0 \\ 0 & 0 & d_{gx}+v_{x3} & 0 & d_{gy} & p_{66} & 0 & 0 & d_{gx} \\ 0 & 0 & 0 & d_{gx}+v_{x1} & 0 & 0 & p_{77} & d_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{gx}+v_{x2} & 0 & d_{gy} & p_{88} & d_{gy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{gx}+v_{x3} & 0 & d_{gy} & p_{99} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где вероятности  $p_{jj}$  в столбцах 1...6 рассчитываются как единица минус сумма всех остальных вероятностей, а в крайнем столбце ячеек, то есть в столбцах 7...9 матрицы необходимо вычесть  $v_g$  – вероятности выхода в абсорбирующие ячейки, которые к цепи не относятся (неполное пространство состояний).

В этой матрице возможно учесть поперечную неоднородность потока, когда газ движется вдоль каждой строки ячеек со своей скоростью. Очевидно, что описанное выше правило построения переходных матриц легко алгоритмируется для цепи произвольного размера  $n \times m$ , матрица для которой имеет размер  $(n \times m) \times (n \times m)$ .

Эволюционные рекуррентные уравнения для двумерного процесса имеют точно такой же вид, как и для одномерной цепи (2)-(8).

В диссертационной работе приведены результаты численных экспериментов, показывающих влияние конструктивных и режимных факторов на эволюцию распределения температур и их установившиеся распределения, в том числе, с учетом поперечной неоднородности потока вентилирующего газа.

Результат расчета установившегося распределения температуры по двумерной сетке ячеек показан на рис.4, где источник теплоты представлен четырьмя секциями с разной температурой. Распределение температур газа в значительной степени воспроизводит распределение температур источников, а распределение температур обрабатываемых объектов оказывается существенно

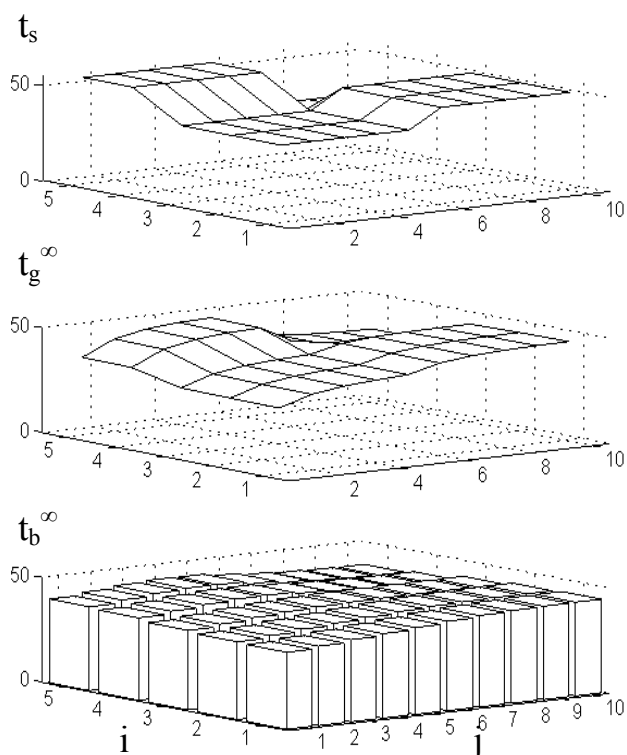


Рис.4. Установившиеся распределения температур в двумерной сетке ячеек при неравномерном распределении температуры источника ( $v_g=0,005$ ;  $d=0,02$ )

более равномерным из-за введенной продольной и поперечной теплопередачи между ячейками.

Разработанная одномерная и двумерная модели нестационарного теплообмена в секционированном биореакторе позволяют рассчитывать переходные процессы его прогрева из холодного состояния, находить установившееся распределение температуры и отыскивать режимные и конструктивные пути обеспечения ее равномерности.

*В третьей главе* приведены результаты моделирования реакции системы на возникающие в ней тепловые возмущения, вызванные протекающими

в обрабатываемых телах экзотермическими биохимическими реакциями. Такие реакции происходят, например, в инкубаторах на определенной стадии формирования зародыша. Для решения рассматриваемых задач сущность реакции безразлична: важен только ее тепловой эффект и его изменение с течением времени.

Как известно, постоянная скорости реакции зависит от температуры. Однако, так как целью рациональной организации теплового процесса является именно стабилизация температуры, то в первом приближении эту зависимость не учитывать. Поэтому единственным аргументом функции тепловыделения остается время. Пусть  $q_{in}(\tau)$  – тепловыделение обрабатываемого объекта массой  $m$  в единицу времени. Эта функция должна удовлетворять очевидным условиям  $q_{in}(0)=0$  (процесс еще не начался),  $q_{in}(\infty)=0$  (реакция полностью завершилась). Последнее не означает, что завершился весь процесс обработки, так как могут продолжаться реакции с гораздо меньшим тепловым эффектом. Достаточно удобной аппроксимирующей функцией, удовлетворяющей этим условиям, является следующая зависимость

$$q_{in}(\tau)=a\tau^r e^{-b\tau}, \quad (14)$$

где  $a$ ,  $r$  и  $b$  – постоянные параметры, причем  $a$  является чисто масштабным фактором.

Если реакция начинается в некоторый момент времени  $\tau_0$  с начала процесса, то зависимость (14) следует использовать в виде

$$\begin{aligned} q_{in}(\tau) &= 0 \text{ при } \tau < \tau_0, \\ q_{in}(\tau) &= a(\tau - \tau_0)^r \exp(-b(\tau - \tau_0)) \text{ при } \tau > \tau_0, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\tau_0$  является, вообще говоря, случайной величиной, так как начало реакции может иметь сильный разброс по ансамблю обрабатываемых объектов.

Переходя к дискретному времени  $\tau_k = (k-1)\Delta\tau$ , получим дополнительное количество теплоты, появляющееся в ячейке на  $k$ -ом переходе

$$\Delta Q_{in}^k = q_{in}(\tau_k)\Delta\tau, \quad (16)$$

которое следует добавлять к получаемой ячейкой теплоте в эволюционном уравнении (8).

На рис.5 показан результат расчета такого процесса: слева – эволюция выделяющейся в ячейках теплоты реакции при случайном времени ее начала, справа – влияние этой теплоты на эволюцию общего теплового состояния системы.

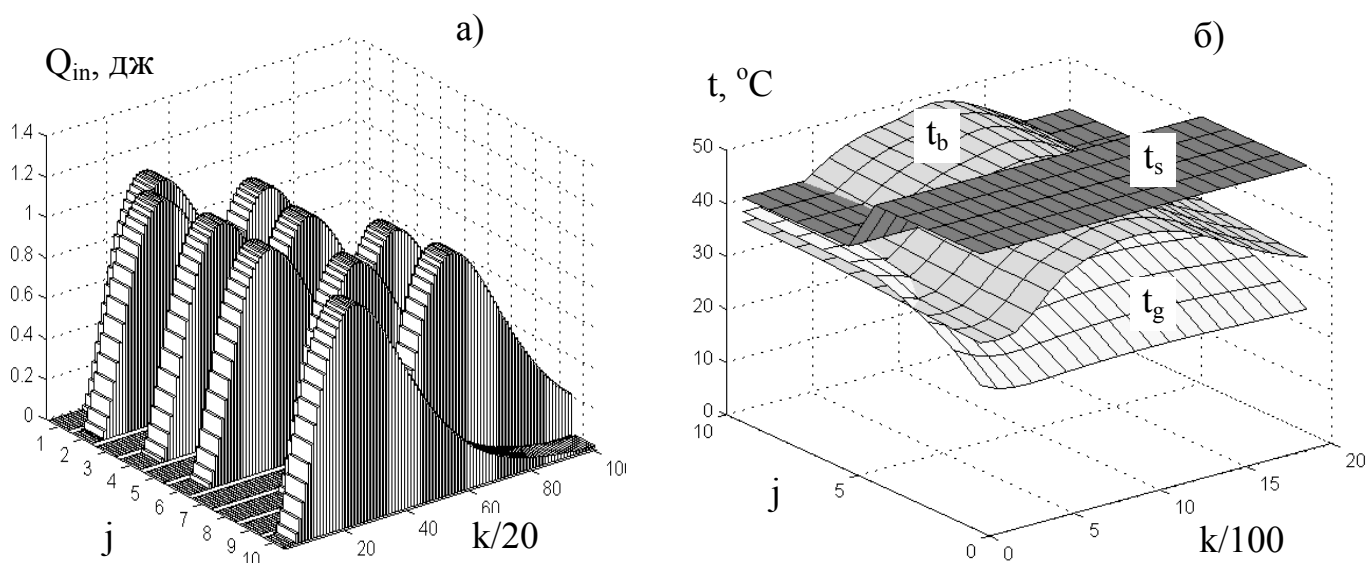


Рис.5. Эволюция теплоты внутренних источников (а) и обусловленная ей эволюция температур (б):  $v=0,005$ ;  $d=0,1$ ;  $a=0,0005$ ;  $b=0,005$ ;  $\Delta t=0,1c$

Из рис. 5б видно, что при значительной теплоте реакции температура в ячейке может превысить не только температуру газа, но и температуру нагревательного элемента. Поэтому встает вопрос о стабилизации температуры в ячейках, то есть ее удержании в заданном допустимом интервале. В диссертации рассмотрено несколько возможностей организации этой стабилизации: отключение нагревательных элементов (всех вместе или в различных комбинациях) и регулирование расхода газа.

На рис.6 показаны результаты расчета процесса регулирования темпера-

туры для первой и последней ячеек цепи путем отключения нагревательных элементов в разных комбинациях, когда температуру требуется удержать в пределах 27...33°C. При отсутствии регулирования из-за теплоты реакции в период ее протекания температуры выходят далеко за заданные пределы.

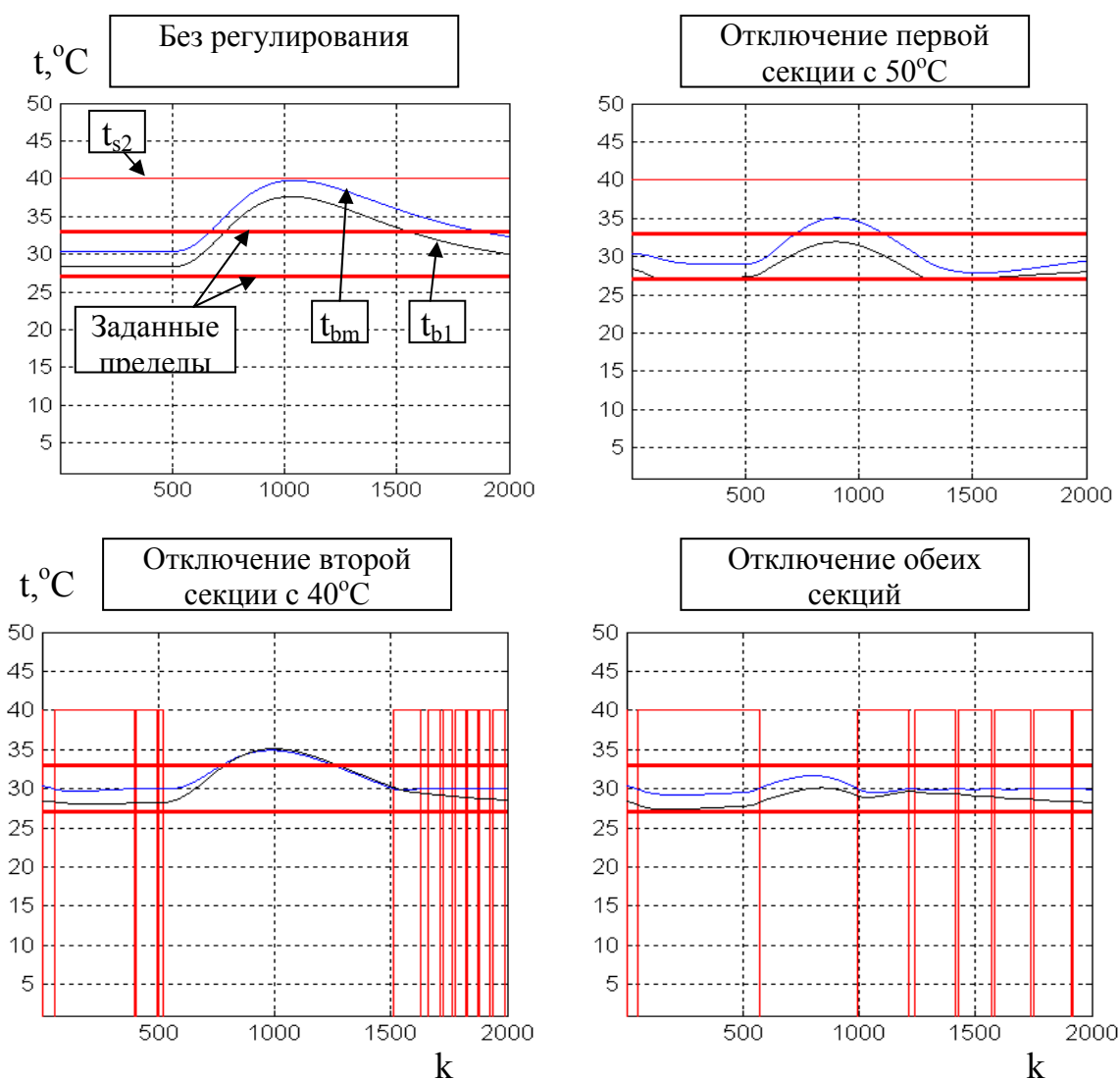


Рис.6. Изменение температуры в первой и последней ячейках и работы источников при различных вариантах их отключения:  $t_c=30^\circ\text{C}$ .

При наличии регулирования нагревательный элемент отключается при температуре в последней ячейке 30°C (на графиках показана температура второго нагревательного элемента; считается что их собственная теплоемкость очень мала и при отключении температура элемента мгновенно падает до температуры окружающей среды). При отключении только первого из двух нагревательных элементов температура в последней ячейке, хотя и незначительно, но превышает допустимый предел; температура же в первой ячейке оказывается в опасной близости к нижнему допустимому пределу. Отключение только второй секции не позволяет удержать максимальную температуру в крайних ячейках в допустимом интервале; кроме того, при поддержании температуры в уже допустимом интервале отключение и включение происходит с достаточно

высокой частотой, что отрицательно сказывается на надежности. Одновременное отключение обоих нагревателей позволяет удержать температуру в допустимом интервале; при этом частота отключений значительно ниже, чем в предыдущем случае. Необходимо отметить, что это вывод не является универсальным: при изменении параметров процесса рациональная комбинация может быть иной.

На рис.7 показан расчетный пример одновременного регулирования температуры отключением нагревательных элементов и изменением расхода газа.

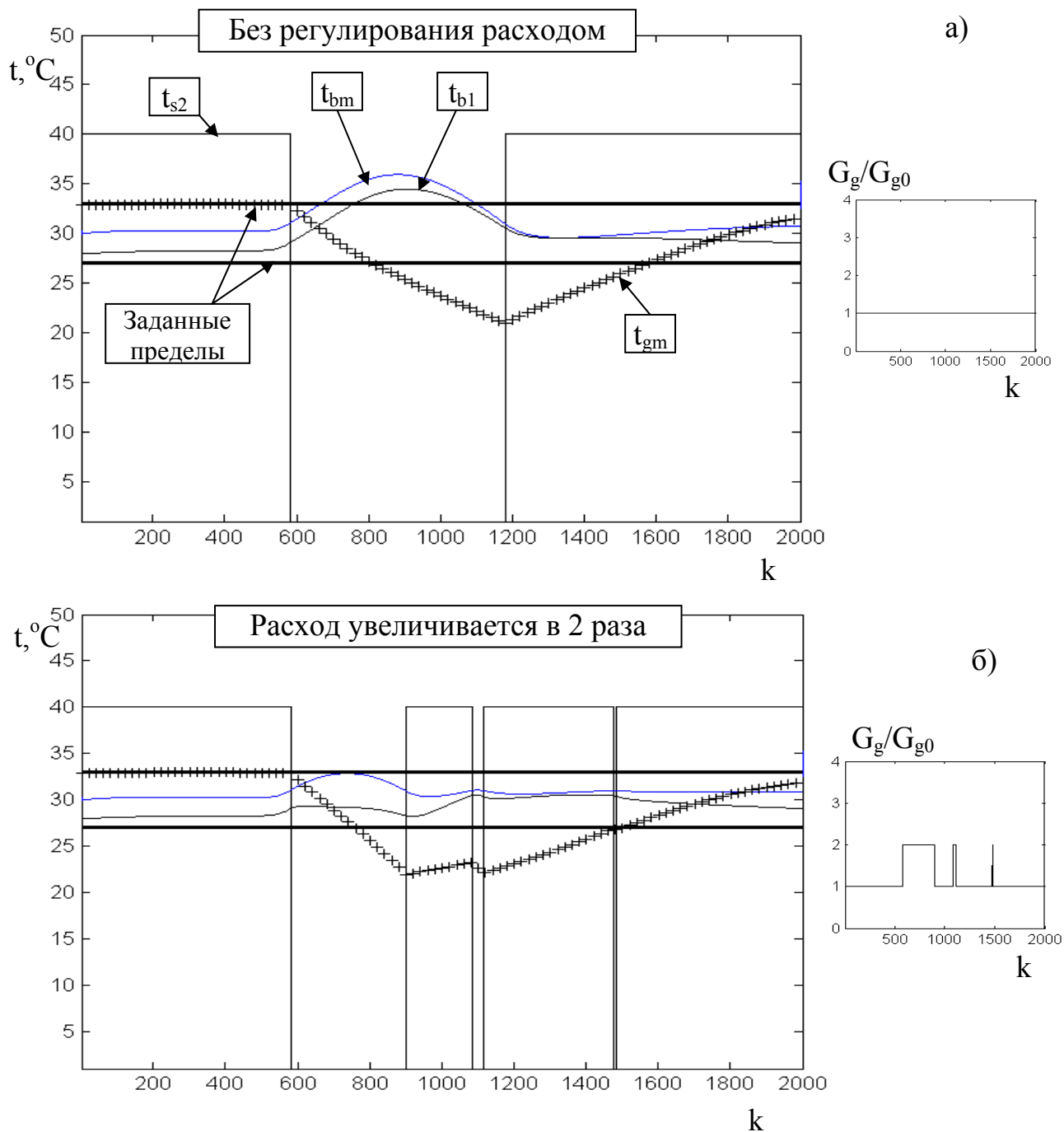


Рис.7. Эволюция параметров процесса при совместном регулировании тепловых источников (обе секции) и расхода газа.

Принятые параметры процесса таковы, что только отключением нагревательных элементов не удается удержать температуры при протекании реакции в заданном интервале. Поэтому одновременно с их отключением увеличивают расход газа, увеличивая теплосъем с обрабатываемых объектов. Совместное регулирование позволяет удержать температуры в заданном интервале и обеспечить нормативное протекание процесса.

Таким образом, разработанная модель позволяет описывать эволюцию процесса при появлении внутренних и внешних тепловых возмущений и отыскивать рациональные пути стабилизации температуры обрабатываемых объектов.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы технологического приложения результатов работы. Адекватность модели проверялась на одном из типов промышленных секционированных биореакторов периодического аэробного культивирования – инкубаторе У-55. Он представляет собой теплоизолированный бокс с держателями горизонтально расположенных секций с яйцами. Подвод теплоты осуществляется только нагретым воздухом, подаваемым вентилятором и нагреваемым несколькими секциями нагревательных элементов. Наличие выравнивающих решеток с жалюзийным регулированием проходного сечения позволяет осуществлять совместное регулирование теплового состояния путем выключения секций нагревательных элементов и изменения расхода воздуха. С помощью решеток достигается достаточно равномерное распределение потока воздуха по сечению аппарата, вследствие чего приемлемой является одномерная модель процесса для одного продольного канала движения газа. Полная закладка инкубатора составляет 16560 яиц: в каждом ярусе 23 канала с 40 яйцами вдоль него; всего ярусов 18.

В диссертации выполнен критический анализ критериальных зависимостей для расчета теплоотдачи от газа к твердым объектам и теплопередачи между ячейками и выбраны наиболее подходящие к условиям процесса. Основное внимание при верификации модели уделено переходному процессу при разгоне биореактора из холодного состояния.

На рис.8 показано сравнение результатов расчетов разгонных характеристик инкубационной камеры с результатами испытаний, выполненных в соответствии с методикой ОСТ 70.2.1-73 «Испытания сельскохозяйственных машин. Техническая экспертиза». В процессе эксперимента замерялись температуры яиц 4, 12, 20, 28, 36 в каналах 5 и 19 в шестом сверху ярусе, а также температуры газа над 4-м и 36-м яйцами в этих каналах.

Изменение температуры яиц при прогреве показано на рис.8а. Из приведенных данных следует, что сходственные температуры в обоих каналах различаются очень незначительно, что свидетельствует о действительно равномерном распределении и прогреве газа по каналам. Кинетика же прогрева яиц, занимающих различное положение в канале, отличается весьма существенно. Здесь же нанесено изменение средней температуры яиц в ярусе, рассчитанное по локальным температурам в ячейках (сплошная линия) и рассчитанное по нормативной методике из теплового баланса инкубатора в целом (штриховая линия). То, что эти кривые близки друг к другу, говорит о совпадении тепलो-



го баланса в инкубаторе, как по предложенной модели, так и по нормативной методике, но достоинством предложенной модели является то, что она позволяет рассчитывать кинетику прогрета по всем локальным состояниям в ячейках инкубатора.

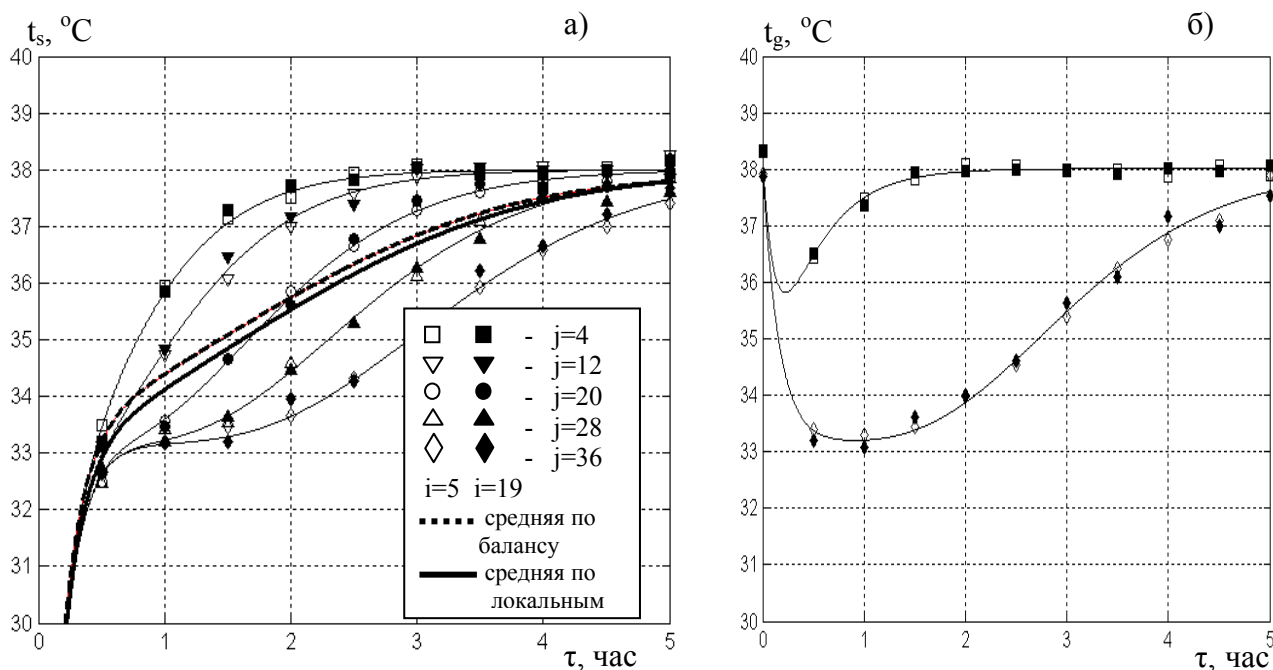


Рис.8. Изменение температуры различных ячеек в двух каналах 6-го яруса инкубатора (а) и температуры греющего газа над двумя ячейками обоих каналов (б)

На рис.8б показано изменение температуры газа над ячейками 4 и 36 в обоих каналах. Здесь также наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Разработанный метод расчета и его программно-алгоритмическое обеспечение, а также практические рекомендации по стабилизации теплового состояния в инкубаторе нашли применение в ЗАО «Пятигорксельмаш».

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана ячеечная математическая модель прогрета секций секционированного биореактора периодического аэробного культивирования с учетом теплопередачи между секциями, неравномерности распределения температуры нагревательных элементов по их секциям и параметров потока вентилярующего газа. В численных экспериментах выявлены рациональные распределения температуры секций нагревательных элементов и параметры потока газа, обеспечивающие равномерное распределение температуры по секциям с заданной точностью.

2. Модель обобщена на случай тепловых возмущений в секциях биореактора, вызванных экзотермическими биохимическими реакциями, протекающими в случайные моменты времени. Предложен метод расчета рациональных программ регулирования теплового состояния в секциях при возникновении в

них нестационарных тепловых возмущений, вызванных экзотермическими биохимическими реакциями.

3. Разработан инженерный метод расчета нестационарного и установившегося теплового состояния секционированного биореактора периодического аэробного культивирования и построения программ регулирования теплового состояния в секциях при возникновении в них нестационарных тепловых возмущений.

4. Разработанный метод расчета и его программно-алгоритмическое обеспечение используется в практике проектирования и модернизации инкубаторного оборудования в ЗАО «Пятигорсксельмаш».

5. Практические рекомендации по стабилизации теплового состояния в инкубаторе нашли применение в ЗАО «Пятигорсксельмаш».

## Основные публикации по теме диссертации

В изданиях по списку, рекомендованному ВАК:

1. **Мизонов В.Е.** Математическая модель формирования распределения температуры в ячейках секционированного объема [текст] / В.Е. Мизонов, В.Х. Афанасов, Н.Н. Елин // Изв. Вузов «Химия и химическая технология». – 2009. - Т. 52. - № 5. - С. 101-104
2. **Мизонов В.Е.** Моделирование тепловых процессов в секционированном биореакторе [текст] / В.Е. Мизонов, И.М. Першин, Н.Н. Елин, В.Х. Афанасов, В.С. Лезнов // Вестник ИГЭУ. – Вып.3. – 2009. - С. 23-25.

Публикации в других изданиях:

3. **Афанасов В.Х.** Моделирование тепловых процессов в секционированном объеме с локальными источниками теплоты / В.Х. Афанасов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин // Сб. трудов МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22». – Псков. – 2009. – Т. 9. - С.99-100
4. **Афанасов В.Х.** Математическая модель распределения температур в секционированных объемах биотехнологических аппаратов [текст] / В.Х. Афанасов, В.Е. Мизонов, В.С.Лезнов // Тезисы 14-ой МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». - Т.2. - Москва, МЭИ. – 2009. - С.464-465.
5. **Афанасов В.Х.** Моделирование теплообмена между дискретной совокупностью тел на плоскости и неравномерным источником теплоты над ней [текст] / В. Х. Афанасов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин // Информационная среда вуза: Материалы XV Междунар. конф. - Иваново, ИГАСУ. - 2008, с.772-774.
6. **Афанасов В.Х.** Двухмерная ячеечная модель температурного режима в секциях секционированного биореактора [текст] / В.Е. Мизонов, В.Х. Афанасов, В.С.Лезнов, Н.Н. Елин // Состояние и перспективы развития энерготехнологии: Сб. трудов XV Междунар. конф. - Иваново, ИГЭУ. – 2009. - т.2. - с.41 .

---

Подписано в печать 28.10.2009 г. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,1. Тираж 100 экз. Заказ № 1064  
Отпечатано в типографии  
Пятигорского государственного технологического университета  
357500, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. 40 лет Октября, 56.  
тел. (879-3)97-39-29, тел/факс (97-39-27)