

На правах рукописи  
УДК 536.74; 62 – 522.7

**Крутиков Алексей Александрович**

**СОЗДАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА И РАЗРАБОТКА  
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника  
и пневмосистемы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник Чернышев Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Киселев Михаил Иванович

кандидат технических наук  
Сологуб Валерий Николаевич

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 11 июня 2008 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д.1, ф-т «Энергомашиностроение».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в 2 экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, д.5, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан ..... 2008 г.

Желающие присутствовать на защите должны заблаговременно известить совет письмами заинтересованных организаций на имя председателя совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.16.  
кандидат технических наук, доцент

М. А. Колосов

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследования

В настоящее время во многих областях практической деятельности человека широко используются устройства, предназначенные для автоматического изменения температуры по определенному закону. В качестве объекта регулирования может выступать любой объект физической, химической или биологической природы. Такие устройства принято называть устройствами программного регулирования температуры, работающими в автоматическом режиме. Обычно они состоят из исполнительного устройства нагрева и охлаждения и системы управления.

В данной работе рассматривается прецизионное исполнительное устройство нагрева и охлаждения, предназначенное для циклического изменения температуры микрообъемов реакционной смеси. Подобные устройства входят в состав оборудования для проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР) – анализаторов нуклеиновых кислот. Метод ПЦР, применяемый при анализе ДНК, позволяет решать такие задачи, как диагностика социально значимых заболеваний (гепатиты В и С, туберкулез), анализ онкологических и генетических заболеваний, генотипирование (в криминалистике – для идентификации личности, в сельском хозяйстве – для селекции ценных пород животных и сортов растений) и многие другие.

В настоящее время большинство промышленно развитых стран ведут интенсивные работы по созданию оборудования для проведения ПЦР. Новые технологии предъявляют к анализаторам нуклеиновых кислот ряд требований по улучшению динамических характеристик, а именно – по увеличению скорости изменения температуры реакционной смеси во время процессов нагрева и охлаждения при одновременном обеспечении заданной точности поддержания температуры и равномерности температурного поля реакционной смеси на этапах стабилизации.

В последнее время возникла необходимость создания малогабаритных высокоскоростных анализаторов нуклеиновых кислот, предназначенных для проведения количественной полимеразной цепной реакции в реальном масштабе времени в полевых условиях. Данные устройства должны отличаться простотой конструкции, низким энергопотреблением, малыми габаритными размерами и массой. Для решения поставленных задач в данной работе предложено рассмотреть пневматическую схему исполнительного устройства нагрева и охлаждения, в которой в качестве теплоносителя используется воздух окружающей среды.

Разработкой оборудования для проведения ПЦР, построенного на базе пневматической схемы, занимаются такие зарубежные фирмы, как Serheid (США), Corbett Research (Австралия), Idaho Technology (США). Среди отечественных производителей можно выделить Институт аналитического приборостроения РАН (г. Санкт-Петербург), ЗАО «ДНК-технологии» (г. Москва) и ЗАО «Циклотемп» (г. Обнинск).

Однако разработчики сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с оценкой технических характеристик оборудования на этапах проектирования. В основном это обусловлено отсутствием теоретических работ, посвященных вопросу исследования динамики температурных полей микрообъектов с учетом реальной геометрии в условиях сопряженного теплообмена. Поэтому актуальной задачей является создание математических моделей и обоснованных методов расчета, позволяющих проводить исследования, необходимые для разработки высокоскоростных прецизионных исполнительных устройств нагрева и охлаждения, удовлетворяющих современным требованиям науки и техники.

Объектом исследования являются пневматические исполнительные устройства нагрева и охлаждения.

Предметом исследования являются рабочие процессы, протекающие в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения и определяющие их технические и эксплуатационные характеристики.

Целью работы является создание математических моделей и методов расчета рабочих процессов, протекающих в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения, и разработка на основе созданных моделей теплового блока малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот для эксплуатации в полевых условиях.

Задачи исследования

1. Создание математической модели и метода расчета рабочих процессов в пневматическом исполнительном устройстве нагрева и охлаждения с учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния.
2. Создание математической модели и метода расчета рабочих процессов в пневматическом исполнительном устройстве нагрева и охлаждения с учетом распределенных термодинамических параметров.
3. Проведение теоретических исследований влияния конструктивных и функциональных параметров на основные характеристики устройства, в том числе, исследование неоднородности температурного поля реакционной смеси.
4. Разработка теплового блока малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот для эксплуатации в полевых условиях.

Научная новизна

1. Впервые в приложении к пневматическим исполнительным устройствам нагрева и охлаждения создана математическая модель и метод расчета протекающих в них рабочих процессов с учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния. Данная модель позволяет исследовать изменение давления рабочего тела и температуры элементов устройств во времени.
2. Впервые в приложении к пневматическим исполнительным устройствам нагрева и охлаждения создана математическая модель и метод расчета протекающих в них рабочих процессов с учетом распределенных термодинамических параметров состояния. Данная модель позволяет

- исследовать изменение поля давления и скорости движения рабочего тела и поля температуры элементов устройств во времени.
3. Впервые расчетная область в разработанных математических моделях охватывает все основные элементы устройства, включая микропробирку и реакционную смесь, в которой учтены процессы естественной конвекции.
  4. Впервые получены результаты теоретических исследований рабочих процессов в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения. Исследовано влияние расхода теплоносителя и мощности источника теплоты на скорость изменения температуры реакционной смеси и на неравномерность поля температуры в объеме реакционной смеси.
  5. Проведены экспериментальные исследования динамических характеристик пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения. Сопоставление полученных результатов с результатами численных исследований позволило сделать заключение об адекватности созданных математических моделей параметрам исследуемых рабочих процессов в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения.

#### Практическая ценность

1. Созданы математические модели и методы расчета рабочих процессов в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения, позволяющие повысить эффективность проектирования подобных устройств, а также сократить сроки их разработки за счет возможности внесения изменений в конструктивную схему устройства на этапах разработки.
2. Даны рекомендации по выбору функциональных параметров пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения, а именно, по выбору расхода теплоносителя и мощности источника теплоты.
3. Математические модели и соответствующие методы расчета внедрены в практику проектирования тепловых блоков анализаторов нуклеиновых кислот в Институте аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург.
4. На основе проведенных исследований в МГТУ им Н.Э. Баумана разработан макетный образец теплового блока малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот для работы в полевых условиях.

Достоверность полученных данных подтверждена результатами предварительных испытаний макетного образца теплового блока малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот, который принят межведомственной комиссией и рекомендован к опытно-конструкторской разработке.

#### Положения, выносимые на защиту

Математические модели и методы расчета рабочих процессов в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований рабочих процессов в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения.

#### Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах:

1. Международный симпозиум «Образование через науку», г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, июнь 2005 г.
2. Седьмая международная научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья», Греция, п-о. Халкидики, г. Салоники, октябрь 2005 г.
3. Научные семинары кафедры «Вакуумная и компрессорная техника», г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.
4. Научно-практическая конференция «Компьютерные технологии решения прикладных задач тепломассопереноса и прочности», г. Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, май 2007 г.

Личный вклад автора заключается в разработке математических моделей и методов расчета, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, а также в создании макетного образца теплового блока малогабаритного анализатора нуклеиновых кислот.

#### Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 5 работ в научных журналах, включенных ВАК РФ в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

#### Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 127 страницах текста, включая 39 иллюстраций и 5 таблиц. Библиография насчитывает 98 наименований.

### **Содержание работы**

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследуемого вопроса, сформулирована научная проблема, определены объект и предмет исследования.

В первой главе проанализированы основные варианты конструктивных схем исполнительных устройств нагрева и охлаждения и способы описания протекающих в них рабочих процессов.

С целью анализа вариантов конструктивных схем исполнительных устройств нагрева и охлаждения выделены следующие основные элементы, входящие в их состав: объект теплового воздействия – объект, температуру которого необходимо изменять по известному закону; источник подвода (отвода) теплоты – элемент, осуществляющий подвод (отвод) теплоты к объекту воздействия; рабочее тело – среда, выступающая в качестве теплоносителя в процессе передачи теплоты от источника к объекту.

В зависимости от рода используемого рабочего тела выделены пневматические, жидкостные и твердотельные схемы построения исполнительных устройств нагрева и охлаждения. Сопоставление основных достоинств и недостатков выделенных схем позволило обосновать выбор пневматической схемы для построения малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот.

На основании анализа основных конструктивных схем пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения предложена принципиальная схема построения теплового блока малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот, состоящая из следующих основных элементов: электрический нагреватель – источник теплоты; реакционная смесь, располагающаяся в стандартной микропробирке – объект теплового воздействия; воздух окружающей среды – рабочее тело. Управление температурой реакционной смеси обеспечивается регулированием двух параметров: мощности на электрическом нагревателе и расхода рабочего тела в системе.

Для описания рабочих процессов в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения используются два основных подхода:

1. С учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния (закон сохранения массы и энергии для открытой термодинамической системы);
2. С учетом распределенных термодинамических параметров состояния (уравнения сохранения количества движения, массы и энергии для жидких сред, и уравнение теплопроводности для твердых тел).

Сопоставление основных преимуществ и недостатков приведенных способов позволило определить границы их применимости. Использование первого подхода оправдано на начальных этапах исследования для оценки работоспособности системы в целом и определения ее функциональных параметров, а также динамических и энергетических характеристик. Уравнения математической модели с учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния могут быть сведены к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Второй подход предполагает большие объемы вычислительной работы и может быть использован для моделирования процессов сопряженного теплообмена и исследования неравномерности температурного поля реакционной смеси. Уравнения математической модели с учетом распределенных термодинамических параметров состояния представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

На основе проведенного анализа сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена созданию математических моделей и методов расчета рабочих процессов в пневматическом исполнительном устройстве нагрева и охлаждения, представляющем собой тепловой блок малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот.

Создана математическая модель и метод расчета рабочих процессов в пневматической системе с учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния. Расчетная область разбивается на две емкости (рис. 1), каждая из которых представляет собой открытую термодинамическую систему, границы которой проницаемы как для потока вещества, так и для теплового взаимодействия. Емкости соединены друг с другом и с окружающей средой условными проходными сечениями.

Математическая модель построена при следующих допущениях:

- рабочее тело – идеальный газ;
- процесс истечения газа через условные проходные сечения принимается адиабатическим;
- поток газа в системе в каждый момент времени принимается установившимся;
- течение газа в системе происходит без трения.

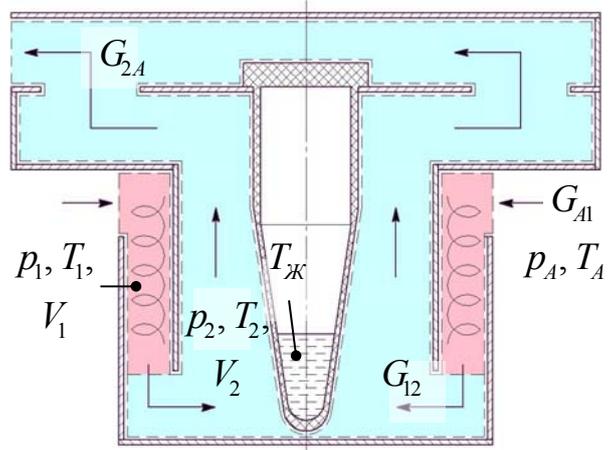


Рис. 1. Расчетная схема

В математической модели приняты следующие обозначения:  $p_A, T_A$  – давление и температура окружающей среды;  $p_1, V_1, T_1$  и  $p_2, V_2, T_2$  – давление, объем и температура рабочего тела в первой и второй емкостях соответственно;  $G_{A1}, G_{12}$  и  $G_{2A}$  – массовый расход рабочего тела через условные проходные сечения;  $f_{A1}, f_{12}$  и  $f_{2A}$  – площади условных проходных сечений;  $T_H, T_P$  и  $T_Ж$  – температуры нагревателя, микропробирки и реакционной смеси;  $Q_1$  – тепловой поток от электрического нагревателя к рабочему телу;  $Q_2$  – тепловой поток от рабочего тела к внешней стенке микропробирки;  $Q_3$  – тепловой поток от внутренней стенки микропробирки к реакционной смеси.

Модель базируется на системе обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени температуры и давления рабочего тела в емкостях, а также температур нагревателя, микропробирки и реакционной смеси (параметры с индексом  $i$  относятся к текущей емкости, с индексом  $j$  – к емкости, из которой натекает рабочее тело, с индексом  $k$  – к емкости, в которую сбрасывается рабочее тело):

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{k}{V_i} \left( RT_j G_{ji} - RT_i G_{ik} + \left( \frac{k-1}{k} \right) Q_i \right);$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{T_i}{p_i V_i} \left( RT_j G_{ji} \left( k - \frac{T_i}{T_j} \right) - RT_i G_{ik} (k-1) + (k-1) Q_i \right);$$

$$\frac{dT_H}{dt} = \frac{P - Q_1}{c_H \cdot m_H}; \quad \frac{dT_P}{dt} = \frac{Q_2 - Q_3}{c_P \cdot m_P}; \quad \frac{dT_Ж}{dt} = \frac{Q_3}{c_Ж \cdot m_Ж},$$

где  $P$  – мощность нагревателя;  $c_H$ ,  $c_{\Pi}$  и  $c_{\mathcal{J}}$  – удельная теплоемкость материала нагревателя, микропробирки и реакционной смеси соответственно;  $m_H$ ,  $m_{\Pi}$  и  $m_{\mathcal{J}}$  – масса нагревателя, микропробирки и реакционной смеси соответственно;  $k$  – показатель адиабаты;  $R$  – газовая постоянная;  $t$  – время.

Также модель содержит замыкающие соотношения для определения расходов рабочего тела через условные проходные сечения и тепловых потоков между элементами устройства:

$$G_{ij} = f_{ij} \mu_{ij} p_i \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_i} \left[ \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}; \quad Q_1 = \alpha_H \cdot S_H \cdot (T_H - T_1);$$

$$Q_2 = \alpha_{\Pi H} \cdot S_{\Pi H} \cdot (T_2 - T_{\Pi}); \quad Q_3 = \alpha_{\Pi \mathcal{J}} \cdot S_{\Pi \mathcal{J}} \cdot (T_{\Pi} - T_{\mathcal{J}}),$$

где  $\mu_{ij}$  – коэффициенты расхода в условных проходных сечениях;  $S_{\Pi H}$ ,  $S_{\Pi \mathcal{J}}$  и  $S_H$  – площадь теплообмена внешней, внутренней стенок микропробирки и нагревателя соответственно.

Коэффициенты теплоотдачи между элементами системы определяются на основании критерия Нуссельта. Тепловое взаимодействие электрического нагревателя и рабочего тела описывается критериальной зависимостью для случая поперечного обтекания пучка тел цилиндрической формы, расположенных в шахматном порядке:

$$\alpha_H = \overline{Nu} \cdot \lambda / d; \quad \overline{Nu} = 0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_i.$$

Тепловое взаимодействие рабочего тела и внешней стенки микропробирки описывается критериальной зависимостью для случая поперечного обтекания одиночного цилиндра:

$$\alpha_{\Pi H} = \overline{Nu} \cdot \lambda / d; \quad \overline{Nu} = (0,43 + 0,55 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38}) \cdot \varepsilon_{\varphi}.$$

Тепловое взаимодействие внутренней стенки микропробирки и реакционной смеси описывается критериальной зависимостью для случая естественной конвекции:

$$\alpha_{\Pi \mathcal{J}} = \overline{Nu} \cdot \lambda / d; \quad \overline{Nu} = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4}.$$

В начальный момент времени температуры элементов системы равны температуре окружающей среды:  $T_1 = T_2 = T_H = T_{\Pi} = T_{\mathcal{J}} = T_A$ . Давление газа в емкостях равно давлению окружающей среды:  $p_1 = p_2 = p_A$ . На внешних границах расчетной области поставлено условие адиабатического теплового взаимодействия:  $Q = 0$ . На входе в расчетную область задан расход рабочего тела:  $G_{A1} = G$ .

Решение полученной системы дифференциальных уравнений представляет собой решение задачи Коши для однородных дифференциальных уравнений первого порядка. Для получения численного решения использовался метод Рунге-Кутты.

Для исследования неравномерности температурного поля реакционной смеси создана математическая модель рабочих процессов в пневматическом исполнительном устройстве нагрева и охлаждения с учетом распределенных термодинамических параметров состояния.

Расчетная область (рис. 2) включает жидкие среды – рабочее тело  $\Omega_1$ , реакционную смесь  $\Omega_2$  и воздух в микропробирке  $\Omega_3$ , и твердые тела – микропробирку  $\Omega_4$ , стенки устройства  $\Omega_5$  и электрический нагреватель  $\Omega_6$ .

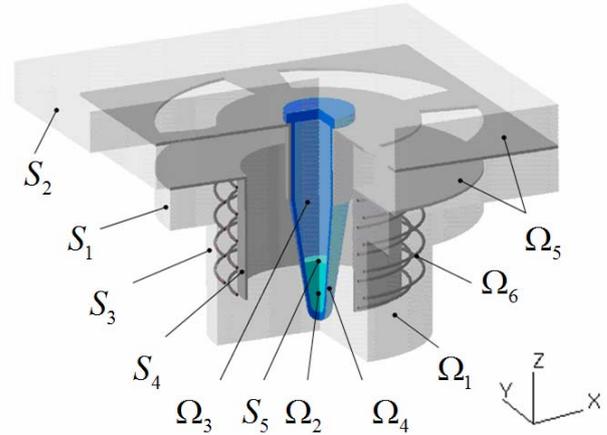


Рис. 2. Расчетная область

В математической модели приняты и обоснованы следующие допущения:

- жидкая среда считается ньютоновской и несжимаемой;
- движение жидкой среды считается ламинарным;
- физические параметры жидкой среды (исключая плотность реакционной смеси и воздуха) и твердых тел считаются независимыми от температуры;
- плотность реакционной смеси и воздуха в микропробирке является линейной функцией температуры (приближение Буссинеска);
- массообмен между реакционной смесью и воздухом отсутствует;
- тепловое излучение от электрического нагревателя отсутствует.

Математическая модель включает следующие уравнения:

- уравнения сохранения количества движения для жидкой среды:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho v u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v v) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho v w) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z; \quad (3)$$

- уравнение сохранения массы для жидкой среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0; \quad (4)$$

- уравнение сохранения энергии для жидкой среды:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + \text{div}(\rho c v T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T); \quad (5)$$

- уравнение теплопроводности для твердого тела:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + S_T, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $u, v, w$  –

скорость в проекциях на оси координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ ;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $S_z$  – член, учитывающий массовые силы, действующие в направлении оси  $z$ ;  $S_T$  – удельная мощность внутренних источников теплоты.

Для подобластей  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$ , соответствующих жидким средам, записываются уравнения конвективного теплообмена (1...5), а для подобластей  $\Omega_4$ ,  $\Omega_5$  и  $\Omega_6$ , соответствующих твердым телам, – уравнение теплопроводности (6). Область определения системы уравнений (1...6) задается положением радиус-вектора в декартовой системе координат  $\mathbf{r}(x, y, z, t)$  или в цилиндрической системе координат  $\mathbf{R}(r, \theta, z, t)$ . Граничные условия сведены в таблицу 1.

В подобласти  $\Omega_1$ , соответствующей рабочему телу, не учитывается свободная конвекция теплоты и, следовательно,  $S_z = 0$ . В подобластях  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$ , соответствующих реакционной смеси и воздуху в микропробирке, учитывается свободная конвекция теплоты в приближении Буссинеска:

$$S_z = \rho_0 (1 - \beta_T (T - T_0)) g,$$

где  $\rho_0$  – плотность жидкой среды при температуре  $T_0$ ;  $\beta_T$  – температурный коэффициент объемного расширения жидкой среды.

В подобластях  $\Omega_4$  и  $\Omega_5$ , соответствующих микропробирке и стенкам устройства, отсутствуют внутренние источники теплоты и, следовательно,  $S_T = 0$ . В подобласти  $\Omega_6$ , соответствующей электрическому нагревателю, происходит выделение теплоты и, следовательно,  $S_T = P/V$ , где  $P$  – мощность на нагревателе,  $V$  – объем нагревателя.

Таблица 1.

Граничные условия

Граница расчетной области	Уравнение движения	Уравнение энергии
Вход ( $S_1$ )	$u(\mathbf{R}) = v(\mathbf{R}) = w(\mathbf{R}) = 0$	$T(\mathbf{R}) = T$
Выход ( $S_2$ )	$\frac{\partial u}{\partial x}(\mathbf{r}) = \frac{\partial v}{\partial x}(\mathbf{r}) = \frac{\partial w}{\partial x}(\mathbf{r}) = 0$	$\frac{\partial T}{\partial x}(\mathbf{r}) = 0$
Внешние границы ( $S_3$ )	$u(\mathbf{r}) = v(\mathbf{r}) = w(\mathbf{r}) = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n}(\mathbf{r}) = 0$
Границы между жидкой средой и твердым телом ( $S_3$ )	$u(\mathbf{r}) = v(\mathbf{r}) = w(\mathbf{r}) = 0$	$T_i(\mathbf{r}) = T_j(\mathbf{r})$
Границы между реакционной смесью и воздухом ( $S_4$ )	$w(\mathbf{r}) = 0$	$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial n}$

В начальный момент времени температуры элементов расчетной области равны температуре окружающей среды, а рабочее тело, реакционная смесь и воздух в микропробирке считаются неподвижными.

Для получения численного решения система нелинейных дифференциальных уравнений (1...6) сводится к системе линейных алгебраических уравнений с помощью метода контрольного объема в

конечно-элементной постановке. Для получения численного решения исходной системы дифференциальных уравнений используется итерационный алгоритм SIMPLE.

Третья глава посвящена численному исследованию рабочих процессов в пневматическом исполнительном устройстве нагрева и охлаждения.

Для исследования влияния мощности на нагревателе и расхода рабочего тела в системе на скорость изменения температуры реакционной смеси различных объемов использовалась математическая модель с учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния. Расход рабочего тела в системе изменялся в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , мощность на нагревателе в диапазоне от 10 Вт до 20 Вт. Объем реакционной смеси в микропробирке составлял от 10 мкл до 30 мкл.

В результате исследований было установлено, что скорость изменения температуры рабочего тела в переходных режимах достигает 15...20 К/с, в то время как скорость изменения температуры реакционной смеси не превышает 1...2 К/с. Увеличение расхода рабочего тела от  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  при одновременном повышении мощности на нагревателе от 10 Вт до 20 Вт приводит к увеличению средней скорости нагрева реакционной смеси от 1,13 К/с до 1,62 К/с для объема реакционной смеси 30 мкл; от 1,28 К/с до 1,82 К/с для объема реакционной смеси 20 мкл; и от 1,46 К/с до 2,07 К/с для объема реакционной смеси 10 мкл.

При помощи математической модели с учетом сосредоточенных термодинамических параметров состояния исследовано изменение мощности нагревателя для осуществления циклического изменения температуры реакционной смеси при постоянном расходе рабочего тела (рис. 3, 4). Объем реакционной смеси принимался равным 20 мкл. Время выдержки на этапах стабилизации составляло 20 с. Температуры 1-го, 2-го и 3-го этапов стабилизации составляли 365 К, 325 К и 346 К соответственно. Для увеличения скоростей изменения температуры в процессе нагрева введен перегрев рабочего тела на 20 К относительно температуры каждого из этапов стабилизации.

В результате исследований определено время одного цикла и время переходных процессов в одном цикле при двух режимах работы устройства (время выдержки на этапах стабилизации составляло 20 с). При расходе рабочего тела  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и мощности на нагревателе 10 Вт время одного цикла составило 155 с, а время переходных процессов в цикле – 95 с. При расходе рабочего тела  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  и мощности на нагревателе 20 Вт эти параметры составили 126 с и 66 с соответственно. Следовательно, увеличение расхода рабочего тела от  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  при одновременном увеличении мощности на нагревателе от 10 Вт до 20 Вт приводит к снижению суммарного времени переходных процессов в режиме циклического изменения температуры в 1,4 раза. Это может привести к недопустимым значениям разброса температур по объему реакционной смеси на этапах стабилизации.

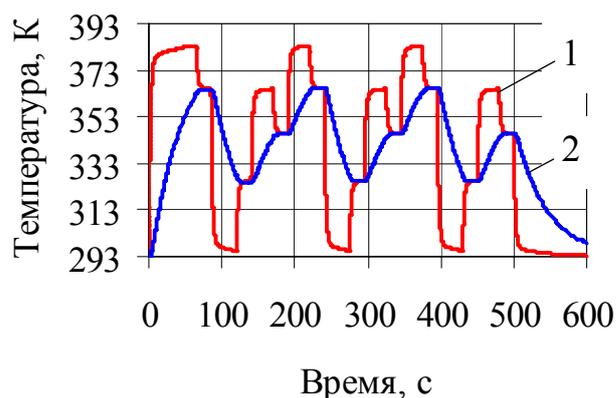


Рис. 3. Температура рабочего тела (1) и реакционной смеси (2) при расходе рабочего тела  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

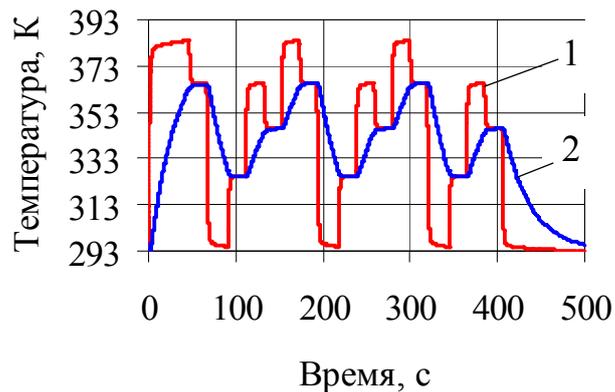


Рис. 4. Температура рабочего тела (1) и реакционной смеси (2) при расходе рабочего тела  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Дальнейшие исследования проводились с использованием математической модели с учетом распределенных термодинамических параметров состояния. Исследовались как переходные процессы, происходящие в различных объемах реакционной смеси в режиме нагрева, так и работа устройства в циклическом режиме.

В результате проведенных исследований получены распределения давления и скорости движения в объеме рабочего тела, реакционной смеси и воздуха в микропробирке, а также распределения температуры в объеме всех элементов расчетной области в каждый момент времени. В качестве примера на рис. 5, 6 и 7 приведены распределения температуры и скорости движения в объеме рабочего тела, реакционной смеси и воздуха в микропробирке на 25-ой секунде нагрева.

Установлено, что уменьшение количества реакционной смеси с 30 мкл до 10 мкл приводит к снижению максимального разброса температуры на 2...3 К. Увеличение скорости нагрева реакционной смеси в 1,4 раза приводит к увеличению максимального разброса температуры по ее объему на начальных этапах нагрева на 0,8...1,7 К; при этом на последующих этапах нагрева наблюдается более равномерное распределение температур по ее объему.

На рис. 8 и 9 приведены зависимости изменения разброса температур по объему реакционной смеси при двух режимах работы устройства (время выдержки на этапах стабилизации составляло 20 с).

При сопоставлении данных, приведенных на рис. 3 и 4, с данными, приведенными на рис. 8 и 9, установлено, что максимальный разброс температуры наблюдается на этапах охлаждения и достигает 9,5 К при расходе рабочего тела  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  (мощность на нагревателе 10 Вт) и 11,5 К при расходе рабочего тела  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  (мощность на нагревателе 20 Вт).

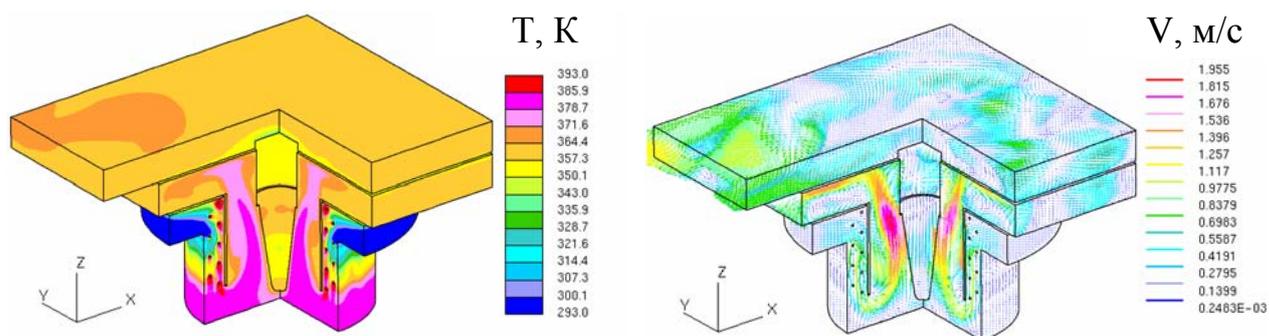


Рис. 5. Распределение температуры и скорости движения в объеме рабочего тела на 25 с нагрева

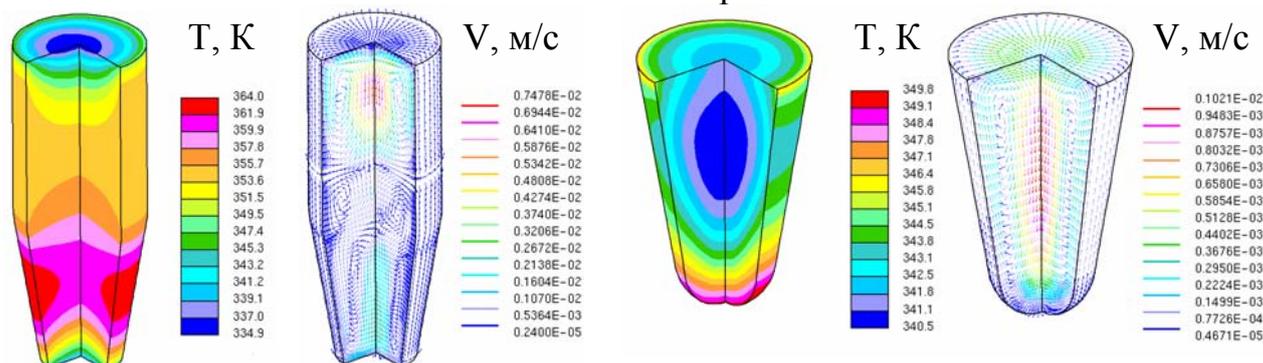


Рис. 6. Распределение температуры и скорости движения в объеме воздуха на 25 с нагрева

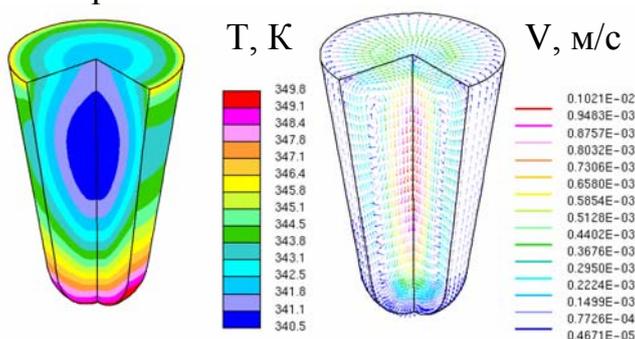


Рис. 7. Распределение температуры и скорости движения в объеме реакционной смеси на 25 с нагрева

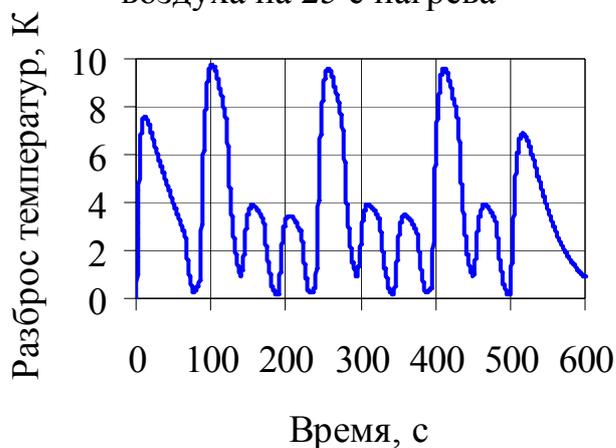


Рис. 8. Изменение разброса температуры в реакционной смеси при расходе рабочего тела  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

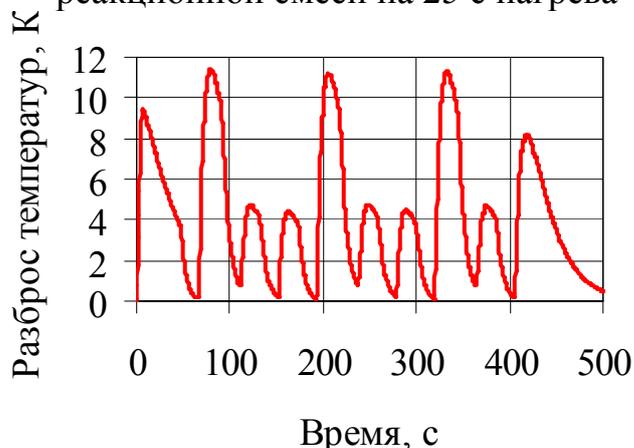


Рис. 9. Изменение разброса температуры в реакционной смеси при расходе рабочего тела  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

На этапах повышения температуры от 325 К до 346 К и от 346 К до 365 К максимальный разброс температур не превышает 3,5...4 К для расхода рабочего тела  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  (мощность на нагревателе 10 Вт) и 4,2...4,5 К для расхода рабочего тела  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  (мощность на нагревателе 20 Вт). При этом на начальных этапах стабилизации разброс температур по объему реакционной смеси достигает 4...8 К, а к концу этапов стабилизации снижается до значений менее 1 К. Следовательно, для снижения разброса температур по объему реакционной смеси минимальная длительность этапов стабилизации должна составлять от 15 с до 20 с.

Для повышения динамических характеристик разрабатываемого устройства предложено интенсифицировать процесс теплопередачи между рабочим телом и реакционной смесью за счет увеличения площади теплообмена путем размещения микропробирок в промежуточном рабочем теле. Для снижения затрат мощности, связанных с нагревом потока рабочего тела, предложено разместить электрический нагреватель непосредственно на промежуточном рабочем теле.

Расчетная область предложенного варианта устройства обладает двумя плоскостями симметрии. Поэтому, для сокращения ее размеров и, как следствие, времени счета предложено исследовать  $\frac{1}{4}$  часть конструкции.

Расчетная область изображена на рис. 10 и включает следующие элементы: рабочее тело  $\Omega_1$ , воздух в микропробирке  $\Omega_2$ , реакционная смесь  $\Omega_3$ , микропробирка  $\Omega_4$ , промежуточное рабочее тело  $\Omega_5$ , электрический нагреватель  $\Omega_6$ .

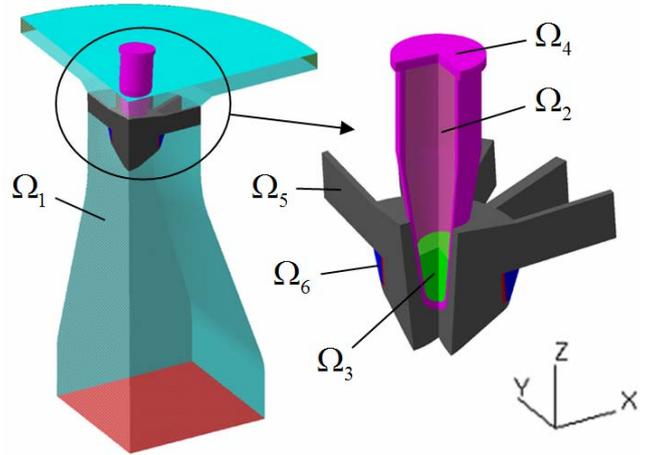


Рис. 10. Расчетная область

Исследования проводились с использованием математической модели с учетом распределенных термодинамических параметров состояния. На этапах нагрева расход воздуха в системе равен нулю, а мощность на нагревателе составляет 30 Вт. На этапах охлаждения мощность на нагревателе равна нулю, а расход воздуха в системе составляет  $9,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Этапы стабилизации температуры составляют 15 с.

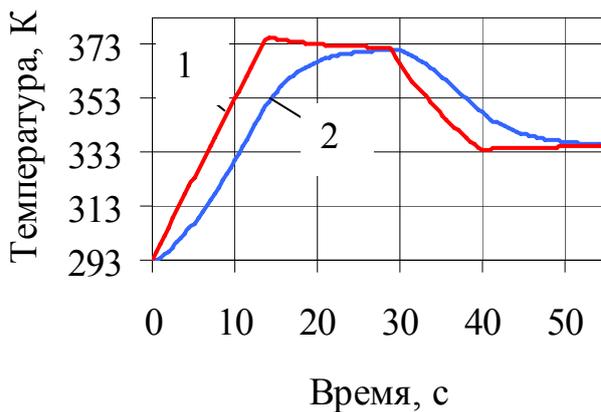


Рис. 11. Изменение среднemasсовой температуры промежуточного рабочего тела (1) и реакционной смеси (2)

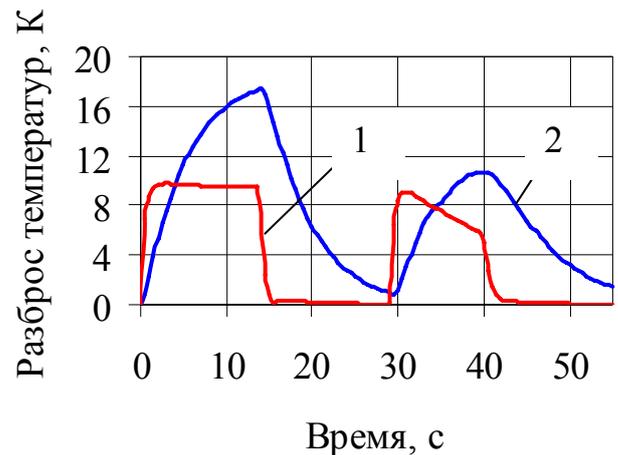


Рис. 12. Изменение разброса температур по объему промежуточного рабочего тела (1) и реакционной смеси (2)

В результате проведенных исследований получены распределения давления и скорости движения в объеме рабочего тела, реакционной смеси и воздуха в микропробирке, а также распределения температуры по объему всех элементов расчетной области в каждый момент времени. После

обработки полученных данных построены зависимости изменения среднемассовой температуры промежуточного рабочего тела и реакционной смеси (рис. 11), а также изменение разброса температур по объему промежуточного рабочего тела и реакционной смеси (рис. 12).

Средняя скорость изменения температуры реакционной смеси может достигать 3...3,5 К/с. Максимальный разброс температур по объему реакционной смеси достигает 12...18 К, при этом к концу этапов стабилизации длительностью 15 с он не превышает 1 К.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию тепловых переходных процессов, протекающих в реакционной смеси. Экспериментальный стенд построен на базе макетного образца малогабаритного пневматического исполнительного устройства нагрева и охлаждения (рис. 13), конструкция которого полностью соответствует расчетной схеме, представленной на рис. 3 и рис. 4. Датчик температуры располагается в тепловом аналоге реакционной смеси (рис. 14). Сигнал с датчика поступает в аналогово-цифровой преобразователь и далее – в ЭВМ. Экспериментальный стенд позволяет в режиме реального времени снимать показания датчика и сохранять полученные результаты в цифровом и графическом виде. Обработка результатов эксперимента показала, что максимальная величина относительной погрешности измерений не превышает 3,5 %.



Рис. 13. Внешний вид экспериментального стенда

Рис. 14. Датчик температуры, расположенный в реакционной смеси

Проведено сопоставление результатов эксперимента с результатами расчетов, полученных с использованием математической модели с учетом распределенных параметров состояния в режиме нагрева реакционной смеси от 20 °С в течение 60 с. Отклонение среднемассовой температуры реакционной смеси, определенной по результатам расчета, от показаний датчика температуры, полученных в результате проведения эксперимента, находится в диапазоне от 10 % до 25 %.

Созданные в диссертации метод и алгоритм расчета пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения внедрены в ИАП РАН в процессе создания тепловых блоков для программируемого, циклического нагрева и охлаждения образцов реакционной смеси.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана при непосредственном участии автора в рамках НИР «Изучение возможности разработки системы выделения ДНК для переносного экспресс-анализатора групповой идентификации микроорганизмов» разработан макетный образец теплового блока высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот для эксплуатации в полевых условиях (рис. 15). В результате предварительных лабораторных испытаний в реальных физических условиях экспериментально подтверждены характеристики устройства, полученные расчетным методом.



Рис. 15. Макетный образец теплового блока анализатора нуклеиновых кислот

### Основные результаты и выводы

1. Созданы математические модели и методы расчета рабочих процессов тепломассопереноса в пневматических исполнительных устройствах нагрева и охлаждения с учетом сосредоточенных и распределенных термодинамических параметров состояния. Первая модель позволяет оценить работоспособность устройства и определить интенсивность переходных процессов, происходящих в реакционной смеси. Вторая модель предназначена для исследования неравномерности температурного поля в объеме реакционной смеси во время работы устройства.
2. На основе созданных математических моделей и методов расчета исследованы переходные процессы в различных объемах реакционной смеси. Установлено, что уменьшение объема реакционной смеси с 30 мкл до 10 мкл приводит к увеличению скоростей изменения температуры реакционной смеси от 1,5 К/с до 2 К/с. При этом максимальный разброс температур по объему реакционной смеси снижается на 1...2 К при средней температуре реакционной смеси 368 К.
3. Проведено исследование работы пневматического исполнительного устройства нагрева и охлаждения в режиме циклического изменения температуры. Установлено, что увеличение расхода рабочего тела в системе от  $1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с до  $2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с при одновременном увеличении мощности на нагревателе от 10 Вт до 20 Вт приводит к снижению времени переходных процессов в одном цикле с 95 с до 60 с. При этом

- максимальный разброс температур по объему реакционной смеси на начальных этапах стабилизации составляет 4...6 К, а к концу этапов стабилизации продолжительностью 20 с снижается до значений менее 1 К.
4. Для повышения динамических характеристик устройства предложено интенсифицировать процесс подвода теплоты к реакционной смеси за счет размещения микропробирок в промежуточном рабочем теле. Проведены численные исследования предложенной конструкции и установлено, что средние скорости изменения температуры реакционной смеси может достигать 3...3,5 К/с, при этом разброс температур по объему реакционной смеси на начальных этапах стабилизации достигает 12...18 К, а к концу этапов стабилизации продолжительностью 15 с снижается до значения менее 1 К.
  5. На базе основных положений диссертационной работы в Институте аналитического приборостроения РАН определены геометрические размеры, законы управления и энергетические параметры элементов теплового блока малогабаритного высокоскоростного анализатора нуклеиновых кислот, предназначенного для проведения количественной полимеразной цепной реакции в реальном масштабе времени в полевых условиях. Данное устройство разрабатывается в России впервые. Макетный образец прошел предварительные лабораторные испытания, принят межведомственной комиссией и рекомендован к опытно-конструкторской разработке.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах**

1. Расчетные исследования пневматической системы стабилизации температуры / А.А. Крутиков, К.Е. Демихов, А.В. Чернышев и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2007. – № 4. – С. 23-32.
2. Чернышев А.В., Крутиков А.А. Моделирование рабочих процессов в элементах пневматических устройств с учетом распределенных параметров // Конверсия в машиностроении. – 2007. – № 4-5. – С. 94-98.
3. Разработка математической модели пневматической системы термостабилизации / А.В. Чернышев, А.А. Крутиков, К.Е. Демихов и др. // Научное приборостроение. – 2006. – Том 16, № 1. – С. 94-106.
4. Моделирование тепловых процессов в ПЦР-смесьях при работе амплификатора ДНК / А.В. Чернышев, О.В. Белова, А.А. Крутиков, В.А. Друца // Технологии живых систем. – 2006. – Том 3, № 3. – С. 3-16.
5. Численное исследование нестационарных тепловых процессов в элементах пневматических систем / А.В. Чернышев, О.В. Белова, А.А. Крутиков и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2007. – № 6. – С. 44-50.