

На правах рукописи
УДК 621.54; 57.088.2

Борисов Юрий Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И СОЗДАНИЕ
ПНЕВМОВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и
пневмосистемы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
А.В.Чернышев

Москва – 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (НИУ) (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана(НИУ)
Чернышев Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Бурмистров Алексей Васильевич,
профессор кафедры "Вакуумной техники
электрофизических установок" ФГБОУ ВО
«КНИТУ»

кандидат технических наук
Крутиков Алексей Александрович,
инженер-конструктор 1 кат. АО ОКБ
«ГИДРОПРЕСС»

Ведущее предприятие:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт аналитическо-
го приборостроения Российской академии
наук

Защита диссертации состоится «29» марта 2017 г. в 16:30 час. на
заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, Лефортовская наб., д.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат в 2 экз., заверенных печатью учреждения, просим
направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5, стр.1
Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «____» 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

М. А. Колосов

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

С каждым годом увеличивается значимость научных исследований в областях, связанных со здоровьем и жизнедеятельностью человека. Необходимость своевременной диагностики организмов на наличие новых вирусов и бактерий, и нахождения лекарства от них, обнаружения источников заражения и способов его распространения отчетливо отражается в направлении развития современных технологий. Задачей анализа образцов продуктов питания, почвы, крови, тканей живых организмов и других является определение содержания тех или иных компонентов в исследуемых материалах. Один из этапов такого анализа – пробоподготовка. Оборудование для подготовки проб является неотъемлемой частью оснащения клинико-диагностических лабораторий (КДЛ), исследовательских центров и лабораторий. Цель пробоподготовки – разрушение образца до такого состояния, которое обеспечит высокую (близкую к 100%) вероятность определения наличия или отсутствия искомых компонентов при дальнейших анализах: микробиологическом, бактериологическом, биохимическом и других. Чаще всего в результате процесса пробоподготовки образуется смесь микроколичества разрушенного образца и значительно большего объема растворителя. Для проведения последующих исследований с необходимой скоростью и точностью получаемого результата, необходимо максимально сократить количество растворителя. Устройства, предназначенные для решения этих задач, называют концентраторами.

Необходимо отметить, что концентраторы растворов используются не только в процессе пробоподготовки, но и широко применяются в лабораторной практике, поэтому основными областями их применения являются: медицина; молекулярная биология; биохимия, пищевая промышленность; химическая промышленность и другие.

Данная работа посвящена разработке метода расчета рабочих процессов и созданию новых пневмовакуумных концентраторов микрообъемов химических растворов.

Начиная с конца прошлого века, ведутся активные работы по разработке подобного оборудования, как в отечественной промышленности, так и за рубежом. Созданием таких устройств занимаются такие фирмы как: Экохим (Россия), Stuart, Techne (Великобритания), Thermo Scientific, Labconco, Genevac (США), Eppendorf (Германия), Labogene (Дания), и другие.

Однако перед разработчиками возникает несколько существенных проблем: методы расчета, описанные в научно-технических источниках, не позволяют определить необходимые для проектирования нового оборудования параметры рабочих процессов. С помощью известных методов невозможно определить влияние потока газа, движущегося в проточной части концентратора, на величину массового потока пара со свободной поверхности жидкости; при изменении параметров побудителя расхода рабочего газа, геометрии и расположения проточной части концентратора скорость испарения жидкости из пробирок может существенно колебаться. Оценка факторов, влияющих на быстродей-

ствие испарительного устройства, является важной задачей для разработчиков нового оборудования; разработчики концентраторов для интенсификации испарения стараются понизить давление в надпробирочной полости или повысить температуру жидкости. Однако применение этих способов может привести к потере или разрушению исследуемой пробы.

Объектом исследования является пневмовакуумная испарительная установка для концентрирования химических растворов.

Предметом исследования являются рабочие процессы, протекающие в пневмовакуумном концентраторе химических растворов и влияющие на скорость и качество концентрирования жидкостей.

Цель работы:

Разработка метода расчета и создание пневмовакуумной установки для концентрирования химических растворов.

Задачи исследования:

1. Разработка классификации и критериев оценки для обоснованного выбора вариантов установки.
2. Разработка метода расчета и математической модели рабочих процессов в установке концентрирования химических растворов, позволяющих определить зависимость массового потока пара со свободной поверхности жидкости от различных параметров.
3. Проведение расчетно-теоретических исследований рабочих процессов в концентраторе химических растворов.
4. Разработка экспериментального стенда, методики проведения эксперимента и проведение экспериментальных исследований испарения жидкости из пробирок для проверки адекватности созданной математической модели.
5. Разработка установки концентрирования химических растворов и внедрение результатов работы.

Научная новизна

1. Впервые разработана классификация и критерии оценки для обоснованного выбора вариантов исполнения установки для концентрирования химических растворов.
2. Впервые разработана математическая модель рабочих процессов в пневмовакуумной установке концентрирования химических растворов.
3. Впервые разработан метод расчета, позволяющий определить зависимость массового потока пара от параметров потока и геометрии концентратора химических растворов.
4. Впервые получены результаты расчетно-теоретических исследований с использованием созданных метода расчета и математической модели рабочих процессов в пневмовакуумном концентраторе химических растворов: распределение скоростей течения газа в проточной полости устройства, толщину зоны градиента концентрации паров, зависимость массового потока пара от скорости и давления газа на входе в концентратор, геометрии проточной части устройства.

5. Разработаны экспериментальный стенд, методика и проведены экспериментальные исследования рабочих процессов в концентраторе химических растворов, подтвердившие адекватность разработанной математической модели рабочих процессов в концентраторе химических растворов.

Практическая ценность

1. Разработан метод расчета рабочих процессов, протекающих в пневмовакуумном концентраторе химических растворов, который может быть использован при проектировании новых устройств, а также для модернизации и улучшении работы уже созданных.
2. Проведенные исследования процессов испарения со свободной поверхности позволяют выбрать принципиальную схему нового устройства, которая наиболее подходит для использования в тех или иных условиях эксплуатации.
3. Результаты работы использованы при выполнении НИР «Создание научной базы разработки вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования с применением методов быстрого прототипирования (Шифр ГБ3301сп) и НИР «Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов в устройствах систем пробоподготовки для анализа ДНК методом ПЦР» (Шифр ГЭ3302сп) в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва.
4. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ЗАО «Синтол», г. Москва в процессе проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по разработке роботизированного комплекса для молекулярно-генетических исследований и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, что подтверждено актами о внедрении.

Достоверность полученных данных подтверждена сравнением результатов расчетно-теоретических исследований с экспериментальными данными, опубликованными в открытых источниках литературы и данными, полученными при испытании устройств концентрирования химических растворов.

Положения, выносимые на защиту

Метод расчета и математическая модель рабочих процессов в пневмовакуумном концентраторе химических растворов. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований рабочих процессов в пневмовакуумном концентраторе химических растворов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и выставках:

Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2011,2012,2013,2014,2015 гг.);

Вторая и Шестая научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов, студентов, творческой молодежи профильных предприятий и организаций, посвященная 70-летию ОмГТУ. (Омск, 2012, 2016 гг.);

(VI и VII)Международная научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья» (Португалия, 2013 г., Крым, 2015 г.);

Экспериментальный образец установки концентрирования химических растворов, экспонировался на выставках:

Молодежная научно-инженерная выставка «Политехника». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.; XIV Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи. Москва, ВВЦ, 2014 г.

В 2012 и 2013 гг. результаты исследований вошли в работы, награжденные дипломом I степени в конкурсе научно-исследовательских работ студентов и аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана

В 2013 г. пневмовакуумная установка для концентрирования химических растворов была награждена дипломом II степени в номинации «Технологии в машиностроении и приборостроении» на молодежной научно-инженерной выставке «Политехника».

По результатам работы разработана новая установка концентрирования химических растворов, получены 3 патента РФ на полезную модель различных исполнений данной установки.

Личный вклад автора заключается в разработке метода расчета и создание математической модели рабочих процессов в пневмовакуумных концентраторах химических растворов; проведении расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, создании экспериментального стенда и методики проведения эксперимента; разработке нового устройства для концентрирования жидкостей.

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 13 научных работ. Из них 3 работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, общим объемом 4,1 п. л.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 117 страницах текста, включая 44 иллюстрации и 7 таблиц. Библиография насчитывает 113 наименований.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность работы, определены объект и предмет исследования.

В первой главе приведен обзор методов концентрирования химических растворов с выделением наиболее подходящего для микрообъемов жидкости. Приведены общие сведения об установках концентрирования химических растворов, в частности установках с дистилляционным принципом действия, и их основных характеристиках. Подробно рассмотрен вопрос математического описания рабочих процессов, протекающих в концентраторах растворов, и представлены определяющие их расчетные зависимости. Определены основные

факторы, влияющие на рабочие процессы в концентраторах химических растворов.

Обзор методов концентрирования растворов показал, что наиболее подходящим методом концентрирования микроколичеств химических, биологических и молекулярно-биологических образцов является метод выпаривания (дистилляционный метод концентрирования).

Дистилляционный метод концентрирования химических растворов реализован в центрифужных, роторных и пневматических концентраторах растворов. Анализ требований, предъявляемых пользователями к оборудованию для концентрирования химических растворов, а также типов концентраторов, позволил сформулировать критерии оценки для выбора концентраторов жидкости и показал, что ни один из существующих типов установок для концентрирования химических растворов не удовлетворяет этим требованиям.

Проведенный обзор научно-технической литературы показал отсутствие в открытых источниках печати методов расчета рабочих процессов в установках концентрирования химических растворов, что существенно затрудняет процесс создания нового оборудование для этих целей.

Рабочим процессом, определяющим эффективность работы концентраторов химических растворов, является испарение жидкости при взаимодействии с потоком рабочего газа в проточной части устройства под действием перепада давления.

Анализ существующих конструкций, а также изучение алгоритмов и методов проведения работ в специализированных лабораториях позволил сформулировать основные требования, предъявляемые пользователями к оборудованию для концентрирования:

1. возможность концентрирования проб объемом менее 2 мл, расположенных в выпускаемых на текущий момент пробирках;
2. обеспечение низкой вероятности перекрестного загрязнения (кросс-контаминации) одновременно концентрируемых образцов;
3. высокая скорость испарения растворителя из образца;
4. отсутствие существенной потери исследуемого образца (более 20%);
5. возможность управления температурой пробы;
6. возможность концентрирования различного количества проб;
7. компактность установки; возможность автономного использования установки (в полевых условиях).

Наиболее важными критериями при выборе оборудования являются время выпаривания жидкости из раствора, вероятность перекрестного загрязнения и потери образца. Для повышения эффективности концентрирования химических растворов с помощью концентраторов жидкости проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов, протекающих в рабочих ячейках данных установок.

Обзор теории и методов рабочих процессов в установках для концентрирования химических растворов (диффузия пара в воздух, течение рабочего газа в камере, теплообмен между рабочей жидкостью и стенками пробирки) позволил определить основные зависимости, описывающие данные процессы. Обзор

работ, посвященных проблемам испарения жидкости в газовую среду, показал невозможность применения существующих методов к определению параметров работы концентраторов жидкости.

На основе анализа состояния вопроса исследования рабочих процессов в установках для концентрирования химических растворов сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели рабочих процессов в концентраторе химических растворов – модели испарения жидкости при взаимодействии с потоком рабочего газа.

Область протекания рабочих процессов в установке концентрирования химических растворов, состоящая из входной камеры 2 и направляющей трубы 1, которые образуют цилиндрические и кольцевые каналы, сообщающиеся с областью смешения 3, а также терmostатирующего устройства 4 представлена на Рисунке 1.

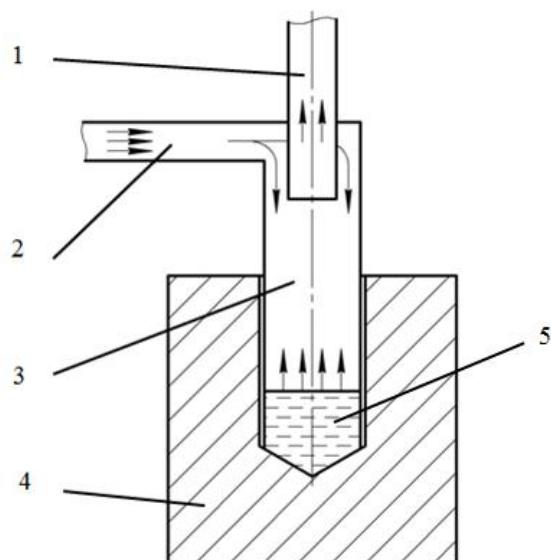


Рисунок 1. Схема концентратора жидкостей.

1 – направляющая трубка, 2 – входная камера, 3 – область смешения, 4 – термостатирующее устройство, 5 – область жидкости.

Для моделирования рабочих процессов использование общей рабочей области (Ω_1) (Рисунок 2,а) является трудоемкой задачей, решение которой необходимо только на стадии оценки работоспособности всего изделия в целом. Поэтому в качестве расчетной области для проведения основного объема расчетно-теоретических исследований была выбрана ячейка, рассматриваемая для описания отдельно течения рабочего газа (Ω_2) (Рисунок 2,б) и испарения жидкости со свободной поверхности (Ω_3) (Рисунок 2,в).

Расчетная область, включающая одну ячейку концентратора химических растворов, используется для описания математической модели течения рабочего газа. На Рисунке 3 показано сечение расчетной области вдоль оси симметрии рабочей ячейки.

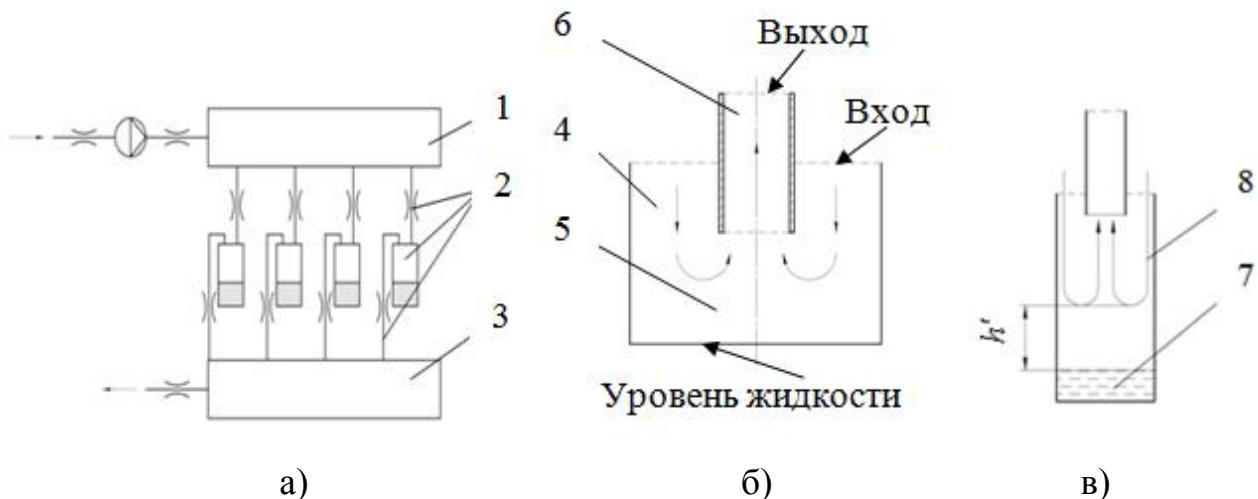


Рисунок 2. Расчетные области математической модели: а – общая расчетная область (Ω_1), б – область одной ячейки для описания течения рабочего газа (Ω_2), в – область одной ячейки для описания испарения жидкости (Ω_3).

1 – проточная часть входной камеры, 2 – пневмосистема, 3 – проточная часть выходной камеры, 4 – подводящий кольцевой канал, 5 – поворотная камера, 6 – отводящий цилиндрический канал, 7 – жидкость, 1 – поток рабочего газа.

Описание процессов течения рабочего газа, испарения жидкости и смешения потоков пара и рабочего газа в данной области позволяет определить основные параметры, необходимые для проектирования пневмовакуумной установки для концентрирования химических растворов.

Размеры пробирок, используемых в существующих установках для концентрирования химических растворов, определяют внешние геометрические размеры расчетной области (объем пробирки 2,0 мл, внутренний диаметр 10 мм). На Рисунке 3 показаны также основные геометрические параметры расчетной области: h – расстояние между межфазной границей и срезом направляющей трубы, d_2 – диаметр направляющей трубы, d_4 – внутренний диаметр пробирки.

В математической модели принимаются следующие допущения:

- рабочий газ не содержит примесей;
- рабочий газ несжимаем (плотность ρ не зависит от давления);
- температура на входе в расчетную область постоянна;
- процесс испарения рассматривается как квазистационарный;
- поверхность раздела фаз полупроницаема;
- на стенах направляющей трубы и пробирки не конденсируется жидкость;
- для моделирования турбулентного режима течения применяется модель турбулентности Ментера (SST).

Для описания процесса течения рабочего газа в расчетной области используется система уравнений:

1. Уравнения движения Навье-Стокса в стационарной постановке для рабочего газа с учетом несжимаемости рабочей среды:

$$\begin{aligned}
 u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u_x), \\
 u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u_y), \\
 u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u_z),
 \end{aligned}$$

где p – давление газа, u – скорость течения газа, μ – динамическая вязкость газа, g – ускорения свободного падения.

2. Уравнение неразрывности потока рабочего газа:

$$\operatorname{div} u = 0.$$

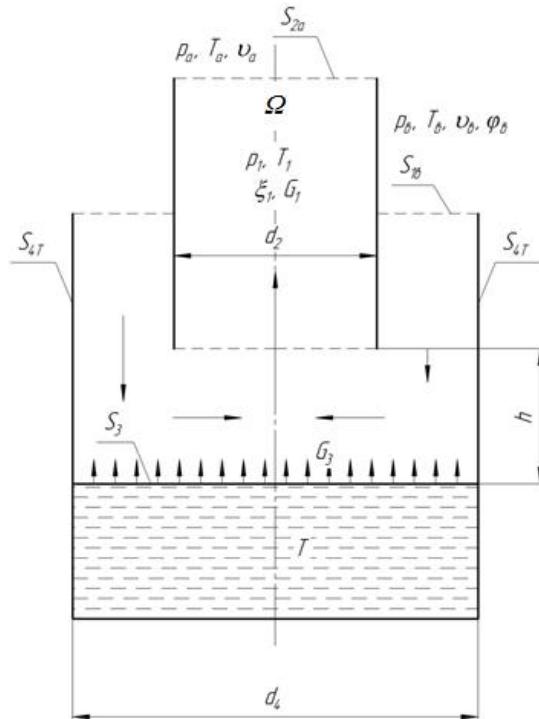


Рисунок 3. Сечение расчетной области математической модели.

Ω – область парогазовой смеси;

S_{2b} , S_{2a} , S_{4T} , S_3 – границы входа, выхода, с окружающей средой и межфазная граница.

3. Уравнение сохранения энергии для газа в пневмосистеме с учетом отсутствия внутренних источников тепла в стационарной постановке для несжимаемой жидкости:

$$\operatorname{div}(T \vec{u}) = a \operatorname{div}(\operatorname{grad} T),$$

где $a = \lambda / (\rho c_p)$ – коэффициент температуропроводности.

4. Для описания течения газа при турбулентном режиме используется модель Ментера:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{P}_k + G_b - \beta^* \rho \omega k,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\alpha}{\nu_t} P_k - \beta^* \rho \omega^2 + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Для описания процесса испарения жидкости используется уравнение диффузии в движущейся среде:

$$\frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial c_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D \frac{\partial c_y}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D \frac{\partial c_z}{\partial z}) = u_x \frac{\partial c_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_z}{\partial z},$$

где D – коэффициент диффузии, c – концентрация паров жидкости.

Математическая модель дополняется граничными условиями, определяющими решение системы уравнений математической модели.

На входе в расчетную область Ω_1 задается постоянное давление и температура газа (граничное условие 1 рода):

$$p_{\text{вх}\Omega_1} = p_{in} = \text{const},$$

$$T_{\text{вх}\Omega_1} = T_{in} = \text{const}.$$

На выходе из расчетной области Ω_1 задается постоянное давление рабочего газа (граничное условие 1 рода):

$$p_{\text{вых}\Omega_1} = p_{out} = \text{const}.$$

На поверхностях стенок расчетной области Ω_1 скорость течения газа считается равной 0:

$$u_{cm\Omega_1} = u_{wall} = 0.$$

Границные условия для расчетной области Ω_2 совпадают с граничными условиями для расчетной области Ω_1 , что подтверждено в результате численного расчета течения газа в проточной части концентратора жидкостей, приведенного в Главе 3:

$$p_{\text{вх}\Omega_2} = p_{\text{вх}\Omega_1},$$

$$p_{\text{вых}\Omega_2} = p_{\text{вых}\Omega_1},$$

$$T_{\text{вх}\Omega_2} = T_{\text{вх}\Omega_1},$$

$$u_{cm\Omega_2} = 0.$$

Для расчетной области Ω_3 граничными условиями будут являться содержание паров жидкости в рабочем газе, температура рабочего газа, температура испаряемой жидкости, толщина зоны градиента концентрации:

$$\varphi = \text{const},$$

$$T_e = T_{e\Omega_2}(x, y, z),$$

$$T_{\infty} = \text{const},$$

$$h' = h'(x, y).$$

Значения температуры газа и толщины зоны градиента концентрации определяется из результатов численного расчета течения рабочего газа в расчетной области Ω_2 .

Для решения составленной системы дифференциальных уравнений дополненных граничными условиями используется метод контрольных объемов на основе итерационных методов решения (SIMPLE алгоритмов).

Третья глава посвящена разработке метода расчета и проведению расчетно-теоретических исследований рабочих процессов, протекающих в пневмокуумном концентраторе химических растворов.

Метод расчета рабочих процессов заключается в условном разделении процессов течения рабочего газа и процессов испарения жидкости со свободной поверхности и определении взаимного влияния одного процесса на другой. Для определения зависимости массового потока пара со свободной поверхности жидкости от функциональных и геометрических параметров установке было выполнено три этапа.

На первом этапе с применением численных методов определяется значение толщины зоны градиента концентрации в зависимости от параметров установки. На втором этапе определяются коэффициенты, входящие в состав уравнений, описывающих испарение жидкости в газовую среду. На третьем этапе с использованием данных, полученных на предыдущих этапах, определяется значение полного массового потока пара.

Расчетно-теоретические исследования расчетной области всего устройства позволили определить распределение скоростей и давлений рабочего газа в проточной полости устройства и позволили подтвердить правомерность использования для дальнейших расчетов только одной ячейки. Результаты расчета для давления $p_{ex} = 100,2$ кПа и температуры $T_{ex} = 298$ К рабочего газа на входе в расчетную область представлены на Рисунке 4. Равномерность распределения давлений в поперечном сечении цилиндрической области (максимальный перепад давлений не превышает 10 Па), относящейся к внутри пробирочному пространству, полученное при расчетно-теоретических исследований позволяет считать обоснованным рассмотрение при дальнейших исследованиях расчетной области Ω_2 .

В работе обоснованно применение сегмента расчетной области Ω_2 и выбора степени дискретизации (50000 элементов) для проведения расчетно-теоретических исследований, который позволяет детально описать процесс течения газа в рабочей ячейке.

В результате численных исследований определены характеристики течения рабочего газа в расчетной области при различных геометрических параметрах, а также определена зависимость толщины зоны градиента концентрации от параметров потока рабочего газа. На Рисунке 5 представлено распределение скоростей газа в расчетной ячейке, при различных значениях перепада давления на ее границах.

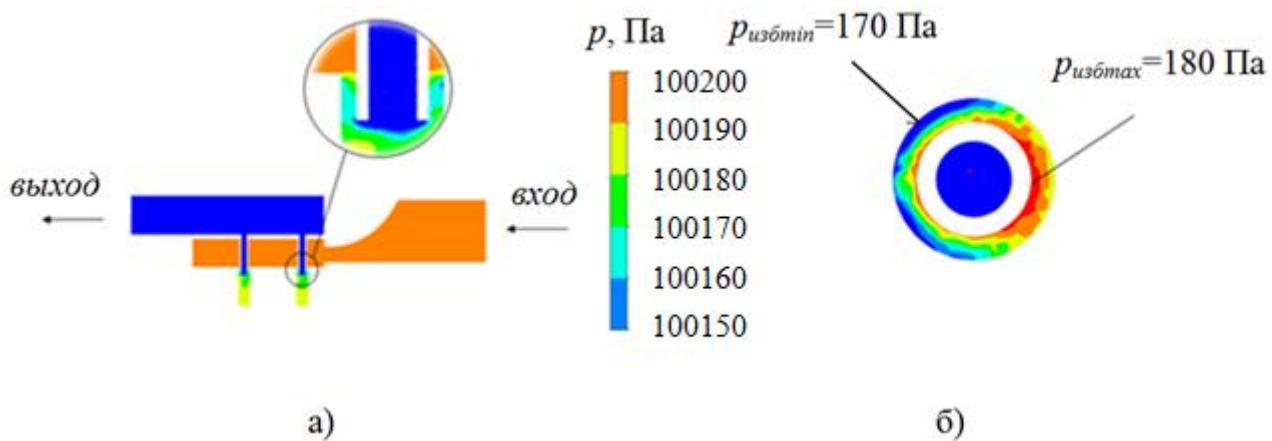


Рисунок 4. Распределение давлений: а – в проточной полости устройства, б – в кольцевом канале на входе в пробирочную область.

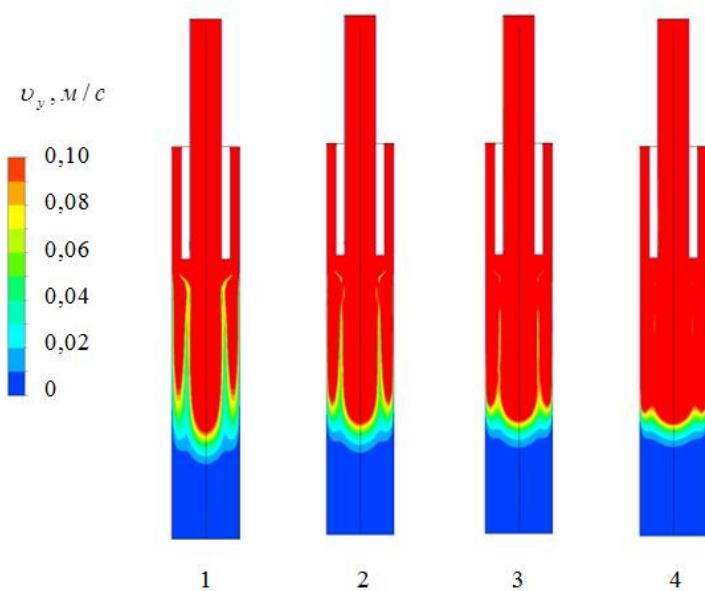


Рисунок 5. Распределение проекций скорости течения газа при различном перепаде давления (1 - $\Delta p = 100$ Па ; 2 - $\Delta p = 200$ Па ; 3 - $\Delta p = 400$ Па ;4 - $\Delta p = 1000$ Па).

Анализ данных расчетно-теоретических исследований позволил определить, что максимальное значение скорости течения газа в рабочей ячейке достигается при соотношении площадей входного и выходного сечения в диапазоне от 0,8 до 1,5.

В результате численных исследований определена зависимость объема жидкости в пробирке от времени испарения (Рисунок 6), что позволяет определить время концентрирования определенного объема раствора. Например, время испарения 2 мл этилового спирта из цилиндрической пробирки с внутренним диаметром 10 мм при комнатной температуре определенное расчетным путем составило 75 мин.

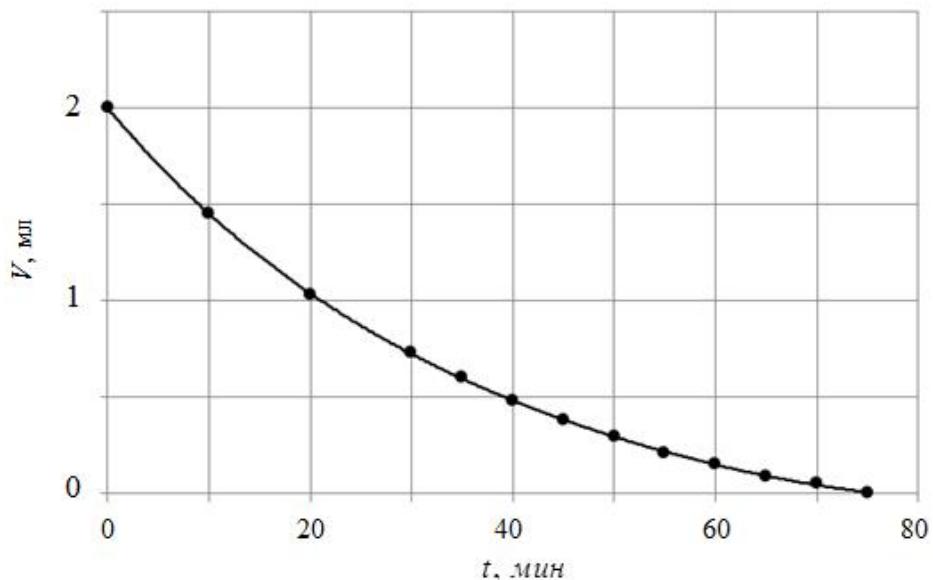


Рисунок 6. Зависимость объема этилового спирта в пробирке от времени испарения ($T = 298$ К).

В заключение третьей главы описан процесс выбора геометрических параметров опытного образца пневмовакуумного концентратора химических растворов и его разработки и изготовления.

В четвертой главе описано проведение экспериментальные исследования рабочих процессов, протекающих в пневмовакуумном концентраторе химических растворов. Целью экспериментальных исследований является подтверждение адекватности составленной математической модели процессам в концентраторе жидкостей.

Экспериментальные исследования проводились на созданном в рамках данной работы экспериментальном стенде, включающем в себя разработанный и изготовленный опытный образец пневмовакуумной установки для концентрирования химических растворов и необходимые для проведения измерений средства контроля, визуализации и измерения. Схема данного стенда представлена на Рисунке 7.

Для определения зависимости полного потока массы пара J от расстояния между межфазной границей и срезом направляющей трубы h при различных значениях температуры жидкости T и скорости рабочего газа u разработана методика проведения эксперимента. Для определения потока массы пара замерялось количество испарившейся жидкости за определенный промежуток времени с применением высокоточных весов для измерения микромасс PS-20.

Полученные в результате проведения экспериментальных исследований данные обрабатываются путем поиска выбросов с применением метода наименьших квадратов, а также оценивается приборная и случайная погрешности эксперимента.

На Рисунке 8 представлены экспериментальные зависимости, полученные при испарении дистиллированной воды в поток воздуха с относительной влажностью 40%, вызванный перепадом давления $\Delta p = 300$ Па. Экспериментальная

зависимость показывает уменьшение массового потока пара при отдалении межфазной границы от среза трубы, что соответствует результатам численного исследования.

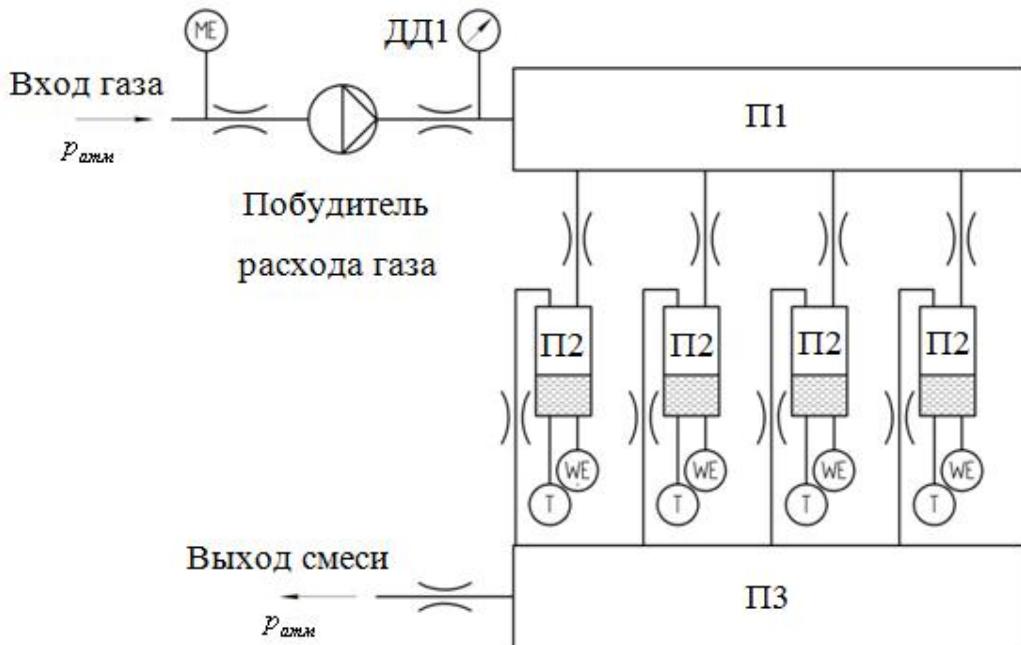


Рисунок 7. Схема экспериментального стенда.
П1 – входная полость, П2 – полость смешения, П3 – выходная полость.

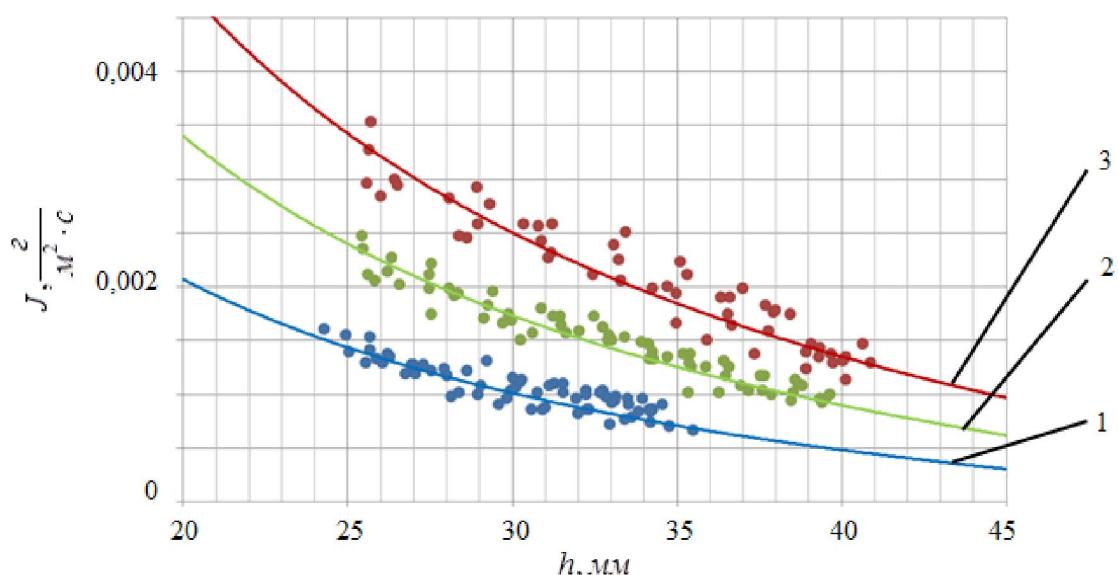


Рисунок 8. Зависимость полного потока массы паров дистиллированной воды от параметра h (1 – $T = 298$ K; 2 - $T = 308$ K; 3 - $T = 318$ K).

Для проверки адекватности математической модели при концентрировании жидкости, пары которой практически отсутствуют в воздухе, экспериментальные исследования проводятся с использованием этилового спирта.

На Рисунке 9 представлены экспериментальные зависимости, полученные при испарении этилового спирта в поток воздуха, вызванный перепадом давления $\Delta p = 300$ Па .

В четвертой главе приведены сведения о разработке новой конструкции пневмовакуумной установки концентрирования химических растворов и концентрировании с ее помощью рабочих растворов.

На основе данных численного расчета математической модели получено конструктивное исполнение пневмовакуумной установки для концентрирования химических растворов, которое было защищено патентом Российской Федерации на полезную модель №149825. Значение избыточного давления и расход, создаваемые побудителем расхода газа в данной установке, определяются таким образом, чтобы значение скорости потока рабочего газа на входе в кольцевой канал находилось в диапазоне от 10 до 15 м/с. Меньшее значение скорости соответствует максимальному заполнению пробирки жидкостью (2 мл), большее – исходному объему жидкости менее 1 мл. При создании пневмовакуумной установки для концентрирования химических растворов на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Рисунок 10) были применены аддитивные технологии.

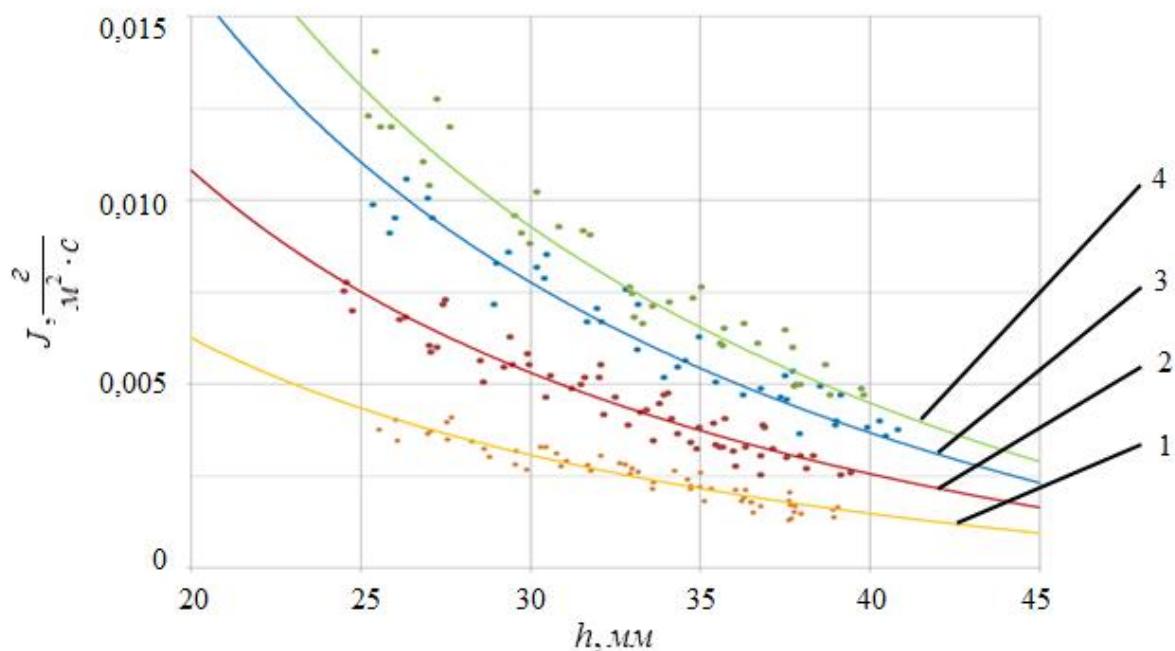
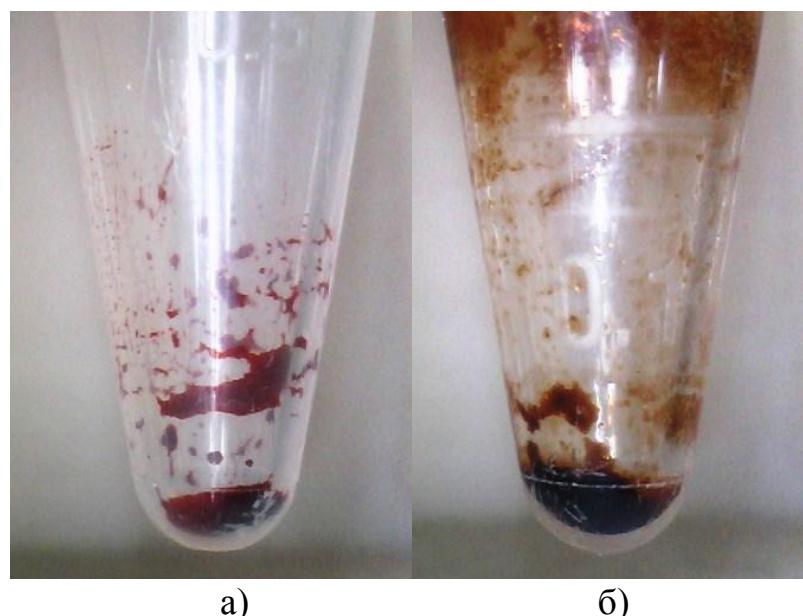


Рисунок 9. Зависимость полного потока массы паров этилового спирта от параметра h (1 – $T = 298$ K; 2 - $T = 308$ K; 3 - $T = 318$ K; 4 - $T = 323$ K).

Для подтверждения эффективности созданного в данной работе прибора при концентрировании рабочих растворов экспериментальные исследования были проведены на образцах, полученных в ЗАО «Синтол». Для этого в рабочей полости концентратора был размещен цифровой микроскоп MAN 1011 и проведена съемка процесса испарения жидкости из пробирок в реальном времени. Проведено концентрирование раствора объемом около 0,5 мл содержащего флуоресцентный зонд меченный красителем FAM с использованием тушителя BHQ1 и препарата, представляющего собой настой трав в водно-спиртовом растворе. Вид сконцентрированных проб представлен на Рисунке 11.



Рисунок 10. Пневмовакуумная установка концентрирования химических растворов.



а)

б)

Рисунок 11. Сконцентрированная проба: а – флуоресцентный зонд с красителем FAM и тушителем BHQ1, б – водно-спиртовой настой трав.

Результаты данной работы внедрены на предприятии Закрытое Акционерное Общество “Синтол” (г. Москва) в процессе проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по разработке роботизированного комплекса для молекулярно-генетических исследований и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва), что подтверждено актами о внедрении.

Основные результаты и выводы

1. Впервые разработана классификация и критерии оценки для обоснованного выбора вариантов исполнения установки для концентрирования химических растворов.
2. Впервые разработаны метод расчета и математическая модель рабочих процессов, протекающих в пневмовакуумной установке концентрирования.

ния химических растворов, позволяющие описывать параметры течения рабочего газа в проточной полости концентратора и определять значение массового потока пара, удаляемого из пробирки.

3. Созданы методика проведения эксперимента, экспериментальный стенд и проведены экспериментальные исследования рабочих процессов в установке концентрирования химических растворов. Экспериментальные исследования позволили определить значения массового потока пара удаляемого рабочим газом из пробирок и подтвердить адекватность составленной математической модели. Максимальная относительная погрешность экспериментального значения массового потока пара не более 7%.

4. На основе разработанного метода расчета рабочих процессов впервые проведены расчетно-теоретические исследования, которые позволили получить зависимости массового потока пара жидкости от геометрических параметров установки (относительная ширина кольцевого канала s , глубина погружения направляющей трубки) и параметров потока газа (скорости течения газа на входе в пробирку, давление рабочего газа на входе в пробирку и др.). Определены геометрические размеры установки концентрирования химических растворов, позволяющие получить высокие скорости испарения жидкости.

5. Разработана пневмовакуумная установка концентрирования химических растворов. Получен патент Российской Федерации на полезную модель установки.

6. Результаты работы внедрены на предприятии ЗАО «Синтол», г. Москва в процессе проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по разработке роботизированного комплекса для молекулярно-генетических исследований и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

1. Борисов Ю.А., Чернышев А.В., Полынков А.В. Исследование процесса двухфазного течения смеси в установке вакуумной сепарации ДНК Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/756.html> (1,0 п.л./0,9 п.л.)

2. Борисов Ю.А., Чернышев А. В. Вакуумный концентратор микробъемов жидкости. // Медицинская техника. 2015, №4. С. 44-47. (0,6 п.л./0,5 п.л.)

3. Пугачук А. С., Борисов Ю. А., Чернышев А. В. Экспериментальное определение коэффициентов гидравлического сопротивления рабочих ячеек установок вакуумной сепарации // Научное приборостроение. 2015, №4. С. 25-30. (0,7 п.л./0,5 п.л.)

4. Борисов Ю.А., Чернышев А.В. Исследование процессов парообразования в элементах компрессорной техники и пневмосистем // Компрессорная техника и пневматика. 2015, №6. С. 41-44. (0,6 п.л./0,5 п.л.)