

На правах рукописи

**УДК 533.599; 57.088.3**

Пугачук Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
И СОЗДАНИЕ ПНЕВМОВАКУУМНОЙ  
УСТАНОВКИ СЕПАРАЦИИ ДНК**

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 – 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана  
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  
научное учреждение «Всероссийский  
научно-исследовательский институт  
сельскохозяйственной биотехнологии»

Защита диссертации состоится «26» \_октября\_ 2016 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 ФГБОУ ВПО  
«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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент



М. А. Колосов

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследования

На сегодняшний день в технике широко используются пневмовакuumные установки сепарации, в том числе в сфере технологий живых систем. В этой сфере, в частности в области молекулярной диагностики, требуется получение информации, содержащейся в дезоксирибонуклеиновых кислотах (ДНК), что необходимо для выявления видовой принадлежности, идентификации личности, генетических, вирусных заболеваний и др. Вирусные заболевания приводят к отклонениям в структуре ДНК и могут быть обнаружены с помощью молекулярно-генетических исследований. Наиболее распространенным методом проведения молекулярно-генетических исследований является метод полимеразной цепной реакции (ПЦР).

Метод ПЦР имеет высокие показатели эффективности, чувствительность и специфичность, однако его реализация невозможна без предварительной очистки биопробы – раствора, содержащего исследуемую ДНК – от примесей других органических и неорганических структур. Очистка и выделение ДНК из первичного исследуемого раствора проводятся на одном из важнейших этапов исследования – этапе пробоподготовки. Выделение ДНК на этапе пробоподготовки осуществляется различными методами. Одним из наиболее эффективных является сорбционный метод – метод вакуумной сепарации. В данном методе с помощью установок вакуумной сепарации (УВС) реализуется течение пробы через рабочие ячейки, содержащие порошок диоксида кремния, под действием перепада давления между атмосферным давлением и давлением ниже атмосферного, созданным внутри рабочей полости. В существующих УВС имеется ряд недостатков, связанных с неравномерностью протекания рабочих процессов, что приводит к нестабильности качества очистки проб. Для повышения эффективности выделения ДНК необходима разработка нового оборудования.

Разработка пневмовакuumной установки сепарации ДНК – эффективной установки вакуумной сепарации ДНК, предназначенной для подготовки проб к молекулярно-биологическим исследованиям, связана с высокими финансовыми и временными затратами. Проектирование нового оборудования для пробоподготовки требует проведения большого числа экспериментальных исследований. Проведение экспериментальных исследований не позволяет в полной мере получить информацию о рабочих характеристиках, необходимых при разработке новых установок вакуумной сепарации. Обзор литературы показал, что методы расчета рабочих процессов в УВС ДНК на сегодняшний день отсутствуют. Таким образом, разработка и обоснование метода расчета рабочих процессов в УВС, проведение расчетно-теоретических исследований и создание на их основе пневмовакuumной установки сепарации ДНК являются актуальными задачами научного исследования.

Объектом исследования является установка вакуумной сепарации ДНК.

Предметом исследования являются рабочие процессы, протекающие в рабочей полости УВС, и определяющие их технические и эксплуатационные характеристики.

### Цель работы:

Разработка метода расчета рабочих процессов, протекающих в УВС, и создание пневмовакuumной установки сепарации ДНК

### Задачи исследования:

1. Разработка метода расчета и математической модели рабочих процессов в установках вакуумной сепарации ДНК.
2. Создание методики проведения эксперимента, экспериментального стенда и проведение исследований рабочих процессов в установках вакуумной сепарации.
3. Проведение численных исследований рабочих процессов в УВС и проверка адекватности математической модели.
4. Проведение расчетно-теоретических исследований рабочих процессов в УВС на основе разработанной математической модели.
5. Разработка пневмовакuumной установки сепарации ДНК.

### Научная новизна

1. Впервые применительно к установкам вакуумной сепарации разработан метод расчета рабочих процессов, включающий математическую модель двухфазного течения рабочей среды через пористое тело, с учетом распределенных параметров в рабочей полости блока вакуумной сепарации. Разработанный метод расчета позволил провести детальный анализ рабочих процессов в УВС при различных режимах работы, что невозможно реализовать с использованием экспериментальных методов исследования.
2. Впервые получены расходные характеристики движения рабочей среды при течении ее через ячейки типового 96-луночного планшета очистки и определен статистический разброс гидравлических сопротивлений (коэффициентов проницаемости) пористых тел внутри ячеек.
3. Впервые определены гидродинамические параметры взаимодействия рабочей среды с элементами типового 96-луночного планшета очистки: коэффициенты проницаемости материала пористого тела ячеек, коэффициент пористости материала пористого тела и краевой угол смачивания материала планшета очистки.
4. Впервые проведено расчетно-теоретическое исследование рабочих процессов в блоке вакуумной сепарации, позволившее получить картины распределения основных определяющих параметров течения, оценить неравномерность поля давлений в рабочей полости установки и перепад давления, при котором происходит смена режима течения в области каплеобразования под рабочей ячейкой между капельным и струйным.
5. Предложена новая конструкция пневмовакuumной установки сепарации растворов ДНК, параметры которой получены на основе численного исследования рабочих процессов, позволившего повысить эффективность ее работы.

### Практическая ценность

1. Разработан метод расчета рабочих процессов в установках вакуумной сепарации ДНК, позволяющий сделать разработку новых установок более эффективной, снизить затраты времени и средств на разработку благодаря проведению численного исследования на начальных этапах проектирования. Разработанный метод расчета позволяет проектировать новые более эффективные установки вакуумной сепарации и устройства для повышения стабильности качества очистки проб.
2. Разработана новая пневмовакuumная установка сепарации ДНК для молекулярно-биологических лабораторных исследований.
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. Работа проводилась при поддержке центра развития инновационной инфраструктуры и молодежного предпринимательства МГТУ им. Н.Э. Баумана. Благодаря научным результатам работы получены грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, стипендия Правительства РФ, стипендия Президента РФ. Работа получила развитие с помощью программы “Формула Биотех 2016”, организованной в Научном Парке МГУ им. М.В. Ломоносова.
5. 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 ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, что подтверждено актами о внедрении.

Достоверность полученных данных обеспечена с помощью сравнения результатов вычислительных экспериментов на основе разработанного метода расчета и математической модели с данными, опубликованными в открытых источниках литературы и данными, полученными в практике молекулярно-биологических лабораторных исследований и испытаний устройств пробоподготовки.

### Положения, выносимые на защиту

Метод расчета рабочих процессов в установках вакуумной сепарации ДНК. Результаты экспериментальных и численных исследований рабочих процессов в установках вакуумной сепарации ДНК.

### Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

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

Четвертая всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов “Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты”. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2012 г.);

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

Пятнадцатая научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья «МЕДТЕХ-2013» (Португалия, 2013 г.);

Международный научный форум молодых ученых «Наука будущего. Наука молодых» (Севастополь, 2015 г.).

Результаты работы были представлены на выставках:

1. Молодежная научно-инженерная выставка «Политехника». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.;
2. XIV Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи. Москва, ВВЦ, 2014;
3. IX Московский Фестиваль науки. Москва, Экспоцентр на Красной Пресне, 2014;
4. III Московский международный форум инновационного развития «Открытые инновации». Москва, ВВЦ, 2014.

Личный вклад автора заключается в разработке метода расчета рабочих процессов в УВС, разработке экспериментального стенда и методики проведения эксперимента, проведении расчетно-теоретических и экспериментальных исследований и разработке пневмовакуумной установки сепарации ДНК.

#### Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 15 научных работ, из них 4 работы в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ, общим объемом 7,1 п. л.

#### Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 150 страницах текста, включая 63 иллюстрации и 8 таблиц. Библиография насчитывает 129 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 приведены общие сведения об установках пробоподготовки, в частности установках вакуумной сепарации ДНК, и их основных характеристиках. Приведен обзор методов пробоподготовки и существующих УВС ДНК. Подробно рассмотрен вопрос математического описания рабочих процессов, протекающих в УВС, и представлены определяющие их расчетные зависимости. Определены основные факторы, влияющие на рабочие процессы в УВС.

Обзор методов пробоподготовки, или выделения ДНК показал, что сорбционный метод вакуумной сепарации является универсальным методом и подходит для большинства типов биопроб, обладает максимальной чувствительностью, экономичен и прост в применении. Сорбционный метод выделения ДНК реализован как в отдельных блоках сепарации УВС, так и в автоматизированных комплексах пробоподготовки производства зарубежных фирм. Аналогов УВС российского производства не имеется. Общим недостатком рассмотренных установок и комплексов пробоподготовки является нестабильность качества подготовленных проб в случаях использования многолуночных планшетов очистки и исходных проб различной вязкости. Планшеты очистки представляют собой формованные детали, содержащие рабочие ячейки с пористыми телами, через которые под действием перепада давления перемещается исходная биопроба. Нестабильность качества подготовленных проб связана с неравномерностью протекания рабочих процессов в ячейках планшета очистки.

Методы расчета рабочих процессов в установках вакуумной сепарации в открытых источниках печати отсутствуют, поэтому проектирование новых УВС затруднено. Рабочий процесс сепарации молекул ДНК заключается в одновременном протекании двух физических процессов: течения рабочей среды под действием перепада давлений и осаждения ДНК на пористом теле в ячейке планшета очистки. Рабочая среда в общем случае представляет собой двухфазную смесь жидкости и газа – биопробы и воздуха.

Рабочим процессом, определяющим эффективность работы УВС, является течение рабочей среды через пористое тело под действием перепада давления. В лабораторной практике перемещение биопроб через пористое тело проводят в рабочем диапазоне расходов рабочей среды  $Q=0,05 \dots 0,15$  мл/с.

Основными параметрами, характеризующими эффективность УВС, являются: время пробоподготовки, производительность – количество одновременно подготавливаемых проб, относительная потеря исходного биоматериала, вероятность перекрестного перемешивания проб. Для обеспечения заданных параметров УВС разработан метод расчета рабочих процессов и проводится численное моделирование течения рабочей среды в ячейках планшета очистки и поверхностных явлений на стенках элементов УВС. Численный расчет реализуется с помощью широко распространенного метода вычислительной гидродинамики – метода контрольного объема, т.к. он имеет достаточную точность при минимальных вычислительных затратах.

На основе анализа состояния вопроса исследования рабочих процессов в УВС сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели рабочих процессов в УВС – модели двухфазного нестационарного течения рабочей среды через ячейки планшета очистки под действием перепада давления между атмосферным давлением и давлением в рабочей полости блока вакуумной сепарации.

Модель основного рабочего элемента УВС – блока вакуумной сепарации, состоящего из планшета очистки 1, верхней части блока вакуумной сепара-

ции 2, нижней части блока вакуумной сепарации 3, пористых тел в рабочих ячейках планшета очистки 4 и уплотнения 5 представлена на Рисунке 1.

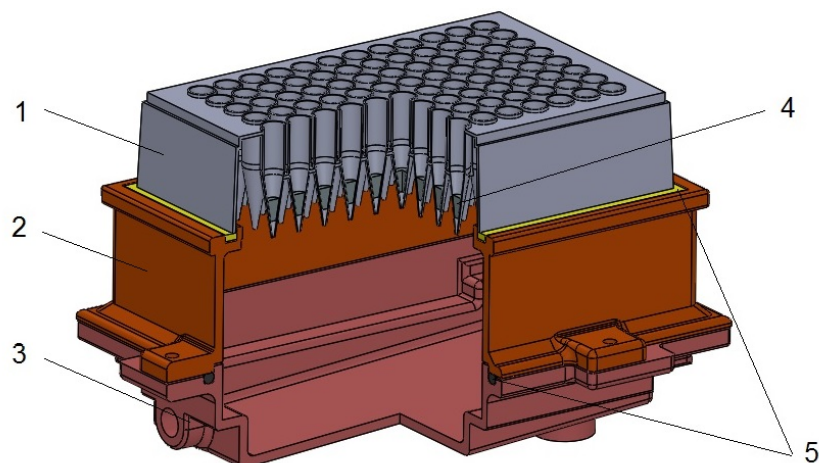


Рисунок 1. Модель блока вакуумной сепарации с планшетом очистки в разрезе. 1 – планшет очистки, 2 – верхняя часть блока вакуумной сепарации, 3 – нижняя часть блока вакуумной сепарации, 4 – пористые тела в рабочих ячейках планшета очистки, 5 – уплотнения

Моделирование рабочих процессов в общей расчетной области объекта исследования (Рисунок 2,г) является крайне трудоемким и используется на стадии проектирования всего блока сепарации. Наибольший интерес для исследования представляет область рабочей ячейки и область каплеобразования, расположенная под ней. Поэтому в математической модели рабочих процессов используются локальные расчетные области, входящие в общую расчетную область объекта исследования: область одной ячейки (Рисунок 2,а); область одной ячейки с областью блока сепарации (Рисунок 2,б); область четырех ячеек (Рисунок 2,в).

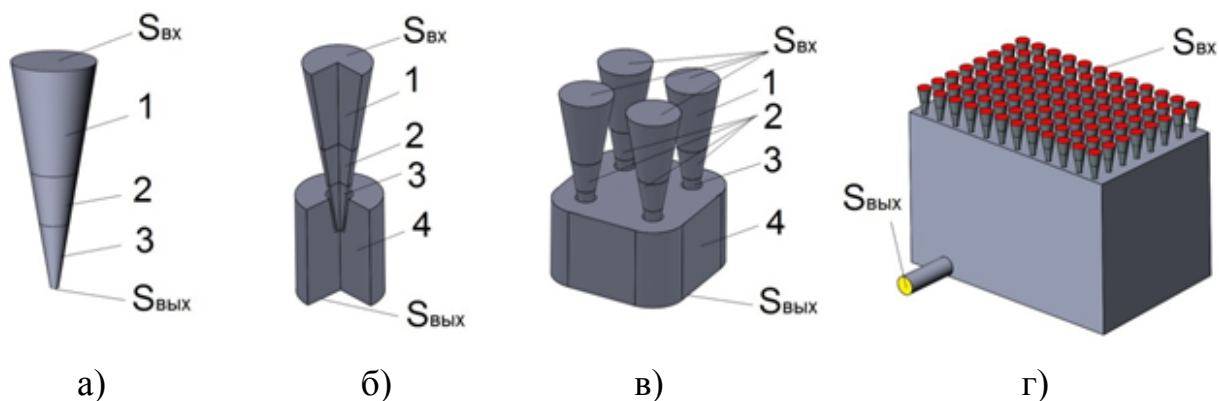


Рисунок 2. Расчетные области математической модели: а – область одной ячейки, б – область одной ячейки с сегментом области блока вакуумной сепарации, в – область с четырьмя ячейками, г – расчетная область рабочей полости УВС.

Расчетная область, содержащая одну рабочую ячейку с пористым телом, дополненная сегментом области блока вакуумной сепарации, используется для



описания математической модели. На Рисунке 3 показано сечение расчетной области вдоль оси симметрии рабочей ячейки. В математическую модель входят два типа расчетных областей: фазовая (область течения рабочей среды вне пористого тела) и область пористого тела (область течения рабочей среды в пористом теле).

Размеры пористых тел в существующих планшетах очистки различны и определяются геометрическими параметрами. На Рисунке 3 определены параметры области пористого тела:  $H$  – высота пористого тела,  $D$  – диаметр большего основания пористого тела,  $d$  – диаметр меньшего основания пористого тела.

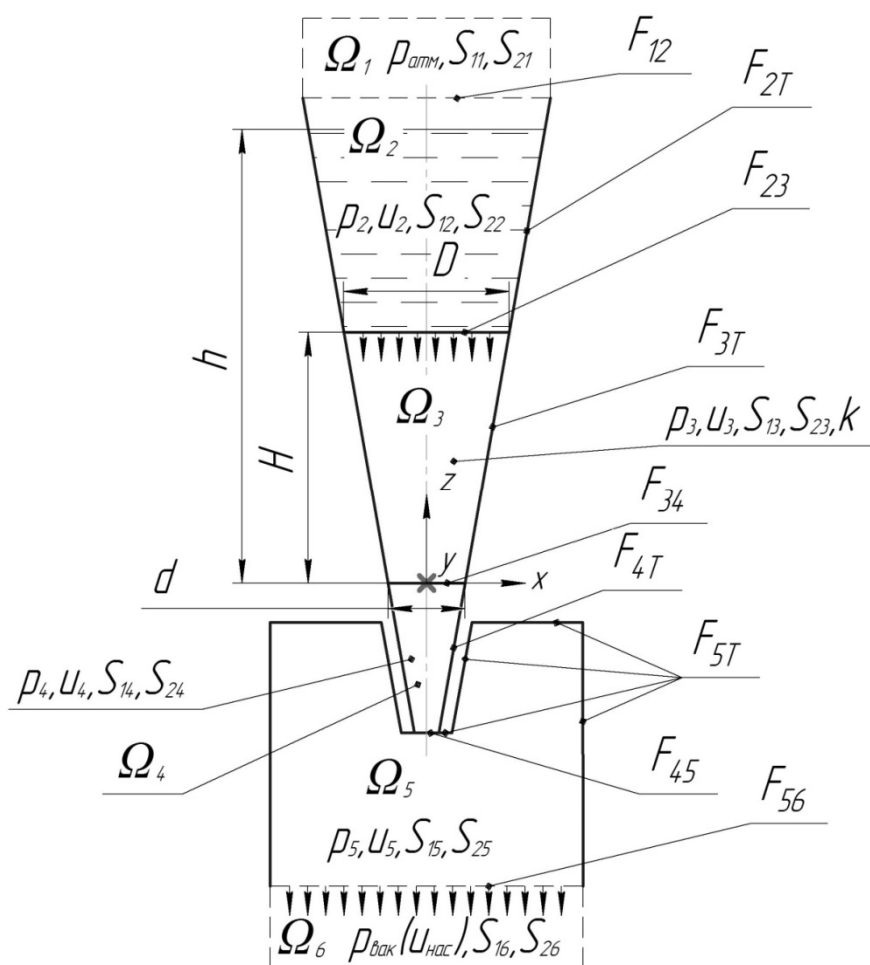


Рисунок 3. Сечение расчетной области математической модели.

$\Omega_1$  – область источника рабочей среды;  $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_5$  – фазовые области течения рабочей среды;  $\Omega_3$  – область пористого тела;  $\Omega_6$  – область откачки;

$F_{12}, F_{23}, F_{34}, F_{45}, F_{56}, F_{2T}, F_{3T}, F_{4T}, F_{5T}$  – границы между соответствующими областями или областями и окружающей средой.

В математической модели принимаются следующие допущения:

- течение изотермическое.
- жидкость ньютоновская несжимаемая.
- газ несжимаем (имеет постоянную плотность).
- материал пористого тела изотропен.
- режим течения рабочей среды – ламинарный.

Основные расчетные зависимости, применяемые к фазовой области и области пористого тела различны.

Уравнения движения для фазовой области:

1. Уравнения потока рабочей среды Навье-Стокса с учетом несжимаемости рабочей среды:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}_i \vec{u}_i) = -\nabla p_i + \nabla \cdot \tau_i + \rho_i \vec{g},$$

где  $i$  – индекс фазы,  $\tau_i = \mu_i (\nabla \vec{u}_i + \nabla \vec{u}_i^T)$  – тензор вязких напряжений,  $\mu_i$  – динамическая вязкость фазы,  $\rho_i$  – плотность фазы,  $p_i$  – давление фазы,  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения.

$$\rho = \sum_i \rho_i f_i, \quad \mu = \sum_i \mu_i f_i$$

2. Уравнение неразрывности потока рабочей среды:

$$\nabla \cdot \vec{u}_i = 0.$$

3. Уравнения VOF (Volume of fluid)-модели, применяемой для моделирования многофазных сред:

$f_i = \frac{V_i}{V}$  – VOF-функция, относительный объем занятый фазой.

$V_i = \int_V \chi(x, t) dV$  – объем расчетной ячейки, занятый фазой,  $V$  – объем ячейки.

$\chi(x, t)$  – функция, описывающая поверхность раздела фаз.

Уравнения движения для области пористого тела:

1. Уравнение Дарси, описывающее движение двухфазной сплошной среды в пористом теле в зависимости от перепада давления:

$$\vec{u}_i = -k \frac{k_i(S_i)}{\mu_i} (\text{grad } p_i - \rho_i \vec{g}),$$

где  $u_i$  – скорость  $i$ -ой фазы,  $p_i$  – давление  $i$ -ой фазы,  $S_i$  – насыщенность  $i$ -ой фазы,  $k$  – абсолютная проницаемость,  $k_i(S_i)$  – относительные фазовые проницаемости,  $\rho_i$  – плотность  $i$ -ой фазы,  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения. Относительные фазовые проницаемости определяются как типичные для жидкости и газа по Викову и Ботсету.

2. Уравнение неразрывности потока рабочей среды:

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i S_i) + \text{div}(\rho_i \vec{u}_i) = 0$$

3. Уравнение суммарной насыщенности фаз:

$$S_1 + S_2 = 1$$

4. Уравнения для капиллярного давления:

$$p_1 - p_2 = p_c(S_1)$$

$$P_c(S_1) = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{m}{k}} J(S_1),$$

$S_1, S_2$  – насыщенности фаз жидкости и газа,  $p_l$  – давление более смачивающей фазы (жидкости),  $p_2$  – давление менее смачивающей фазы (газа),  $p_c(S_1)$  – капиллярное давление,  $J(S_1)$  – функция Леверетта,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $m$  – коэффициент пористости.

Математическая модель дополняется начальными и граничными условиями, определяющими решение систем заложенных в основу модели уравнений.

Начальные условия:

Распределение фаз, давлений, скоростей в начальный момент времени:

$$t = 0 \quad \left| \begin{array}{l} S_1(x, y, z_1) = 1; S_2(x, y, z_1) = 0; S_1(x, y, z_2) = 0; S_2(x, y, z_2) = 1 \\ p = p_{\text{атм}}; \vec{u} = 0 \\ z_1 \in \Omega_2 = z < h \cup z > H' \\ z_2 = z \setminus z_1 \end{array} \right.$$

где  $H'$  – координата нижнего уровня жидкости,  $h$  – координата верхнего уровня жидкости,  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление, Па.

Граничные условия:

- На входе в расчетную область:
  - $p(\vec{R}) = p_{\text{атм}}; S_2(\vec{R}) = 1; S_1(\vec{R}) = 0$
  - $\vec{R}(r, \theta_r, z, t) \in S_{12}$
- На выходе из расчетной области:
  - $p(\vec{R}) = p_{\text{вак}}$  или  $u(\vec{R}) = u_{\text{нас}}; S_2(\vec{R}) = 1; S_1(\vec{R}) = 0$
  - $\vec{R}(r, \theta_r, z, t) \in S_{45}, \vec{u}(\vec{R}) \perp S_{45}$
- На внутренних границах:
  - $\forall \vec{r} : \vec{r} \in S_{23} \quad \vec{u}_2 = \vec{u}_3; \forall \vec{r} : \vec{r} \in S_{34} \quad \vec{u}_3 = \vec{u}_4; \forall \vec{r} : \vec{r} \in S_{45} \quad \vec{u}_4 = \vec{u}_5.$
- На внешних границах
  - $u_x(\vec{r}) = u_y(\vec{r}) = u_z(\vec{r}) = 0; \vec{r}(x, y, z, t) \in S_{2T} \cap S_{3T} \cap S_{4T} \cap S_{5T}.$

где  $p_{\text{вак}}$  – давление в блоке вакуумной сепарации.

Для замыкания системы уравнения разработанной математической модели рабочих процессов в УВС требуются: коэффициент проницаемости пористой области  $k$ , коэффициент пористости  $M$  и краевой угол смачивания  $\theta$ . Эти величины определяются с помощью экспериментальных исследований.

Полученная система дифференциальных уравнений, дополненная начальными и граничными условиями решается с помощью численного метода контрольного объема. Производится дискретизация дифференциальных уравнений в частных производных с помощью составления дискретных аналогов и решение полученной системы уравнений.

Третья глава посвящена проведению экспериментальных исследований с целью определения замыкающих коэффициентов: коэффициента проницаемо-

сти пористой области  $k$ , коэффициента пористости  $m$  и краевого угла смачивания  $\theta$ .

Исследование коэффициента пористости  $m$  пористого тела проводится с помощью метода взвешивания насыщенного жидкостью пористого тела. Измерение массы ячейки с пористым телом проводилось с помощью высокоточных весов для измерения микромасс PS-20. Расчетно-теоретическое исследование позволило определить коэффициент пористости:  $m = 0,27 \pm 0,03$ .

Исследование краевого угла смачивания планшета очистки проводится с помощью метода растекающейся капли, который основан на измерении диаметра основания капли и ее высоты. Измерение геометрических характеристик капель проводится оптическим методом с помощью цифрового микроскопа MAN 1011. Полученное значение краевого угла смачивания составило:  $\theta = 68,7^\circ \pm 5,4^\circ$ .

Исследование проницаемости пористых тел ячеек планшета очистки проводится с помощью методики, разработанной в рамках данной работы. Она заключается в том, что через различные ячейки под действием заданного перепада давления перемещается измеряемое количество рабочей среды, в качестве которой используется дистиллированная вода. Гидродинамические характеристики воды подобны характеристикам растворов биопроб.

Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде, разработанном в рамках данной работы с применением аддитивных технологий. Схема экспериментального стенда приведена на Рисунке 4,а. Фотография изготовленного блока вакуумной сепарации с планшетом очистки представлена на Рисунке 4,б.

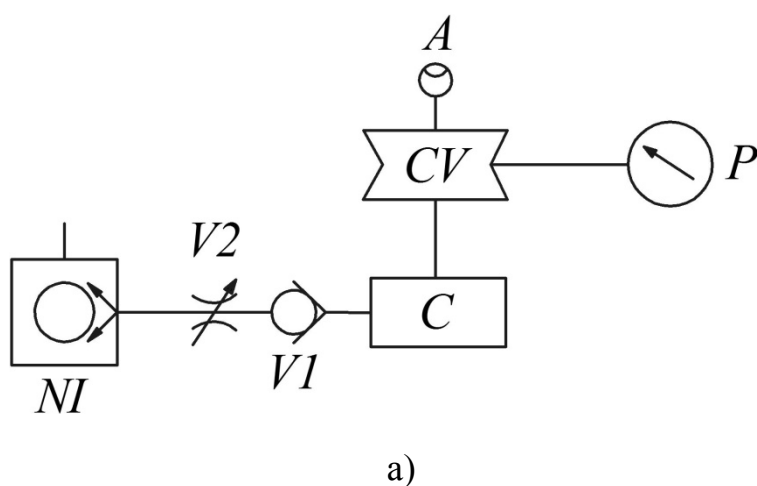


Рисунок 4. Экспериментальный стенд: а – схема экспериментального стенда установки вакуумной сепарации, б – фотография блока вакуумной сепарации.

$NI$  – мембранный вакуумный насос;  $V1$  – обратный клапан;  $P$  – вакуумметр;  $V2$  – регулируемый дроссель;  $A$  – устройство измерения расхода;  $CV$  – блок вакуумной сепарации;  $C$  – колба-сборник объемом 0,5 л.

В УВС рабочие процессы включают в себя не только течение рабочей среды внутри ячеек, но и осаждение рабочей среды и ее компонентов на пористых телах. Различные факторы, влияющие на процесс течения рабочей среды, приводят к динамическому изменению гидравлического сопротивления пористого тела в ячейке. Влияние этих факторов на расходные характеристики рабочих ячеек УВС оценивается с помощью соответствующей серии экспериментов по исследованию характеристик течения рабочей среды в отдельных ячейках планшета очистки. В реальном рабочем процессе пробоподготовки контакт биопробы с пористым телом краткосрочен (в среднем общее время контакта не более 5 мин), поэтому необходимо определить начальное гидравлическое сопротивление, характеризуемое коэффициентом проницаемости при краткосрочном контакте рабочей среды с сорбентом (начальный коэффициент проницаемости).

Анализ результатов экспериментального исследования по изучению характеристик течения рабочей среды в УВС показал, что при обеспечении времени контакта рабочей среды с пористым телом не более 5 мин расход рабочей среды через ячейку планшета очистки снижается не более чем на 14%. Средняя погрешность определения расхода в экспериментальном исследовании составила 12,8%.

Экспериментальные исследования течения рабочей среды через различные ячейки планшета очистки позволили получить расходные характеристики ячеек – зависимости расхода рабочей среды, проходящей через ячейку, от перепада давлений на ней (Рисунок 5).

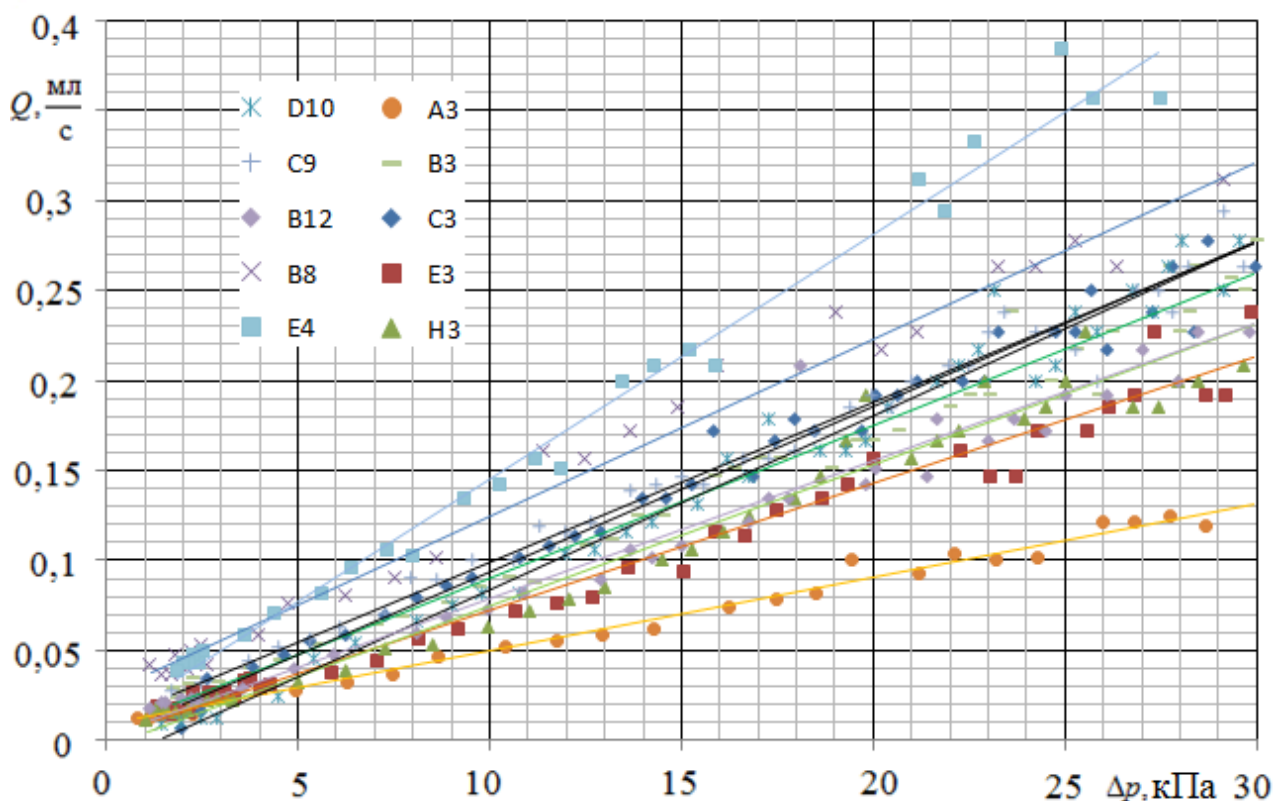


Рисунок 5. Экспериментально полученные расходные характеристики рабочей среды  $Q(\Delta p)$ .

Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод о значительном разбросе расходов рабочей среды в различных ячейках при одинаковом перепаде давления, что свидетельствует о различии гидравлических сопротивлений пористых тел ячеек. На основе закона Дарси определены коэффициенты проницаемости и построена гистограмма выборки. Определены максимальный, средний и минимальный коэффициенты проницаемости исследуемых рабочих ячеек:  $k_{\max}=7,95 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ,  $k_{\text{ave}}=5,19 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ,  $k_{\min}=2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ .

С целью подтверждения адекватности разработанной математической модели в применении к описанию поверхностных явлений и каплеобразования проводится экспериментальное исследование капельно-струйного течения в области  $\Omega_5$  под ячейкой (Рисунок 3). Для этого в состав экспериментального стенда вводится цифровой микроскоп MAN 1011 и проводится съемка образования капель или струи рабочей среды. В результате эксперимента получено среднее значение давления перехода из капельного в струйный режим течения:  $\Delta p_{\text{пер}}=9,2 \text{ кПа}$  и диаметр капли при нулевом перепаде давления  $d_k=3,1 \pm 0,05 \text{ мм}$ .

В четвертой главе проведено расчетно-теоретическое исследование рабочих процессов на основе разработанного метода расчета с использованием общей и частной математических моделей. Целью численного исследования с помощью частной математической модели и моделирования рабочих процессов в локальных расчетных областях (Рисунки 2,а; 2,б; 2,в) является получение расчетных данных, необходимых для подтверждения адекватности общей математической модели. Оценка точности описания рабочих процессов на основе математической модели проводится с помощью сопоставления расходных характеристик  $Q(\Delta p)$ , диаметра капли  $d_k$  и перепада давления перехода режимов течения  $\Delta p_{\text{пер}}$ , полученных численным и экспериментальным методами.

В целях сокращения вычислительных и временных ресурсов при численном расчете из общей математической модели выделяется частная модель, описывающая рабочие процессы таким образом, чтобы определение расходов рабочей среды через ячейку с пористым телом в зависимости от различных перепадов давлений было возможным без потери точности общей математической модели. В частной модели рассматривается однофазное движение рабочей среды – жидкости или газа, а ее расчетную область составляет область одной рабочей ячейки с пористым телом. (Рисунок 2,а).

Численное исследование рабочих процессов с помощью частной математической модели проводилось при задании различных давлений в блоке вакуумной сепарации  $p_{\text{вак}}$ , а также коэффициентов проницаемости пористого тела  $k$ : максимального, минимального и среднего. В результате решения системы уравнений математической модели получены картины распределения скоростей и давлений внутри рабочей области ячеек.

Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, аппроксимированных методом наименьших квадратов (Рисунок 6). Это сопоставление позволило сделать вывод, что математическая модель описывает физический процесс течения рабочей среды через ячейку планшета очистки с высокой точностью (отклонение данных по расходу рабочей среды в рабочем диапазоне расходов составляет не более 15%).

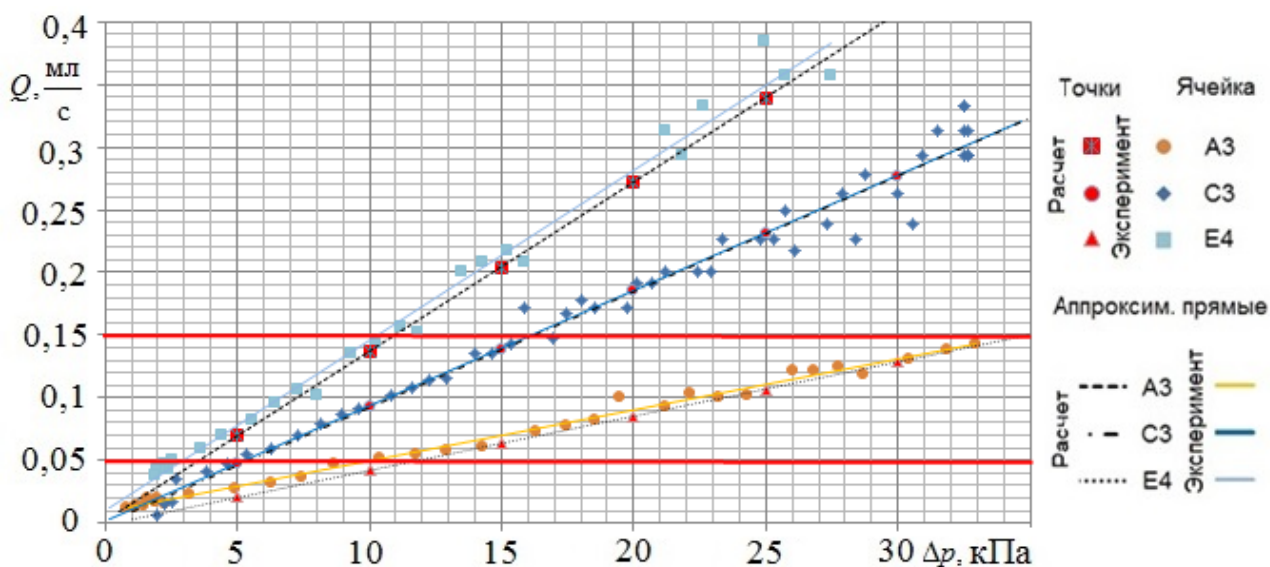


Рисунок 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по расходным характеристикам  $Q(\Delta p)$  в широком диапазоне расходов.

Далее проведено численное моделирование капельно-струйного течения с применением разработанной общей математической модели двухфазного нестационарного течения рабочей среды в УВС, применительно к расчетной области одной ячейки и части блока вакуумной сепарации (Рисунок 2,б). Моделирование капельно-струйного течения и образования капель в области каплеобразования под ячейкой позволило определить диапазон перепадов давления на ячейке, при котором происходит переход от капельного к струйному режиму течения. Переход от капельного к струйному режиму течения для ячейки с коэффициентом проницаемости  $k_{F1} = 7,42 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$  происходит при перепаде давления  $12 < \Delta p < 12,5 \text{ кПа}$ .

Проведено численное моделирование течения рабочей среды в локальной расчетной области, содержащей четыре рабочие ячейки (Рисунок 2,в). Расчетное исследование позволило оценить значения расходов рабочей среды в ячейках с различными гидравлическими сопротивлениями при одновременном течении рабочей среды в них с заданным перепадом давления, а также определить расчетное значение диаметра капли, образующейся в области под ячейкой:  $d_{\text{к.расч}} = 3,2 \text{ мм}$ .

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных позволило сделать вывод об адекватности разработанной математической модели в описании рабочих процессов в УВС и определяющих их распределений скоростей, давлений и фаз.

Исследование течения рабочей среды в общей рабочей области УВС (Рисунок 2,г) на основе математической модели позволило оценить распределение давлений внутри блока вакуумной сепарации. Анализ полученных данных показал, что неравномерность давлений в рабочей полости установки при одновременном течении жидкой фазы через ячейки незначительна, разброс давлений в системе составляет не более 1 Па.



Пятая глава посвящена разработке новой УВС – пневмовакuumной установки сепарации ДНК. Результаты проведенных расчетно-теоретических исследований течения рабочей среды в УВС использованы при разработке новой установки. Они позволили определить геометрические параметры рабочей области разрабатываемой установки (высоту рабочей области и параметры подсоединения откачной системы) и функциональные параметры системы откачки (поток рабочей среды, создаваемый вакуумным насосом). На основе данных численного расчета математической модели получено конструктивное исполнение УВС, которое было защищено патентом Российской Федерации на полезную модель №149159. Пневмовакuumная установка сепарации ДНК изготовлена на кафедре “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э.Баумана с применением аддитивных технологий (Рисунок 7).



Рисунок 7. Пневмовакuumная установка сепарации ДНК.

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 применительно к УВС, разработаны метод расчета и математическая модель рабочих процессов, позволяющая описывать динамическое изменение распределений давлений, скоростей и фаз рабочей среды внутри полости блока вакуумной сепарации.
2. Созданы методика проведения эксперимента, экспериментальный стенд и проведены экспериментальные исследования рабочих процессов в УВС, которые позволили определить: коэффициент пористости пористых тел ячеек типового планшета очистки:  $m = 0,27 \pm 0,03$  и краевой угол смачивания материала типового планшета очистки:  $\theta = 68,7^\circ \pm 5,4^\circ$ ; распределение начальных коэффициентов проницаемости ячеек планшета очистки со средним значе-



нием  $k_{ave} = 5,19 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . Максимальный и минимальный начальные коэффициенты проницаемости пористого тела рабочих ячеек соответственно:  $k_{max} = 7,95 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ,  $k_{min} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . Среднее значение перепада давления, при котором происходит переход между капельным и струйным режимами течения для ячейки с коэффициентом проницаемости  $k = 7,42 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , составило  $\Delta p_{пер} = 9,2 \text{ кПа}$ . Размер капли при отделении ее от ячейки, определенный экспериментальным методом:  $d_k = 3,1 \pm 0,05 \text{ мм}$ .

3. На основе разработанного метода расчета рабочих процессов в УВС впервые проведены расчетно-теоретические исследования, подтверждена адекватность математической модели, лежащей в основе метода.

Численное исследование течения рабочей среды в ячейках УВС с использованием частной математической модели позволило получить расчетные расходные характеристики ячеек УВС и провести оценку адекватности разработанной математической модели. Абсолютная погрешность определения расходов рабочей среды составила  $0,01 \text{ мл/с}$ , максимальная относительная погрешность определения расхода в рабочем диапазоне – не более 15%.

Численное исследование капельно-струйного течения в нижней части рабочих ячеек УВС позволило определить перепад давлений на ячейке, при котором происходит переход между капельным и струйным течением:  $\Delta p_{пер.р} = 12,25 \pm 0,25 \text{ кПа}$ . Погрешность численного определения этой величины составила 25%.

Численное исследование течения рабочей среды в локальной области, содержащей четыре рабочие ячейки, позволило проанализировать одновременное течение рабочей среды через несколько ячеек планшета очистки с различными коэффициентами проницаемости пористых тел. Значения расходов рабочей среды, полученных с помощью общей модели, с погрешностью менее 0,5% совпадают с результатами, полученными с помощью частной модели. Этот факт подтверждает адекватность разработанной математической модели. Данное численное исследование позволило определить расчетным методом диаметр образуемой капли:  $d_{к,расч} = 3,2 \text{ мм}$ . Погрешность расчетного определения диаметра капли (фазового распределения) составила 3,1%.

Численное исследование распределения давлений в блоке вакуумной сепарации УВС позволило оценить распределение давлений в рабочей полости УВС. Анализ результатов расчета показал, что при течении жидкой фазы через все ячейки давление в ней распределяется практически равномерно. Максимальная разница давлений в различных точках полости блока вакуумной сепарации составляет не более 1 Па. Этот факт свидетельствует о том, что неравномерность распределения давлений в УВС не является причиной неравномерности течения рабочей среды в ячейках планшета очистки.

4. Проведены расчетно-теоретические исследования рабочих процессов в УВС на основе разработанной математической модели. В результате численных исследований определены: конструктивные параметры высоты рабочей области блока вакуумной сепарации и расположения соединения с системой откачки, удовлетворяющие требованиям обеспечения условий работоспособно-

сти установки; максимальный поток, откачиваемый вакуумным насосом для обеспечения требуемого скоростного режима течения рабочей среды в ячейках:

$$Q_{нас} = 4,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

5. Разработана пневмовакуумная установка сепарации растворов ДНК. 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. Разработка вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования с применением технологии быстрого прототипирования / А.С. Пугачук [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011, №3. С. 3-16. (1,1 п.л./0,2 п.л.)

2. Пугачук А.С., Чернышев А.В. Исследование процесса двухфазного течения смеси в установке вакуумной сепарации ДНК. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/757.html> (1,0 п.л./0,9 п.л.)

3. Пугачук А. С., Чернышев А. В. Исследование неравномерности рабочих процессов в установках для подготовки проб ДНК. // Медицинская техника. 2015, №4. С. 32-36. (0,6 п.л./0,5 п.л.)

4. Пугачук А. С., Чернышев А. В. Численное моделирование течения газа через воздушные фильтры высокой эффективности очистки // Компрессорная техника и пневматика. 2015, №7. С. 24-32. (1,0 п.л./0,9 п.л.)

5. 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.)

6. Пугачук А. С., Чернышев А. В. Разработка высокоэффективной мобильной установки для выделения ДНК // Будущее машиностроения России: Сборник трудов. М., 2015. С. 620-623. (0,3 п.л./0,2 п.л.)