

УДК 60-7

## Разработка пневмовакuumной установки пробоподготовки

# 05, май 2012

Пугачук Ю.А.<sup>(1)</sup>, Кузнецова Ю.С.<sup>(2)</sup>, Чернышев А.В.<sup>(3)</sup>

Аспирант<sup>(1)</sup>, студентка<sup>(2)</sup>, д.т.н., профессор<sup>(3)</sup>,  
кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

Актуальной задачей современной науки является исследование ДНК. Для возможности таких исследований необходима подготовка проб – отделение биоматериала ДНК (дезоксирибонуклеиновых кислот) из первичного лизированного (содержащего предварительно разрушенную пробу) раствора. Для реализации данной операции существуют следующие методы: осаждение ДНК на магнитных частицах, разделение раствора по плотностям в гравитационном поле с помощью центрифугирования и вакуумная фильтрация. В данной работе речь идет о проектировании установки для подготовки проб, основанной на методе вакуумной фильтрации. Основной целью работы является отработка математической модели основного рабочего процесса – протекания раствора через пористое тело и применение результатов расчета по полученной модели для проектирования конструкции установки пробоподготовки.

Главным рабочим органом установки пробоподготовки является система вакуумной фильтрации. На рис.1. представлен поперечный разрез подобной системы. В нижнюю часть камеры 6 устанавливается основание с приемными микропробирками 4. Далее устанавливается верхняя часть камеры 3. Герметичность между нижней и верхней частью камеры обеспечивается уплотнением 5. На верхнюю часть камеры 3 устанавливается планшет с микропробирками 1 (обычно используется планшет с 96 микропробирками). Между верхней частью камеры и данным планшетом имеется уплотнение 2.

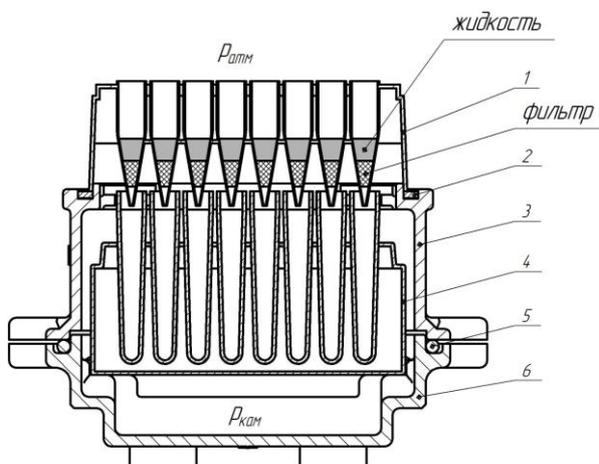


Рис.1. Общий вид системы вакуумной фильтрации

После проведения анализа имеющихся аналогов систем фильтрации, выявления преимуществ и недостатков предложенных в ходе работы вариантов конструкций, а также необходимых расчетов была спроектирована подобная система. Верхняя и нижняя части камеры были изготовлены с применением метода 3D-моделирования и быстрого прототипирования.

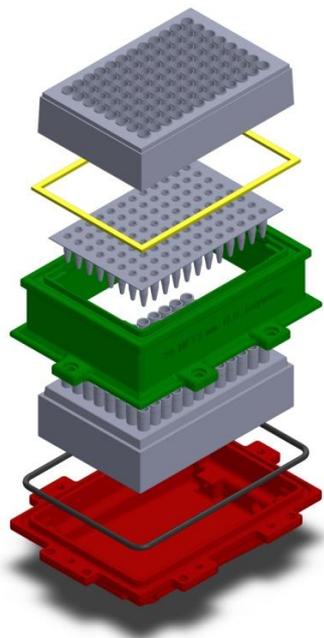


Рис. 2. Модель блочной сборки системы вакуумной фильтрации (элементы крепежа не показаны)



Рис. 3. Фотография изготовленного прототипа системы вакуумной фильтрации

Принцип работы установки основан на том, что исходный раствор под действием перепада давлений между атмосферой и вакуумной камерой проходит через пористое тело, с материалом которого в присутствии определённых растворов солей взаимодействуют молекулы ДНК. Они адсорбируются (осаждаются), а остальные примеси смываются в фильтрат и удаляются. После нескольких промывок адсорбированные ДНК снимаются с помощью добавления растворов определенных солей.

Главной задачей при проектировании является создание системы, в которой перепад давления между камерой и атмосферой был достаточен для прокачки раствора через пробирки. При эксплуатации подобных установок существует проблема, когда при отсутствии раствора в большинстве пробирок в камере не может быть получен необходимый перепад (насосом откачивается атмосферный воздух через эти незаполненные пробирки) и раствор прокачивается очень медленно, либо вообще не прокачивается. Лаборанты в данном случае вынуждены закрывать незаполненные пробирки, отсекая доступ воздуха в них из атмосферы. Для решения этой проблемы и проектирования вакуумного насоса на соответствующие параметры была проведена научно-исследовательская работа, описываемая в данной статье.

Первым шагом, необходимым для исследования является создание модели, описывающей процесс прокачки и связывающей его параметры: давление, скорость, геометрические параметры. Ввиду неизвестности описания движения через пористое тело из-за отсутствия данных по материалу, из которого состоят фильтры покупного планшета, было проведено исследование гидродинамических характеристик сопротивления фильтра. В основу созданной модели входят уравнения:

- Навье-Стокса для несжимаемой жидкости;
- неразрывности;
- к-е турбулентности.

Кроме этих уравнений, описывающих перемещение турбулентной струи в условиях свободного течения, необходимо также добавить зависимость, отражающую движение через пористое тело – фильтр. В пористой области теоретическое падение давления  $\Delta p$  на единицу длины  $L$  может быть определено при помощи следующего уравнения:

$$\frac{\Delta p}{L} = -(P_i |v| + P_v) v$$

, где  $v$  – приведенная скорость течения через пористую среду,  $P_i$  и  $P_v$  – инерционное и вязкостное сопротивление пор соответственно.

Математическая модель базируется на следующих допущениях:

- жидкость несжимаема;
- сопротивления пор постоянны (фильтр не забивается);
- не учитывается влияние температуры;
- используется модель осреднения скорости по Рейнольдсу.

Для моделирования течения используется метод конечных элементов (МКЭ). Исследуемым геометрическим объектом является фильтр, поэтому была создана трехмерная модель области пробирки, содержащей его, а также создана расчетная сетка (рис. 4.). Данная модель имеет следующие поверхности: вход 1, стенку 2, выход 3. А также она имеет полигональную ячеистую структуру – состоит из множества малых объемов, параметры жидкости в которых являются постоянными. Средняя часть данной модели является пористой областью – фильтром.

Для реализации вычисления приняты граничные условия, соответствующие физическим условиям протекания процесса:

- Давление на входе в пробирку – атмосферное;
- Давление на выходе из пробирки соответствует давлению  $p_{кам}$  (рис.1.);
- Стенки абсолютно непроницаемы.

В данном исследовании проводилось 3 расчета, рассматривались различные давления  $p_{кам}$ , равные соответственно 70.6, 46.4 и 26.5 кПа. Расчеты проводились с использованием специализированного пакета Star CCM+. В первом приближении были приняты характеристики сопротивления фильтра, данные в tutorial Star CCM для подобных расчетов. В результате расчета получены распределения скоростей и давлений по среднему сечению микропробирки, а также расходы для рассмотренных перепадов давлений, равные соответственно 0.249, 0.438, 0.591 мл/с. Картины распределения скоростей и давлений для  $p_{кам}$ , равного 46.4 кПа, показаны на рис. 6.

Для уточнения параметров фильтра был собран экспериментальный стенд (схема показана на рис.5.) После проведения эксперимента и сопоставления расчетных и экспериментальных данных были получены коэффициенты:

Инерционного сопротивления  $P_i = 1,5 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^4$

Вязкостного сопротивления,  $P_v = 1,35 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^3$

Созданная модель используется для определения быстроты действия проектируемого вакуумного насоса (необходимой для откачки раствора при заполнении любого числа заполненных пробирок). При прокачке исходного раствора через пробирки в камеру и откачке воздуха с помощью вакуумного насоса в камере установится некоторый перепад давления. С помощью построенной модели (но с большим количеством расчетных ячеек - 80000) проводится расчет расхода воздуха (с учетом сжимаемости, а также принимая допущение об идеальности газа) через 95 пробирок для 3 перепадов давления, соответствующих  $p_{кам}$ , равным соответственно 95, 90 и 85 кПа. Из

полученных результатов выбирается расход, который обеспечивается мембранным вакуумным насосом с приемлемыми габаритными размерами.

Было принято решение проектировать насос с быстротой действия 16 л/мин. В целях компактности и лучшей уравновешенности был спроектирован четырехступенчатый мембранный вакуумный насос. Для регулирования его быстроты действия ступени насоса подключаются в параллельную работу, т.е. патрубки всасывания подсоединяются через разветвительный штуцер к шлангу, ведущему к колбе-ловушке. Номинальная быстрота действия одной ступени насоса составляет 4 л/мин. Поэтому при параллельной откачке всех ступеней обеспечивается ранее рассчитанная быстрота действия 16 л/мин. Также насос может быть использован для испытаний и исследований при низких уровнях давлений, порядка 200~400 Па, т.к. проектируется как четырехступенчатый. Уравновешенность механизма движения достигается благодаря оппозитно расположенным шатунам. Разрез модели насоса без подсоединения электродвигателя представлен на рис. 7.

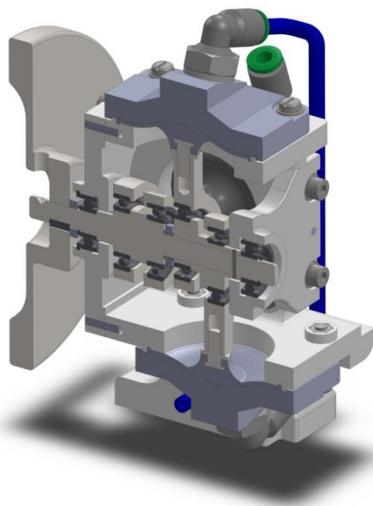


Рис. 7. Разрез модели вакуумного насоса

Заключительной частью научной работы является проектирование пневмовакuumной установки пробоподготовки. Для индикации давления в системе фильтрации в установку интегрируется вакуумметр. Имеется возможность управления быстротой действия насоса, т.к. предусматривается система управления скоростью электродвигателя. Управление осуществляется с помощью вращения ручки резистора. Для удобства пользования различными промывочными растворами предусмотрен специальный контейнер для удержания используемых емкостей.

Блочная модель установки показана на рис. 8. В дно 5 монтируется мембранный вакуумный насос 1, блок питания 17. К валу мембранного насоса 1 и электродвигателя со стойкой 4 присоединяется муфта 21 с помощью винтов 10. Электродвигатель со стойкой соединяется с дном. К стойке 6 присоединяется блок управления двигателем 18 с помощью винтов 11. Стойка соединяется с дном с помощью винтов 14. В вакуумную камеру 2 вкручиваются штуцеры 24. Вакуумная камера соединяется со стойкой при помощи крепежа 12, 13. Вакуумметр 25 ставится в соответствующую ячейку, расположенную в дне. А также устанавливается резистор управления 22. К задней стенке дна присоединяется сетевой фильтр 23. В ячейку вставляется колба 19. Соединение трубопроводов 30, показанное на рисунке соответствует режиму работы четырех ступеней мембранного насоса. Установка закрывается сверху верхней панелью 3, в которую потом устанавливается контейнер для емкостей промывочных растворов 20.

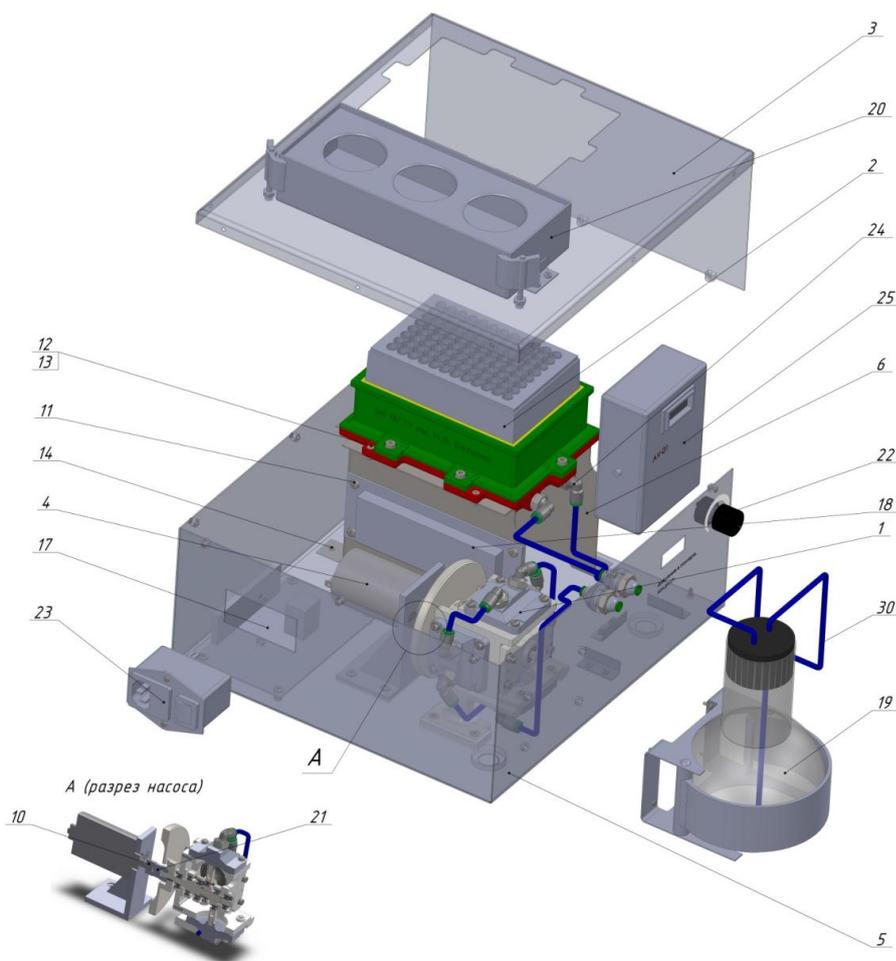


Рис. 8. Блочная модель установки.

Данная пневмовакuumная установка пробоподготовки имеет неплохие перспективы для использования в науке и промышленности. В настоящее время она находится на стадии завершения разработки технической документации. В дальнейшем планируется изготовление и сборка данного изделия и испытание на работоспособность.

#### Литература

1. Чернышев А.В., Демихов К.Е., Насибуллин С.Р. Пугачук А.С. Разработка вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования с применением технологии быстрого прототипирования. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №3. С. 3-16.
2. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев, Балт. гос. техн. ун-т. Спб., 2001. 108 с.
3. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х т.: Т.2.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 552 с., ил.
4. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 628 стр.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
6. Пятибрат В.П. Подземная гидромеханика. Учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2002. – 100 с.