

## Исследование процесса двухфазного течения смеси в установке вакуумной сепарации ДНК

© А.С. Пугачук, А.В. Чернышев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Проведено экспериментальное исследование процесса течения смеси воды и воздуха через рабочую ячейку блока вакуумной сепарации под действием перепада давления. Анализ результатов эксперимента позволил выявить особенности данного процесса: в рабочей системе имеется неравномерность поля давлений, сопротивление пористых тел переменна в зависимости от номера ячейки и времени прокачки. Также следует отметить огромное влияние капиллярных сил в двухфазной среде на рабочий процесс прокачки исходной смеси через ячейки с пористыми телами. Для описания выявленных аспектов и численного исследования характеристик поля давления и распределения насыщенности фаз была разработана математическая модель нестационарного процесса двухфазного течения газожидкостной смеси через пористое тело в ячейке установки вакуумной сепарации растворов ДНК под действием перепада давления между атмосферным и давлением в вакуумной камере.*

**Ключевые слова:** *пробоподготовка, вакуум, сепарация, ДНК, двухфазное течение, пористое тело, математическая модель.*

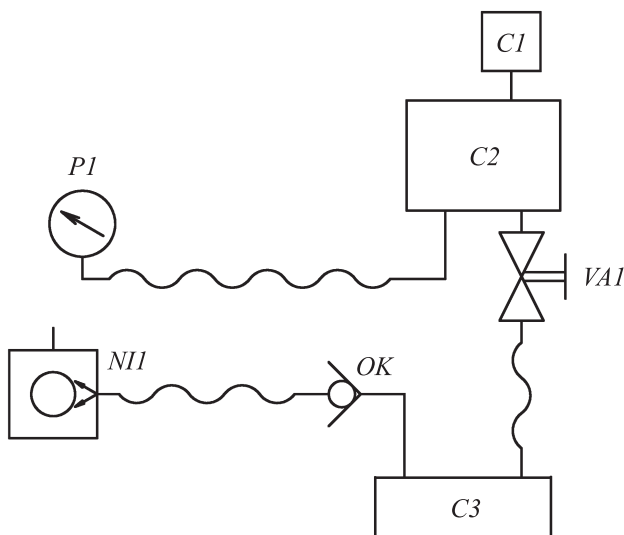
В данной статье рассматривается применение метода вакуумной сепарации ДНК на этапе пробоподготовки при проведении молекулярно-генетических исследований методом полимеразно-цепной реакции (ПЦР) [1, 2]. В настоящее время известно несколько производителей лабораторного оборудования, которые занимаются изготовлением установки вакуумной сепарации: Applied Biosystems (США), Tecan, Eppendorf, Whatman, Qiagen (Германия) и др. [3, 4]. Установки вакуумной сепарации отличаются высокой производительностью при простом конструктивном исполнении. Принцип их действия основан на том, что раствор, содержащий ДНК (исходный раствор), прокачивается через рабочие ячейки планшета [2]. Рабочая ячейка, в которой происходит осаждение ДНК, представляет собой микропробирку с пористым телом. В нижней части микропробирки выполнено отверстие.

В существующих на сегодняшний день установках вакуумной сепарации имеется несколько недостатков, которые в значительной степени ограничивают их массовое применение. В первую очередь это касается проблемы неравномерности прокачки растворов ДНК

в ячейках планшета. Следует также отметить, что на внутренних рабочих поверхностях ячеек и пористых тел после прокачивания исходного раствора остается некоторое его количество. На результатах исследований негативно сказывается и каплеобразование в отверстиях микропробирок, которое может привести к перекрестной контаминации. Для повышения эффективности установки вакуумной сепарации ДНК необходимо тщательно исследовать причины появления данных проблем.

Целью работы является экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование двухфазного нестационарного течения через рабочие ячейки установки вакуумной сепарации ДНК под действием перепада давления. Полученные результаты исследования должны быть использованы при создании нового типа установок вакуумной сепарации, не имеющих вышеуказанных недостатков.

Экспериментальное исследование было проведено с помощью установки, вакуумная схема которой представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Вакуумная схема экспериментальной установки:

*NII* — мембранный вакуумный насос; *OK* — обратный клапан; *PI* — электронный вакуумметр; *VA1* — вентиль; *C1* — устройство для измерения расхода жидкости; *C2* — вакуумная камера с рабочим планшетом; *C3* — колба-ловушка объемом 1 л

В процессе эксперимента проводилась оценка скорости прокачки жидкости как через отдельные ячейки при разном перепаде давлений на пористом теле, так и через несколько ячеек одновременно. Для гидродинамических исследований растворов ДНК в качестве рабочей среды применялась вода. На рис. 2 представлена схема расположения

элементов экспериментальной установки. Эксперимент проводился в следующем порядке. Все ячейки, кроме исследуемых, до начала эксперимента герметично закрыты. После включения вакуумного насоса давление в системе достигало заданных величин (в данном случае рассматривался диапазон давлений 710...740 мм рт. ст.). Устройство для измерения расхода жидкости наполнялось водой до 2 мл по шкале измерения. Вода под действием перепада давления протекала через ячейку в вакуумную камеру. С помощью секундомера производились измерения времени прохождения мениска воды вдоль шкалы устройства измерения расхода до отметок 1,5; 1,0; 0,5 и 0 мл соответственно.

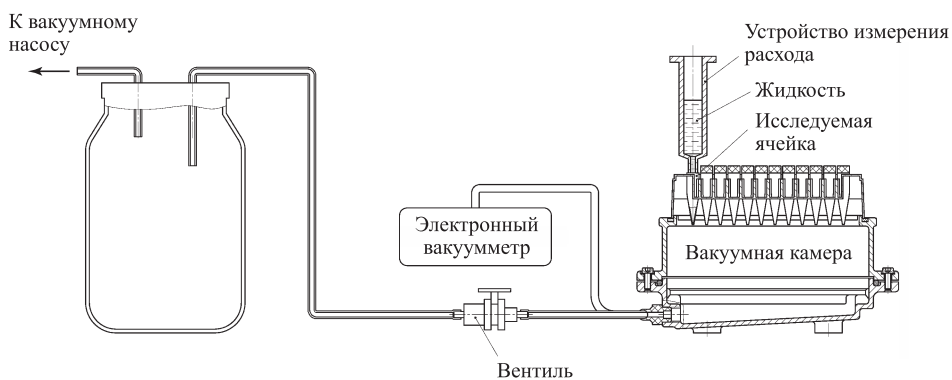


Рис. 2. Схема расположения элементов экспериментальной установки

На рис. 3 представлена схема расположения ячеек относительно откачного и измерительного трактов.

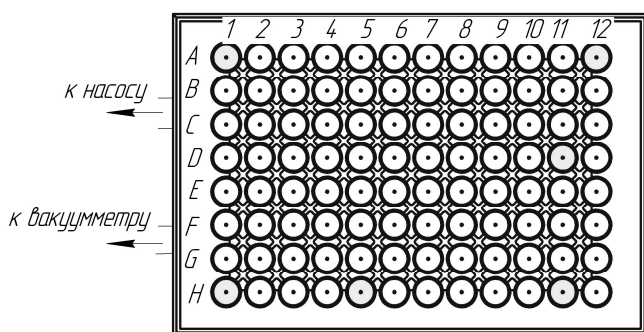


Рис. 3. Схема расположения ячеек

В результате эксперимента по прокачиванию жидкости через отдельные ячейки были получены следующие зависимости: расхода жидкости  $Q$  (мл/с) через ячейку от времени для различных давлений в вакуумной камере; среднего расхода жидкости через ячейку от дав-

ления в вакуумной камере. Анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы. Расходы воды через отдельные ячейки при одинаковом перепаде давления между атмосферой и вакуумной камерой существенно различаются. Это объясняется неоднородным расположением пористого материала в каждой ячейке, а также наличием загрязнений, т.е. сопротивление каждой ячейки различно. Незначительное изменение давления в вакуумной камере (1...5 мм рт. ст.) оказывает существенное влияние на средний расход через ячейку (0,01...0,05 мл/с).

Было проведено сравнение расходов жидкости  $Q(t)$  через различные ячейки при давлении в камере 730 мм рт. ст. Ниже приведены результаты для пяти случайно выбранных ячеек: А1, А12, D11, H5, H11 (рис. 4.)

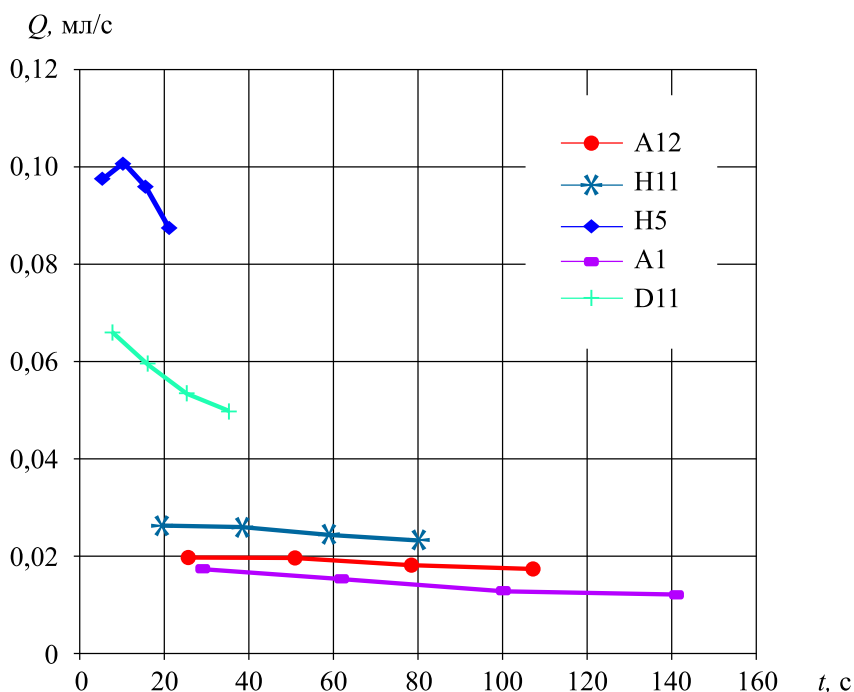


Рис. 4. Расход воды через ячейки

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 4, показал, что различие расходов воды через отдельные ячейки достаточно велико. Основной причиной этого является различие гидравлических сопротивлений пористых тел в ячейках. Пространственное расположение ячейки влияет на расход воды в меньшей степени.

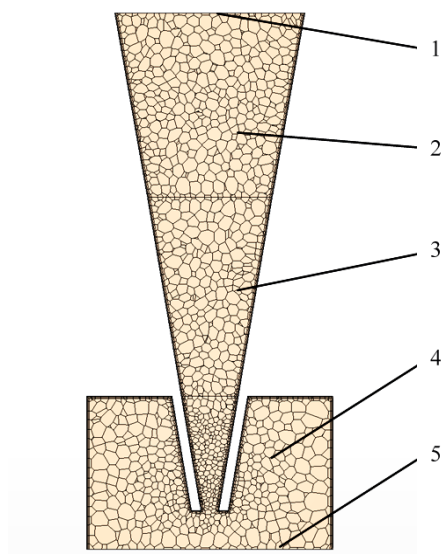
В процессе эксперимента по прокачке жидкости одновременно через несколько ячеек было сделано предположение, что действие сил поверхностного натяжения создавало дополнительное сопротивление началу процесса прокачки. Вследствие этого в нескольких слу-

чаях жидкость в отдельных ячейках оставалась в покое. Стоит отметить также влияние неравномерности поля давлений по вакуумной камере на течение жидкости через ячейки с пористыми телами при одновременной прокачке воды через несколько ячеек.

Проведенные опыты показывают, что процесс одновременной прокачки жидкости через несколько ячеек планшета системы вакуумной сепарации ДНК является достаточно сложным и охватывает множество частных проблем (различие сопротивлений пористых тел, неравномерность поля давлений, действие сил поверхностного натяжения, каплеобразование), по причине которых эффективность работы установки снижается.

Экспериментальное исследование не дает возможности полностью изучить процессы, протекающие в ячейках установки вакуумной сепарации. Для получения полной картины распределения давлений, скоростей, фаз в микрообъемах ячеек необходимо провести расчетно-теоретическое исследование и создать математическую модель рабочего процесса сепарации: двухфазного нестационарного течения смеси вода/воздух через ячейку рабочего планшета под действием перепада давления между атмосферным и давлением в камере.

Разработка математической модели начинается с определения расчетной области. Она состоит из области ячейки над пористым телом, области пористого тела, области ячейки под пористым телом вместе с частью камеры под ячейкой (выбрана цилиндрическая область). Далее производится разбиение конечно-элементной сетки. На рис. 5 показано построение сетки расчетной области ячейки.



**Рис. 5.** Конечно-элементная сетка расчетной модели:

1 — поверхность входа; 2, 4 — области фаз над и под пористым телом; 3 — область пористого тела; 5 — поверхность выхода

Математическая модель построена на основе принятых допущений.

1. Течение изотермическое.
2. Жидкость несжимаема.
3. В качестве жидкости принимается вода, в качестве газа — воздух.

4. Газ принимается несжимаемым. Допущение обосновано тем, что скорости течения фаз несравнимо малы по сравнению со скоростью звука в воздухе  $a = 330$  м/с. Скорость движения фаз при прокачивании жидкости составляет не более 2 м/с [2]. Поэтому условие несжимаемости:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{u}{a} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{330} \right)^2 = 1,8 \cdot 10^{-5} \ll 1 \quad \text{выполняется.}$$

Следовательно, воздух можно считать несжимаемым.

5. Пористое тело состоит из изотропного материала.
6. Вязкости жидкости и газа постоянны.
7. Принимается стандартная модель  $k$ — $\varepsilon$  турбулентности.
8. Вода считается несмачивающей стенки ячейки. Угол смачивания  $\theta$  принимается равным  $45^\circ$ .

Математическая модель построена на зависимостях, описывающих нестационарное движение фаз воды и воздуха. Так как рассматриваемая модель имеет два типа расчетных областей: область пористого тела и двухфазную область, то в каждой области применяются различные уравнения движения.

*Уравнения движения для двухфазной области.*

1. Уравнения Навье — Стокса упрощаются для несжимаемых сред постоянной вязкости:

$$\rho \frac{du_x}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u_x);$$

$$\rho \frac{du_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u_y);$$

$$\rho \frac{du_z}{dt} = \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u_z),$$

где  $u_x, u_y, u_z$  — проекции скоростей фаз на оси координат;  $\mu$  — динамическая вязкость фазы;  $\rho$  — плотность фазы.

2. Уравнение неразрывности:

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

3. Уравнения  $k$ — $\varepsilon$  турбулентности, полностью описанные в работе [7].

Уравнения движения для области пористого тела.

1. Уравнение Дарси, описывающее движение сплошной среды через пористое тело под действием градиента давления:

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

где  $u_i$  — скорость  $i$ -й фазы;  $p_i$  — давление  $i$ -й фазы;  $S_i$  — насыщенность  $i$ -й фазы;  $k$  — абсолютная проницаемость;  $k_i(S_i)$  — относительные фазовые проницаемости;  $\rho_i$  — плотность  $i$ -й фазы;  $\vec{g}$  — вектор ускорения свободного падения [5].

2. Уравнение неразрывности:

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

3. Уравнение суммарной насыщенности:

$$S_w + S_a = 1.$$

4. Уравнения для капиллярного давления [6]:

$$p_w - p_a = p_c(S_w),$$

$$p_c(S_w) = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{m}{k}} J(S_w).$$

Здесь  $S_w, S_a$  — насыщенности фаз воды и воздуха;  $p_w$  — давление несмачивающей фазы (воды);  $p_a$  — давление смачивающей фазы (воздуха);  $p_c(S_w)$  — капиллярное давление;  $J(S_w)$  — функция Леверетта (она определяется структурой порового пространства);  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta$  — краевой угол смачивания;  $m$  — пористость.

Начальные условия математической модели.

1. Начальное заполнение расчетных ячеек, условия насыщенности:

при  $t = 0$

$$S_w(x; 0,0115 < y < 0,0165) = 1;$$

$$S_a(x; 0,0115 < y < 0,0165) = 0;$$

в остальных расчетных ячейках  $S_w(x, y) = 0$ ;  $S_a(x, y) = 1$ .

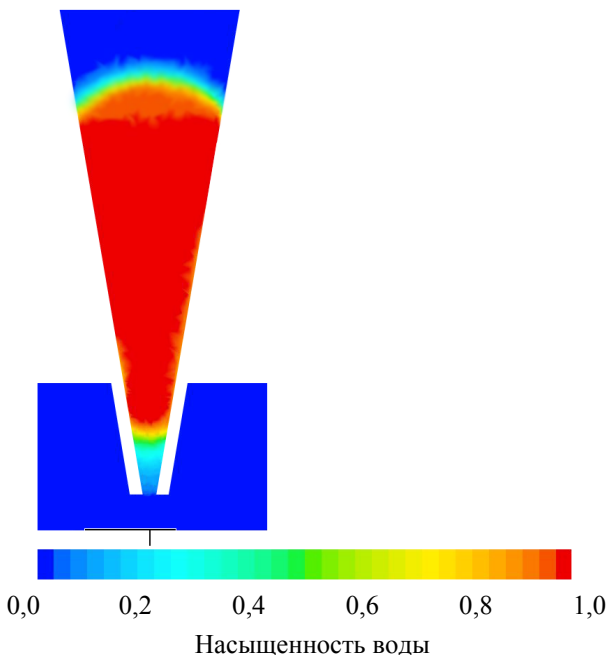
2. Распределение давления постоянно и равно атмосферному  $p(x, y) = 101\,325$  Па.

Условия на границах:

- при  $y = 18,5$   $p(t) = 101\,325$  Па;
- при  $y = 0$   $p(t) = p_{\text{кам}}$ , где  $p_{\text{кам}}$  — давление в вакуумной камере.

Границы входа и выхода проницаемы и имеют полную насыщенность по воздуху:  $S_a(x_{\text{вх}}, y_{\text{вх}}) = 1$ ;  $S_a(x_{\text{вых}}, y_{\text{вых}}) = 1$ .

В результате расчета данной модели при  $p_{\text{кам}} = 730$  мм рт. ст. было получено время прокачки 100 мкл жидкости, которое составило 11,5 с, что соответствует расходу  $9 \cdot 10^{-3}$  мл/с. На рис. 6 в качестве примера показано распределение фаз воды и воздуха при  $t = 5$  с. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что математическая модель достаточно точно описывает течение воды через ячейки с высоким сопротивлением пористого тела. Однако необходимо создать математическую модель всей рабочей области установки сепарации растворов ДНК (планшет с ячейками и вакуумная камера), чтобы иметь возможность оценить неравномерность поля давлений, а также различие сопротивлений пористых тел отдельных ячеек.



**Рис. 6.** Распределение фаз воды и воздуха при  $t = 5$  с

В данной работе проведено экспериментальное исследование течения водо-воздушной смеси через пористое тело блока вакуумной



сепарации ДНК и разработана математическая модель процесса нестационарного течения двухфазной смеси вода/воздух через ячейку с пористым телом под действием перепада давления в установке сепарации ДНК-растворов. Математическая модель показывает хорошее совпадение с данными эксперимента по прокачке воды через ячейки с высоким сопротивлением пористых тел. Полученная модель может быть использована для расчета характеристик течения исходного раствора через ячейки планшета установки вакуумной сепарации и при создании новых модификаций данных установок.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Разработка численной модели процесса вакуумной сепарации растворов ДНК. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*, 2012, спец. вып. № 4, с. 79–92.
- [2] Пугачук А.С., Кузнецова Ю.С., Чернышев А.В. Разработка пневмовакuumной установки пробоподготовки. *Студенческий научный вестник. Сер. «Профессионал»: Сб. статей Молодежной научно-инженерной выставки «Политехника»*, 2011, 21–24 ноября 2011 г, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, НТА «АПФН», 2011, 254 с.
- [3] URL: <http://www.biocompare.com/>
- [4] URL: [http://www.kranex.ru/prod/labor/avtomatizatsija\\_laboratorij/avtomaticheskie\\_stantsii\\_epmotion\\_5075\\_vac/](http://www.kranex.ru/prod/labor/avtomatizatsija_laboratorij/avtomaticheskie_stantsii_epmotion_5075_vac/)
- [5] Азиз Х., Сеттари Э. *Математическое моделирование пластовых систем*. Москва, Недра, 1982.
- [6] Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. *Движение жидкостей и газов в природных пластах*. Москва, Недра, 1984, 211 с.
- [7] Авраменко М.И. *О  $k-\varepsilon$  модели турбулентности*. Снежинск, Изд-во РФЯЦ — ВНИИТФ, 2005, 76 с.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

**Пугачук Александр Сергеевич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». Автор 9 печатных работ. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов в вакуумных системах и разработка энергетических установок. e-mail: [pugachukalexandr@mail.ru](mailto:pugachukalexandr@mail.ru)

**Чернышев Андрей Владимирович** родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и электропневматического оборудования различного назначения. e-mail: [av-chernyshev@yandex.ru](mailto:av-chernyshev@yandex.ru)