

УДК 532.685+57.088.3

© А. С. Пугачук, Ю. А. Борисов, А. В. Чернышев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЯЧЕЕК УСТАНОВОК ВАКУУМНОЙ СЕПАРАЦИИ

Рассматривается проблема моделирования рабочих процессов в установках пробоподготовки. Для моделирования рабочих процессов необходимы значения гидравлических сопротивлений пористых тел ячеек, которые определяются с помощью экспериментального исследования течения рабочей среды через ячейки с сорбентом установки вакуумной сепарации. Представлена методика проведения эксперимента, снижающая влияние сорбции на рабочие процессы в установках вакуумной сепарации и позволяющая определить начальные значения гидравлических сопротивлений ячеек. Определены начальные гидравлические сопротивления рабочих ячеек установки вакуумной сепарации ДНК. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для создания математической модели рабочих процессов, позволяющей разрабатывать высокоэффективное оборудование для вакуумной сепарации.

Кл. сл.: пробоподготовка, сепарация, выделение ДНК, сорбция

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка пробы является наиболее ответственной и значимой стадией проведения молекулярно-генетических исследований. Основная цель подготовки пробы — выделение ДНК или других высокомолекулярных структур из исходной биологической пробы и растворение их в буферном растворе с минимальным количеством примесей. Одним из методов выделения ДНК является метод вакуумной сепарации. В данной работе рассматриваются аспекты применения метода вакуумной сепарации в установках пробоподготовки и влияние гидравлических сопротивлений ячеек на эффективность протекания рабочих процессов в установках вакуумной сепарации.

Благодаря анализу полученных экспериментальных данных в ходе предыдущих работ [1] выявлена основная причина низкой эффективности метода вакуумной сепарации — нестабильность расходных характеристик в различных рабочих ячейках, приводящая к неравномерности протекания рабочих процессов при одновременной подготовке проб в нескольких ячейках. Эта проблема связана с тем, что на перемещение раствора ДНК в ячейках с сорбентом оказывают влияние несколько факторов: гидравлическое сопротивление порошка сорбента, перепад давления, сорбция жидкости, загрязненность ячейки.

Повышение эффективности метода вакуумной сепарации возможно реализовать с помощью моделирования протекания рабочих процессов в установках пробоподготовки. В работах [2, 3] про-

водилось математическое моделирование процесса течения рабочей среды через рабочие ячейки установки вакуумной сепарации. Однако для решения систем уравнений данных моделей необходимо иметь экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления β материала пористого тела ячеек с сорбентом.

Методика предыдущих экспериментальных исследований [3] не учитывала влияние сорбции растворителя на гидравлическое сопротивление пористых тел в ячейках. В результате сорбции гидравлическое сопротивление исследуемой ячейки изменялось в течение эксперимента. Поэтому расходные характеристики, определенные в ходе предыдущих работ, могут использоваться при описании течения рабочей среды через ячейки с сорбентом, который в определенной мере насыщен растворителем. Такое течение характерно в случае перемещения через сорбент больших количеств растворов и промывочных жидкостей, а также длительного проведения пробоподготовки, в течение которого сорбент поглощает часть растворителя и становится менее проницаем для рабочей среды — гидравлическое сопротивление значительно увеличивается.

При проведении пробоподготовки в большей мере рабочий процесс вакуумной сепарации связан с малыми объемами проб и малым временем контакта рабочей среды с сорбентом ячеек, поэтому очень важно определить начальное гидравлическое сопротивление ячеек (коэффициент гидравлического сопротивления в первый момент прохождения рабочей среды через ячейку).

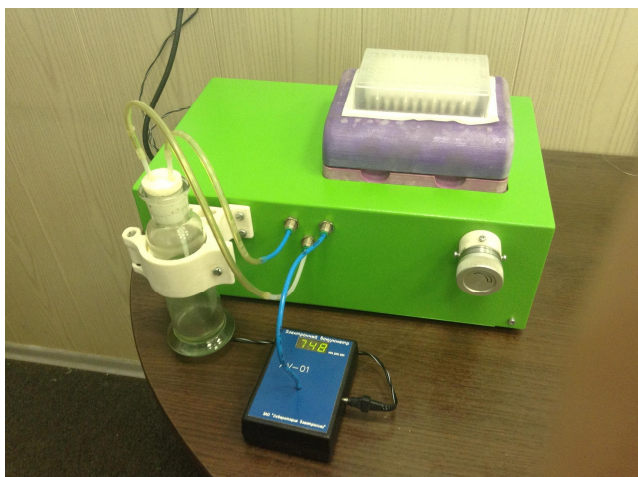


Рис. 1. Экспериментальная установка вакуумной сепарации

Целью данной работы является экспериментальное определение начальных коэффициентов гидравлических сопротивлений рабочих ячеек установки вакуумной сепарации ДНК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ЧЕРЕЗ ЯЧЕЙКИ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОЙ СЕПАРАЦИИ

Основным процессом, протекающим внутри установок вакуумной сепарации, является течение рабочей среды через ячейки с порошком сорбента, на котором происходит сорбция молекул ДНК. Исследование потока рабочей среды в ячейках с сорбентом проведено с помощью серии экспериментов, реализованной на экспериментальной установке вакуумной сепарации [4] (рис. 1).

Методика проведения эксперимента

Через каждую исследуемую ячейку под действием перепада давления между атмосферой $p_{\text{атм}}$ и рабочей полостью установки $p_{\text{вак}}$ перемещалась рабочая среда. Однако в отличие от предыдущих экспериментов, когда при определенных перепадах давления, поддерживаемых в рабочей полости установки, проводилось несколько измерений расхода с целью минимизации случайной погрешности, в данной работе измерение расхода для каждого перепада давления на ячейке проводилось единожды с целью снижения времени эксперимента, т. к. длительный контакт рабочей среды с сорбентом приводит к ее сорбции, следовательно, изменению гидравлического сопротивления ячейки. На рис. 2. изображена схема экспериментальной установки.

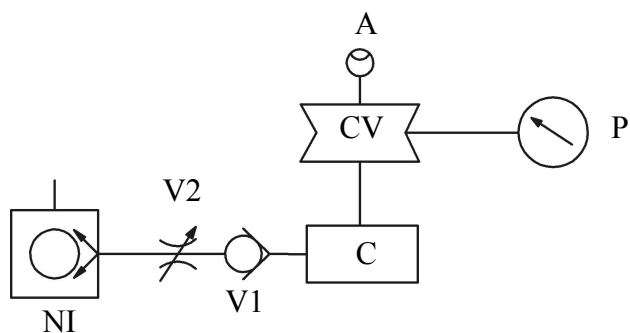


Рис. 2. Схема экспериментальной установки вакуумной сепарации.

NI — мембранный вакуумный насос; V1 — обратный клапан; P — вакуумметр; V2 — регулируемый дроссель; A — устройство для измерения расхода жидкости; CV — камера блока вакуумной сепарации; C — колба-ловушка объемом 0.5 л

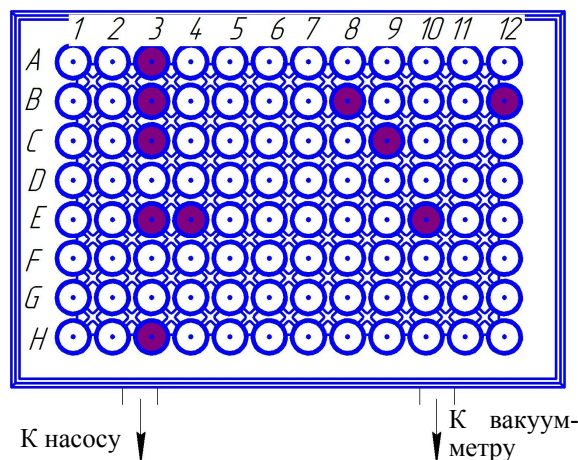


Рис. 3. Схема исследуемых ячеек на планшете сорбции

Методика эксперимента с целью минимизации погрешности, вызванной сорбцией растворителя, описанная в работе [3], была скорректирована. Выбраны ранее не исследуемые ячейки планшета сорбции (рис. 3). Давление в камере блока вакуумной сепарации CV снижалось благодаря откачке вакуумным насосом NI до 70–75 кПа. В устройство измерения расхода вносилась рабочая среда, в качестве которой использовалась фильтрованная вода. Насос выключался, и давление в системе начинало медленно увеличиваться. При этом рабочая среда под действием перепада давления проходила через исследуемую ячейку и устройство измерения расхода. Показания датчика P давления и время прохождения делений устройства измерения расхода фиксировались в реальном времени благодаря применению видеосъемки эксперимента.

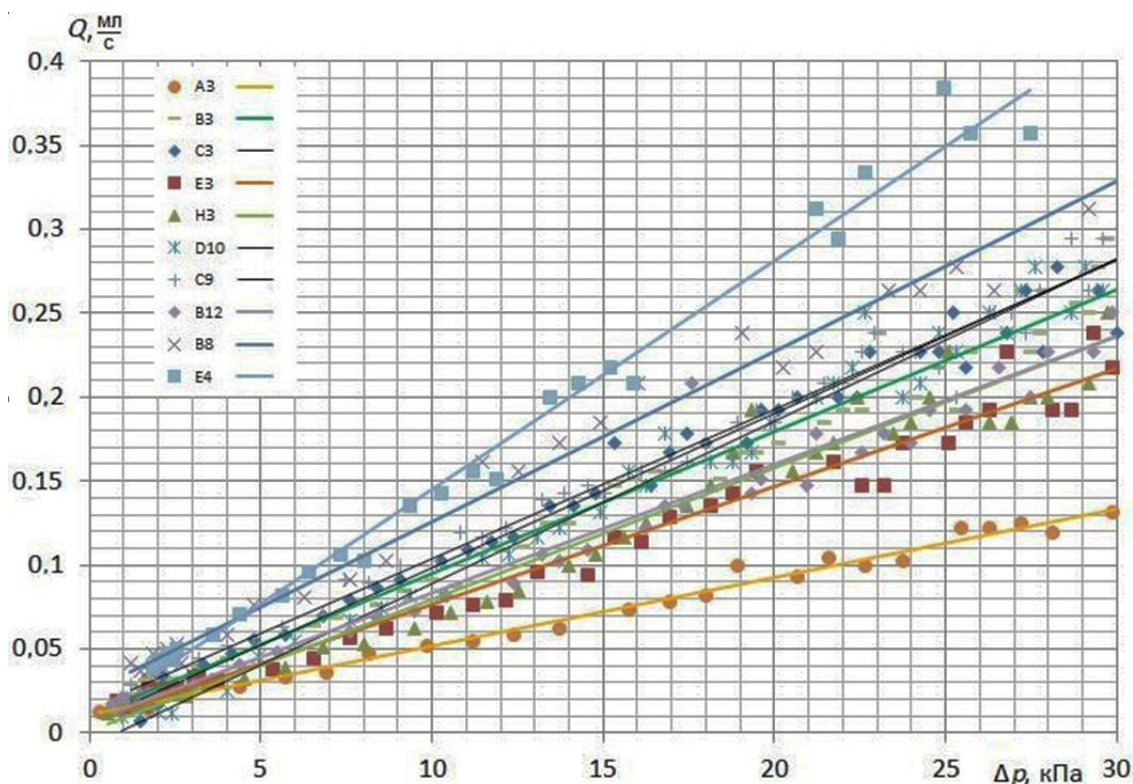


Рис. 4. Экспериментально полученные расходные характеристики

Впоследствии данные обрабатывались, и в результате обработки получены значения расхода рабочей среды, соответствующие текущему перепаду давления в системе.

В результате проведения серии экспериментов получены расходные характеристики, определяющие течение рабочей среды через ячейки планшета сорбции под действием перепада давлений. Полученные расходные характеристики — зависимости расхода рабочей среды, протекающей через ячейку, от перепада давлений на ячейке — представлены на рис. 4.

Оценка погрешностей экспериментальных данных

Проведена оценка погрешности экспериментальных данных. В ходе эксперимента и обработки данных были применены следующие упрощения.

1. Гидростатическое давление столба жидкости внутри устройства измерения расхода не учитывалось. Максимальная погрешность измерения перепада давления при этом составила 400 Па в сторону увеличения. Эта погрешность имеет значительное влияние лишь при малых разрежениях в рабочей полости установки.

2. Измеренное значение времени прохождения рабочей среды между делениями шкалы устройства измерения расхода, а соответственно и значение расхода приводились в соответствие перепаду давления на ячейке, измеренному в момент прохождения мениска рабочей среды первого из этих делений. Погрешность измерения перепада давлений при этом составила не более 700 Па при высоких значениях расхода.

3. Изменение гидравлического сопротивления из-за влияния сорбции не учитывалось, т. к. время контакта рабочей среды с сорбентом (общее время эксперимента с выбранной ячейкой) в среднем не превышало 4 минут. Анализ экспериментальных данных, приведенных в [3], показал, что в течение этого времени проведения эксперимента изменение гидравлического сопротивления незначительно.

Погрешность измерения расхода рабочей среды при высоких перепадах давления больше, чем при низких, т. к. при этом значительно ниже измеряемое время прохождения рабочей среды между соседними делениями шкалы устройства измерения расхода, а погрешность его измерения оказывает большее влияние на получаемое значение расхода. Рабочий диапазон расходов растворов в существующих установках пробоподготовки составляет

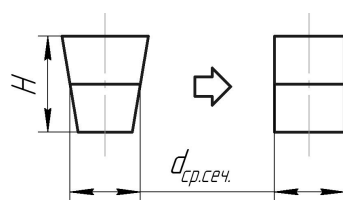


Рис. 5. Определение эквивалентной рабочей области пористого тела

0.05–0.15 мл/с. Погрешность измерения расхода в этом диапазоне составила не более 20 %, погрешность измерения перепада давлений — не более 7 %.

Полученные экспериментальные характеристики позволяют сделать вывод о значительном разбросе начальных гидравлических сопротивлений рабочих ячеек. С целью нахождения коэффициентов сопротивления выбраны характеристики с наименьшим, наибольшим и средним сопротивлением.

Определение коэффициентов вязкостного сопротивления

Математическая модель течения рабочей среды под действием перепада давления внутри пористого тела в установках вакуумной сепарации, описанная в работах [2, 3], базируется на уравнении Дарси:

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{\beta}(\text{grad } p - \rho \mathbf{g}). \quad (1)$$

В целях нахождения экспериментального коэффициента β вязкостного сопротивления пористого тела данное уравнение рассматривается в проекции на вертикальную ось z ячейки и преобразуется к виду

$$\left(\rho g - \frac{dp}{dz}\right) = \beta u_z. \quad (2)$$

Производная давления по высоте пористого тела меняется нелинейно, т. к. геометрия пористого тела имеет форму конуса и скорость u_z непостоянна по высоте. Однако можно заменить течение в конусе на соответствующее течение в эквивалентном цилиндре с постоянной скоростью, соответствующей скорости течения в среднем сечении конуса (рис. 5.). При этом производную давления по высоте пористого тела можно найти $\frac{dp}{dz} = \frac{-\Delta p}{H}$,

где H — высота пористого тела, а скорость

$u_z = \frac{Q}{F_{\text{ср.сеч.}}}$. Значение площади среднего сечения:

$$F_{\text{ср.сеч.}} = \frac{\pi d_{\text{ср.}}^2}{4}.$$

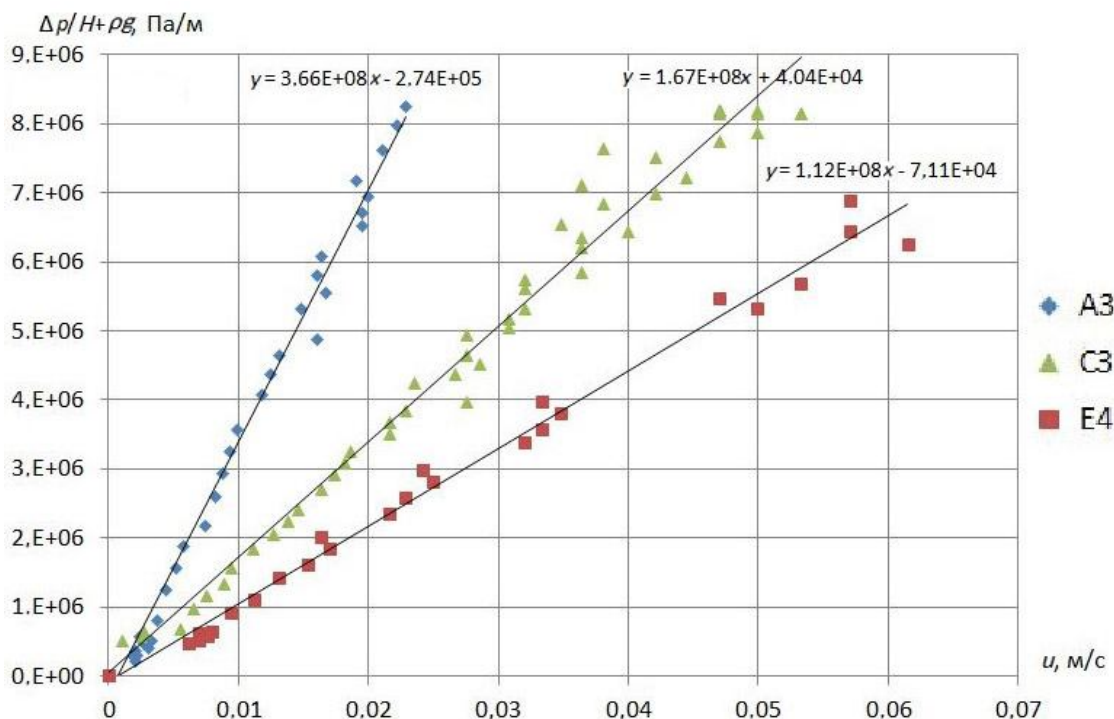


Рис. 6. Экспериментальные графики для определения коэффициентов вязкостного сопротивления пористых тел ячеек

После подстановки полученных выражений уравнение (2) принимает вид

$$\frac{\Delta p}{H} + \rho g = \beta \frac{4Q}{\pi d_{\text{ср.сеч.}}^2}. \quad (3)$$

Подставляем полученные экспериментальные значения перепадов давления и расходов в уравнение (3) и получаем функцию вида $Y = \beta X$ (рис. 6).

Из полученных графиков находим значения искомых коэффициентов вязкостного сопротивления пористых тел в ячейках с высоким (Е4), средним (С3) и низким (А3) расходами рабочей среды:

$$\beta_{\text{min}} = 1.12 \cdot 10^8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \quad (\text{ячейка Е4}),$$

$$\beta_{\text{ave}} = 1.67 \cdot 10^8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \quad (\text{ячейка С3}),$$

$$\beta_{\text{max}} = 3.66 \cdot 10^8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \quad (\text{ячейка А3}).$$

Коэффициент вязкостного сопротивления связан с проницаемостью k материала пористого тела

следующим соотношением: $\beta = \frac{\mu}{k}$. Поэтому для

материала пористого тела можно найти характеристику сопротивления прохождению рабочей среды,

не зависящую от свойств данной среды $k = \frac{\mu}{\beta}$,

где $\mu = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ — динамическая вязкость рабочей среды, использовавшейся в эксперименте (воды). Соответственно максимальная, средняя и минимальная проницаемости рабочих ячеек:

$$k_{\text{max}} = 7.95 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \quad (\text{ячейка Е4}),$$

$$k_{\text{ave}} = 5.33 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \quad (\text{ячейка С3}),$$

$$k_{\text{min}} = 2.43 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \quad (\text{ячейка А3}).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы получены расходные характеристики течения рабочей среды в ячейках установок вакуумной сепарации и экспериментально получены начальные гидравлические сопротивления ячеек с наименьшим, средним

и наибольшим расходами. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при разработке математической модели рабочих процессов, протекающих в установках вакуумной сепарации и разработке новых устройств вакуумной сепарации с высокой эффективностью: отсутствием неравномерности рабочих процессов и стабильностью качества очистки выходного биологического раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачук А.С., Губинская Т.А., Чернышев А.В. Экспериментальное исследование течения жидкости через рабочие ячейки пневмовакuumной установки пробоподготовки // Инженерный вестник. Электронный журнал "Наука и образование". Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". № 12, декабрь 2014. URL: (<http://engbul.bmstu.ru/doc/749508.html>) (дата обращения: 22.09.2015). ISSN 2307-0595.
2. Пугачук А.С., Чернышев А.В. Исследование процесса двухфазного течения смеси в установке вакуумной сепарации ДНК // Инженерный журнал: Наука и инновации. Электронный журнал. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, сетевое издание ЭЛ ФС77-53688, 2013, № 5. URL: (<http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/757.html>) (дата обращения: 22.09.2015). ISSN 2308-6033.
3. Пугачук А.С., Чернышев А.В. Исследование неравномерности рабочих процессов в установках для подготовки проб ДНК // Медицинская техника. 2015, № 4. С. 32–36.
4. Пугачук А.С., Чернышев А.В. Установка вакуумной сепарации. Патент РФ №149159, МПК G01N 33/553. Оpubл. 20.12.2014. Бюл. № 35. URL: (http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2014FULL/2014.12.20/Index_ru.htm) (дата обращения: 22.09.2015).

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Контакты: Пугачук Александр Сергеевич,
pugachukalexandr@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 23.09.2015

EXPERIMENTAL DETERMINATION COEFFICIENTS HYDRAULIC RESISTANCE OF THE WORKERS CELL SYSTEMS OF VACUUM SEPARATION

A. S. Pugachuk, Yu. A. Borisov, A. V. Chernyshev

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Consider the problem modeling workflows in sample preparation installations. For modeling workflows are needed values of hydraulic resistance in porous bodies the cell, which are determined using the experimental study flow of working fluid through the cell with the sorbent in install vacuum separation. Presents a methodology for the experiment, which reduces the impact of sorption on the work processes in installations vacuum separation and allows to determine the initial values of hydraulic resistance in the cell. Determine the initial hydraulic resistance of working cells in installations vacuum separation of DNA. Obtained experimental data can be used to create a mathematical model working processes, allowing to develop a highly efficient equipment for vacuum separation.

Keywords: sample preparation, separation, extraction DNA, sorption

REFERENCES

1. Pugachuk A.S., Gubinskaya T.A., Chernyshev A.V. [The pilot study of a current of liquid through working cells of pneumovacuum installation of sample preparation]. *Inzhenernyy vestnik. Elektronnyy zhurnal "Nauka i obrazovanie"* [Engineering messenger. Electronic magazine "Science and education"], "MGTU im. N.E. Bauman", Publ., no. 12, December 2014. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/749508.html>. ISSN 2307-0595. (In Russ.).
2. Pugachuk A.S., Chernyshev A.V. [Research of process of a two-phase current of mix in installation of vacuum separation of DNA]. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovazii. Elektronnyy zhurnal* [Engineering magazine: Science and innovations. Electronic magazine], "MGTU im. N.E. Bauman" Publ., 2013, no. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/757.html>. ISSN 2308-6033. (In Russ.).
3. Pugachuk A.S., Chernyshev A.V. [Research of nonuniformity of working processes in installations for preparation of tests of DNA]. *Medizinskaya tehnika* [Medical equipment], 2015, no. 4, pp. 32–36. (In Russ.).
4. Pugachuk A.S., Chernyshev A.V. *Ustanovka vakuumnoy separazii* [Device of vacuum separation]. Patent RF № 149159, G01N 33/553, 20.12.2014. Bull. № 35. URL: http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2014FULL/2014.12.20/Index_ru.htm. (In Russ.).

Contacts: *Pugachuk Aleksandr Sergeevich*,
pugachukalexandr@mail.ru

Article received in edition: 23.09.2015