

УДК 532.6:532.685:629.7.063.6

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-10-94-105

Экспериментально-теоретическое исследование адаптивного инерционно-капиллярного устройства отбора жидкости

М.Ю. Иванов^{1,2}, Е.Г. Куранов^{1,2}, А.Е. Новиков¹, Г.Ф. Реш^{1,2}

¹ АО «ВПК «НПО машиностроения», 143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Experimental and Theoretical Research of Adaptive Inertia-Capillary Device for Liquid Intake

M.Y. Ivanov^{1,2}, E.G. Kuranov^{1,2}, A.E. Novikov¹, G.F. Resh^{1,2}

¹ JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyeniya, 143966, Reutov, Moscow region, Gagarin St., Bldg. 33

² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: vpk@vpk.npomash.ru



Исследован динамический процесс взаимодействия тонкостенной податливой (адаптивной) пространственной конструкции, выполненной из пронизаемого микропористого капиллярного разделителя фаз, с протекающей через нее лиофильной гомогенной жидкой смесью. Показано, что при отборе жидкой среды из емкости с размещенной в ней пространственной конструкцией возникает сила всестороннего сжатия. Сила приложена к той части разделителя фаз, которая расположена в области газовой фазы выше движущейся межфазной поверхности раздела газ — жидкость. Существование всестороннего силового воздействия определяется комплексом явлений различной физической природы: принципом Галилея — Торричелли, поверхностными взаимодействиями, естественной и/или искусственной гравитацией. Обнаруженный эффект можно использовать для поддержания текущего характерного линейного размера пространственной конструкции ниже некоторого предельного значения, определяемого известной формулой теории жестких капиллярных устройств отбора жидкости, которую применяли Ф.Т. Додж, В.М. Поляев и другие ученые в исследованиях по определению условий функционирования таких агрегатов. Это позволяет при сохранении заданной капиллярной удерживающей способности разделителя фаз увеличить время выработки жидкости и уменьшить ее остатки в емкости, а также расширить область практического использования капиллярных разделителей фаз, например на топливные системы атмосферных высокоманевренных летательных аппаратов.

Ключевые слова: лиофильная гомогенная жидкость, способ отбора жидкости, капиллярный разделитель фаз, всестороннее сжатие, принцип Галилея — Торричелли, естественная и искусственная гравитация



This paper deals with the dynamic process of interaction of a thin-walled compliant (adaptive) spatial structure made of a permeable microporous capillary phase separator with a lyophilic homogeneous liquid mixture flowing through. It is shown that a comprehensive compression force occurs during an intake of a liquid medium from a vessel with a spatial structure placed in it. The force is applied to the portion of the phase separator that is located in the gas phase region above the moving gas-liquid interface. The existence of the comprehensive force impact is determined by a complex of phenomena of various physical nature: Galileo-Torricelli principle, surface interactions, natural and/or artificial gravity. The detected effect can be used

to maintain the current characteristic linear dimension of the spatial structure below a certain limiting value determined by a known formula of the theory of rigid capillary liquid intake devices used by F.T. Dodge, V.M. Polyayev and other researchers when studying operating conditions of such units. This allows increasing the time of liquid production and reducing its residues in the vessel, while maintaining the specified capillary retention capacity of the phase separator. It also allows expanding the field of practical application of capillary phase separators, for example, to fuel systems of atmospheric highly maneuverable aircraft.

Keywords: lyophilic homogeneous liquid, liquid intake method, capillary phase separator (CPS), comprehensive compression, Galileo-Torricelli principle, natural and artificial gravity

В технических системах различного назначения при внешних динамических воздействиях обеспечение разделения газовой и жидкой фаз в емкостях сложной конфигурации в процессе отбора жидкости является сложной прикладной научно-технической задачей. Для ее решения, как правило, используют механические, инерционные и капиллярные заборные устройства (КЗУ). Однако применение последних усложняется, в частности, наличием линейных перегрузок, существенно снижающих эффективность их функционирования.

Для расширения диапазона использования традиционных КЗУ предложено адаптивное инерционно-капиллярное устройство (далее адаптивное устройство (АУ)), реализующее новый способ отбора жидкости [1, 2].

Цель работы — экспериментально-теоретическое подтверждение возможности реализации предложенного способа.

Основы функционирования традиционного КЗУ. Устройство отбора жидкости размещают в емкости так, чтобы жидкая среда в процессе отбора поступала в расходную магистраль через микропористый материал — капиллярный разделитель фаз (КРФ), в качестве которого может выступать, например, тканая металлическая сетка [3].

Как известно, в работе КРФ выделяют два предельных режима — сепарирующий и удерживающий [4]. При изменении положения межфазной поверхности раздела газ — жидкость (далее поверхность Σ), обусловленного уменьшением объема динамические потери давления в расходной магистрали, обусловленные скоростным напором жидкости; $\Delta p_{\text{вибр}}$ — потери давления, возникающие при вибрации конструкции КЗУ; $\Delta p_{\text{пульс}}$ — потери давления, возникающие при пульсации жидкости в гидравлической системе.

В этом случае появляется гидравлический барьер (КРФ, заполненный жидкостью), и раз-

делитель фаз функционирует как в сепарирующем режиме, так и в режиме удерживания жидкой среды, препятствуя проникновению газа во внутренний объем КЗУ и, следовательно, в расходную магистраль системы отбора жидкости. Алгебраическое неравенство, определяющее существование гидравлического барьера, записывается следующим образом [4]:

$$\text{КУС} \geq \Phi(h_{\text{ст}}, \Delta p_{\text{сум}}, n), \quad (1)$$

где КУС — капиллярная удерживающая способность КРФ, $\text{КУС} = 4\sigma \cos\theta/d_{\text{экв}}$ (σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; θ — краевой угол смачивания; $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр КРФ); $\Phi = \rho_{\text{ж}} n g h_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{сум}}$ ($\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; n — модуль вектора суммарной перегрузки \mathbf{n}_{Σ} ; g — ускорение свободного падения; $h_{\text{ст}}$ — высота КЗУ над поверхностью Σ в области газовой фазы по направлению действия вектора \mathbf{n}_{Σ} ; $\Delta p_{\text{сум}}$ — суммарные потери давления жидкости на КРФ.

В выражении (1)

$$\Delta p_{\text{сум}} = \Delta p_{\text{КРФ}} + \Delta p_{\text{сопр}} + \Delta p_{\text{дин}} + \Delta p_{\text{вибр}} + \Delta p_{\text{пульс}},$$

где $\Delta p_{\text{КРФ}}$ — гидравлические потери давления, возникающие при движении жидкости через КРФ; $\Delta p_{\text{сопр}}$ — гидравлические потери давления при движении жидкости внутри КЗУ; $\Delta p_{\text{дин}}$ — динамические потери давления в расходной магистрали, обусловленные скоростным напором жидкости; $\Delta p_{\text{вибр}}$ — потери давления, возникающие при вибрации конструкции КЗУ; $\Delta p_{\text{пульс}}$ — потери давления, возникающие при пульсации жидкости в гидравлической системе.

Режим удерживания КРФ нарушается в том случае, если $\text{КУС} < \Phi$ или $h_{\text{ст}} > h_{\text{ст}}^{\text{lim}}$, где $h_{\text{ст}}^{\text{lim}}$ — высота гидростатического столба расположенной внутри КЗУ жидкости, удерживаемого силами поверхностного натяжения КРФ. В этот момент КРФ переходит в сепарирующий режим функционирования.

Рис. 1, а иллюстрирует сепарирующий и удерживающий режимы функционирования

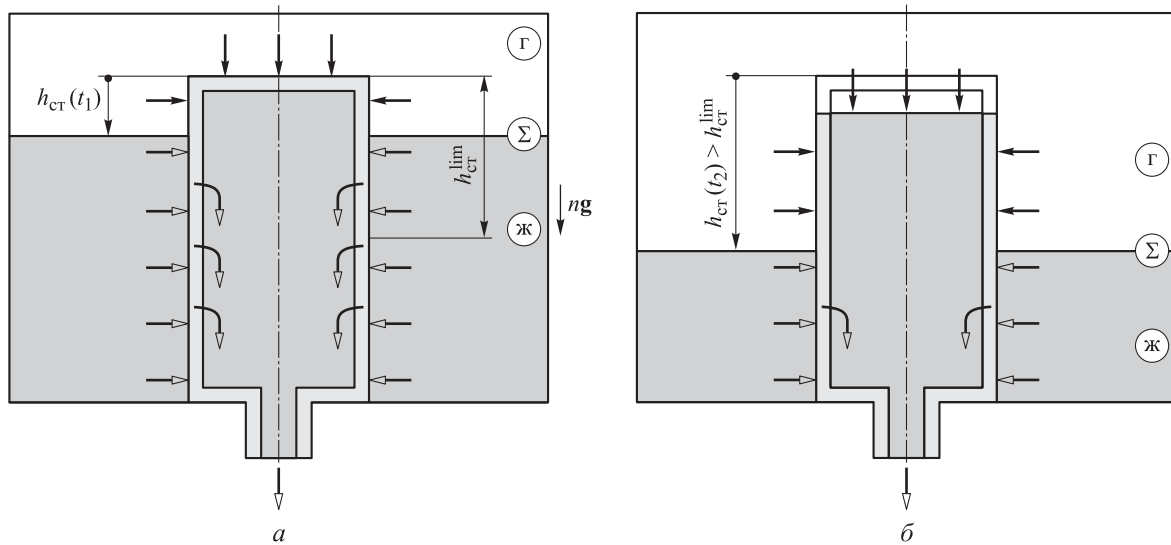


Рис. 1. Схема функционирования КЗУ

КРФ, рис. 1, б — сепарирующий режим функционирования КРФ и нарушение целостности гидравлического барьера (условно показано начало заполнения газовой фазой внутреннего объема КЗУ). Контурные стрелки на обоих рисунках указывают направление движения жидкости, сплошные — отмечают наличие внешнего давления газовой фазы. Введенные обозначения «Г» и «Ж» соответствуют газовой и жидкой фазе; t_1 и t_2 — различному времени динамического процесса выработки жидкости из емкости, причем $t_2 > t_1$.

Для повышения эксплуатационных характеристик КЗУ в условиях переменной КУС и изменяющихся физических свойств жидкой среды требуется обеспечить выполнение неравен-

ства (1). Для этого необходимо решить задачу минимизации функции Φ . Одним из подходов к получению минимального значения Φ является использование предложенного способа.

Сущность способа отбора жидкости из емкости. Известны способы отбора жидкости из емкости, основанные на применении различных физических принципов: механического (инерционные, эластичные и металлические разделители газовой и жидкой фаз и др.) [5], капиллярного (сеточные и пористые КРФ) [4, 6], комбинированного (сочетание механического и капиллярного способов) и другие, реализованные в различных устройствах и системах [7].

Предложенный способ относится к инерционно-капиллярным способам отбора жидкой компоненты гомогенной смеси с газовыми включениями. Его отличительной особенностью является то, что в процессе отбора жидкости уменьшают объем КЗУ так, чтобы его высота h_{ct} над поверхностью Σ в емкости в направлении действия вектора n_{Σ} была меньше высоты гидростатического столба, удерживаемого силами поверхностного натяжения КРФ h_{ct}^{lim} : $h_{ct} < h_{ct}^{lim}$. Для этого в процессе отбора жидкости используется неуравновешенная сила всестороннего сжатия при появлении перепада давления между внутренней полостью КЗУ, расположенной над поверхностью Σ , и газовой полостью емкости, возникающей при выполнении системы неравенств (без ограничений общности рассмотрен случай уменьшения объема КЗУ в направлении вектора ng в соответствии с рис. 2):

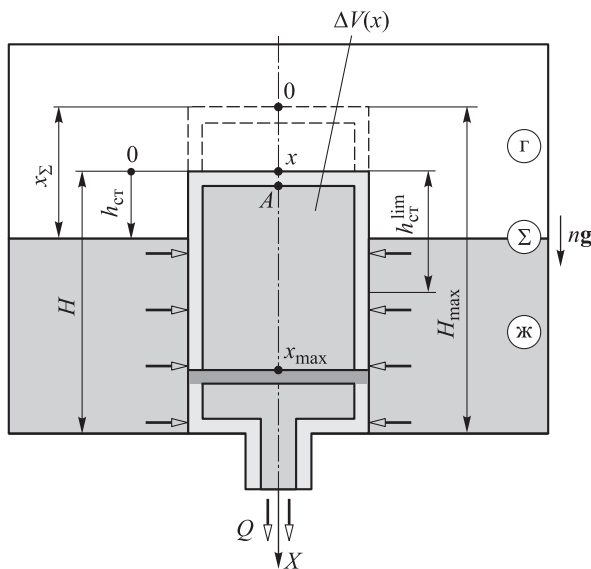


Рис. 2. Схема функционирования АУ

$$\begin{cases} m_{\text{пр}}ng + \rho_{\text{ж}}ng [x_{\Sigma}(Q) - x]S_{\text{эф}} - \\ - \tilde{c}_{\text{КЗУ}} [x_{\Sigma}(Q)S_{\text{эф}} - \Delta V(x)] \geq 0; \\ \text{КУС} \geq \rho_{\text{ж}}ng [x_{\Sigma}(Q) - x] + \Delta p_{\text{сум}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $m_{\text{пр}}$ — приведенная масса подвижной части конструкции КЗУ; x_{Σ} — перемещение поверхности Σ в емкости относительно исходного положения конструкции КЗУ; Q — объемный расход жидкости из емкости; x — перемещение конструкции КЗУ в процессе уменьшения объема относительно исходного состояния, $x \in [0; x_{\text{max}}]$ (x_{max} — перемещение конструкции КЗУ при максимальном уменьшении объема); $S_{\text{эф}}$ — эффективная площадь КЗУ в направлении вектора \mathbf{n}_{Σ} (площадь ортогональной к вектору \mathbf{n}_{Σ} проекции конструкции КЗУ, расположенной над поверхностью Σ в области газовой фазы); $\tilde{c}_{\text{КЗУ}}$ — приведенный коэффициент жесткости конструкции КЗУ, $\tilde{c}_{\text{КЗУ}} = c_{\text{КЗУ}}/S_{\text{эф}}$ ($c_{\text{КЗУ}}$ — коэффициент жесткости); $\Delta V(x)$ — объем КЗУ, расположенный над поверхностью Σ в области газовой фазы.

Для снижения остатка жидкости в емкости уменьшается объем КЗУ в процессе отбора жидкой среды путем использования неуравновешенной силы всестороннего сжатия, возникающей и действующей на конструкцию КЗУ при появлении перепада давления между внутренней полостью КЗУ, расположенной над поверхностью Σ , и газовой полостью емкости.

Оценим условия, определяющие возможность реализации способа. Введем неподвижную систему координат OX , $x \in [0; x_{\text{max}}]$, представленную на рис. 2. Определим координату $h_{\text{ст}}$ — текущее значение высоты удерживаемого столба жидкости ($h_{\text{ст}} \geq 0$), которая отсчитывается от подвижной части конструкции КЗУ. На рис. 2 обозначены: H_{max} — высота конструкции КЗУ в исходном состоянии, H — текущее значение высоты конструкции КЗУ.

Получим систему неравенств (2). Запишем проекцию уравнения движения подвижной части конструкции КЗУ на ось OX , пренебрегая силой трения, возникающей при движении массы жидкости внутри КЗУ:

$$m_{\text{пр}} \frac{d^2x}{dt^2} = p_{\text{г}}S_{\text{эф}} + m_{\text{пр}}ng - p_{\text{ж}}^A S_{\text{эф}} - F_{\text{КЗУ}}, \quad (3)$$

где t — время; $p_{\text{г}}$ — давление газа; $p_{\text{ж}}^A$ — давление жидкости в точке A ; $F_{\text{КЗУ}}$ — сила сопро-

тивления, обусловленная жесткостью конструкции КЗУ.

Из уравнения (3) следует, что уменьшение объема КЗУ происходит только тогда, когда выполнено алгебраическое неравенство

$$p_{\text{г}}S_{\text{эф}} + m_{\text{пр}}ng - p_{\text{ж}}^A S_{\text{эф}} - F_{\text{КЗУ}} \geq 0. \quad (4)$$

Согласно принципу Галилея — Торричелли давление жидкости в точке A $p_{\text{ж}}^A$ определяется давлением газовой фазы $p_{\text{г}}$ и высотой столба жидкости $h_{\text{ст}}$:

$$p_{\text{ж}}^A = p_{\text{г}} - \rho_{\text{ж}}ngh_{\text{ст}} = p_{\text{г}} - \rho_{\text{ж}}ng(x_{\Sigma} - x). \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в неравенство (4), имеем

$$m_{\text{пр}}ng + \rho_{\text{ж}}ng(x_{\Sigma} - x)S_{\text{эф}} - F_{\text{КЗУ}} \geq 0. \quad (6)$$

Модуль силы сопротивления $F_{\text{КЗУ}}$ определяется выражением

$$F_{\text{КЗУ}}(x) = \tilde{c}_{\text{КЗУ}} [x_{\Sigma}S_{\text{эф}} - \Delta V(x)]. \quad (7)$$

Положение поверхности Σ в емкости определяется в общем случае объемным расходом жидкости Q :

$$x_{\Sigma} = x_{\Sigma}(Q). \quad (8)$$

Подставляя формулы (7) и (8) в неравенство (6), окончательно получаем

$$\begin{aligned} m_{\text{пр}}ng + \rho_{\text{ж}}ng [x_{\Sigma}(Q) - x]S_{\text{эф}} - \\ - \tilde{c}_{\text{КЗУ}} [x_{\Sigma}(Q)S_{\text{эф}} - \Delta V(x)] \geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Отметим, что сила всестороннего сжатия появляется только в том случае, если в процессе уменьшения объема КЗУ не нарушена удерживающая способность гидравлического барьера, т. е. выполнено условие (1):

$$\text{КУС} \geq \rho_{\text{ж}}ng [x_{\Sigma}(Q) - x] + \Delta p_{\text{сум}}. \quad (10)$$

Неравенства (9) и (10) образуют систему, которая определяет воздействие неуравновешенной силы всестороннего сжатия на снижение объема КЗУ. Таким образом, при использовании предлагаемого способа суммарный остаток жидкости зависит от геометрических характеристик КЗУ в емкости и может быть уменьшен (при одинаковых значениях КУС, расхода топлива, исходного объема КЗУ) на разность объемов жидкости (внутри КЗУ) в исходном и конечном состояниях КЗУ и на разность между объемом жидкости в емкости (вне КЗУ), соответствующим КУС в исходном состоянии КЗУ, и минимальным объемом жидкости в емкости,

соответствующим минимальному конструктивному объему КЗУ в конечном состоянии.

Техническое устройство, реализующее способ.

В качестве прототипа конструкции КЗУ, функционирующего согласно описанному способу, предложено АУ, выполненное в виде сильфона. Боковая поверхность устройства отбора жидкости сформирована из тканой металлической сетки и обладает механической податливостью вдоль оси симметрии КРФ.

Экспериментальная установка (ЭУ). Для подтверждения адекватности способа выполнено исследование динамических характеристик АУ, их сравнение с аналогичными физическими параметрами КЗУ жесткой конструкции (далее жесткое устройство (ЖУ)). На рис. 3 приведена ЭУ, состоящая из полимерной прозрачной емкости, в которой размещен металлический штатив с закрепленным в нем прототипом АУ.

Магистраль отбора жидкости 2 представляет собой гибкий силиконовый прозрачный шланг с возможностью визуального контроля сплошности потока жидкости, соединенный с патрубком выхода, расположенным в нижней части АУ. Подвижная часть прототипа конструкции устройства 5 имеет направляющую 4, выполненную в виде стальной проволоки, которая может свободно перемещаться в специальной технологической оснастке, обеспечивая механическую податливость АУ в направлении вектора ускорения свободного падения. В качестве рабочей жидкости использована вода. Измерение ее объемного расхода выполнено постобработкой за-

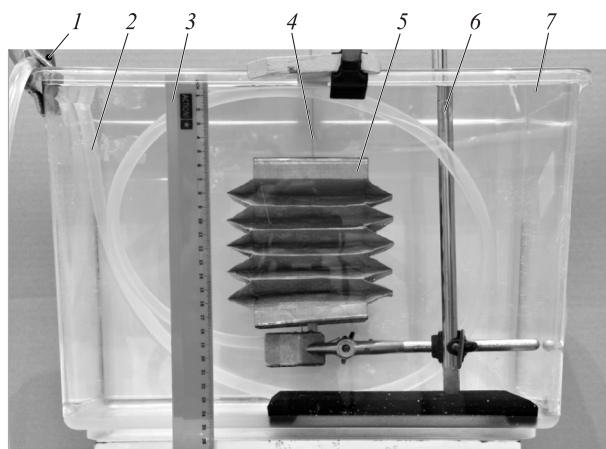


Рис. 3. Внешний вид ЭУ:

- 1 — зажим; 2 — магистраль отбора жидкости;
- 3 — тарировочная шкала; 4 — направляющая;
- 5 — прототип конструкции устройства; 6 — штатив;
- 7 — емкость с жидкостью (водой)

регистрованного видеоизображения эксперимента с использованием тарированной емкости.

Обсуждение результатов исследования. На рис. 4, а и б приведены стоп-кадры динамического процесса отбора жидкости из емкости ЭУ с использованием ЖУ и одного из прототипов АУ соответственно.

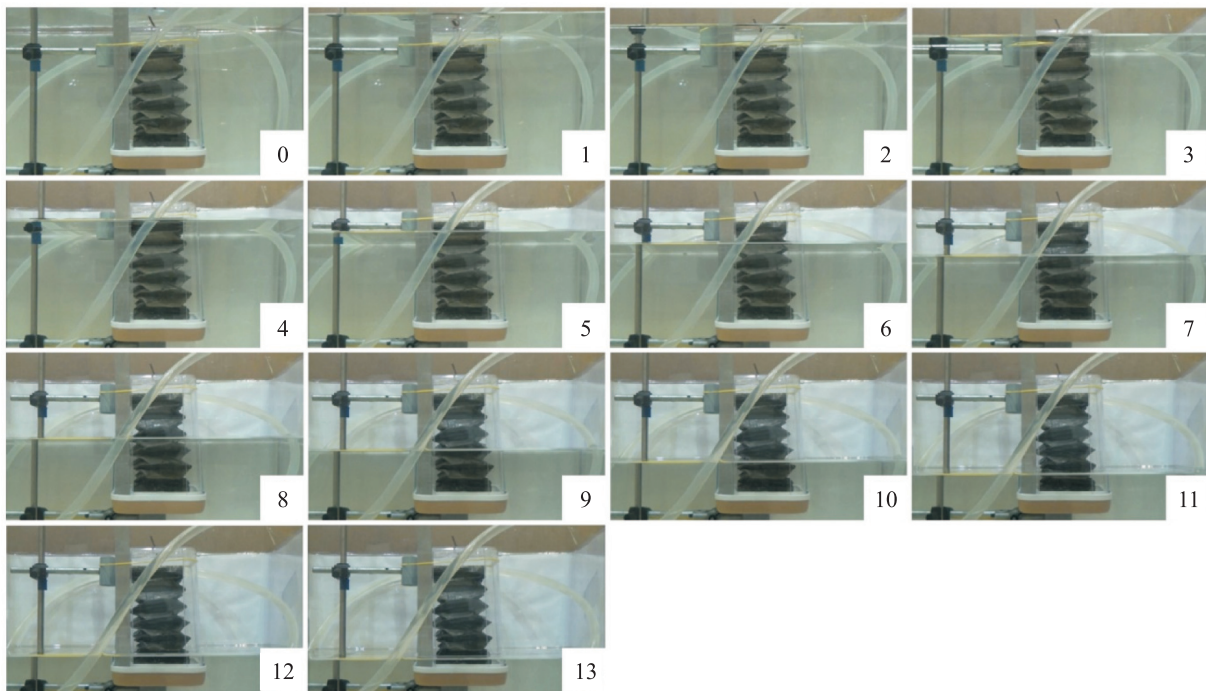
Номер стоп-кадра соответствует объему жидкости в литрах, выработанному из емкости. Так, на стоп-кадре № 0 изображена емкость ЭУ в заправленном состоянии, на стоп-кадре № 1 из емкости выработан 1 л жидкости, на стоп-кадре № 2 — 2 л жидкости и т. д. Исключение составляют стоп-кадры № 12 и 13 на рис. 4, а, а также стоп-кадр № 13 на рис. 4, б. Стоп-кадр № 12 рис. 4, а соответствует началу проникновения газовой фазы в ЖУ через КРФ, но из емкости выработано 11,5 л жидкости. Далее вследствие нарушения гидравлического барьера в магистраль отбора жидкости поступает газожидкостная смесь (стоп-кадр № 13).

Стоп-кадр № 13 на рис. 4, б также соответствует ситуации поступления газа в АУ, конструктивный объем которого немного увеличивается, а стоп-кадр № 3' (не показан, так как он не отличается от стоп-кадра № 3) — началу процесса перемещения конструкции АУ. В таблице показано соответствие номера стоп-кадра временному значению динамического процесса.

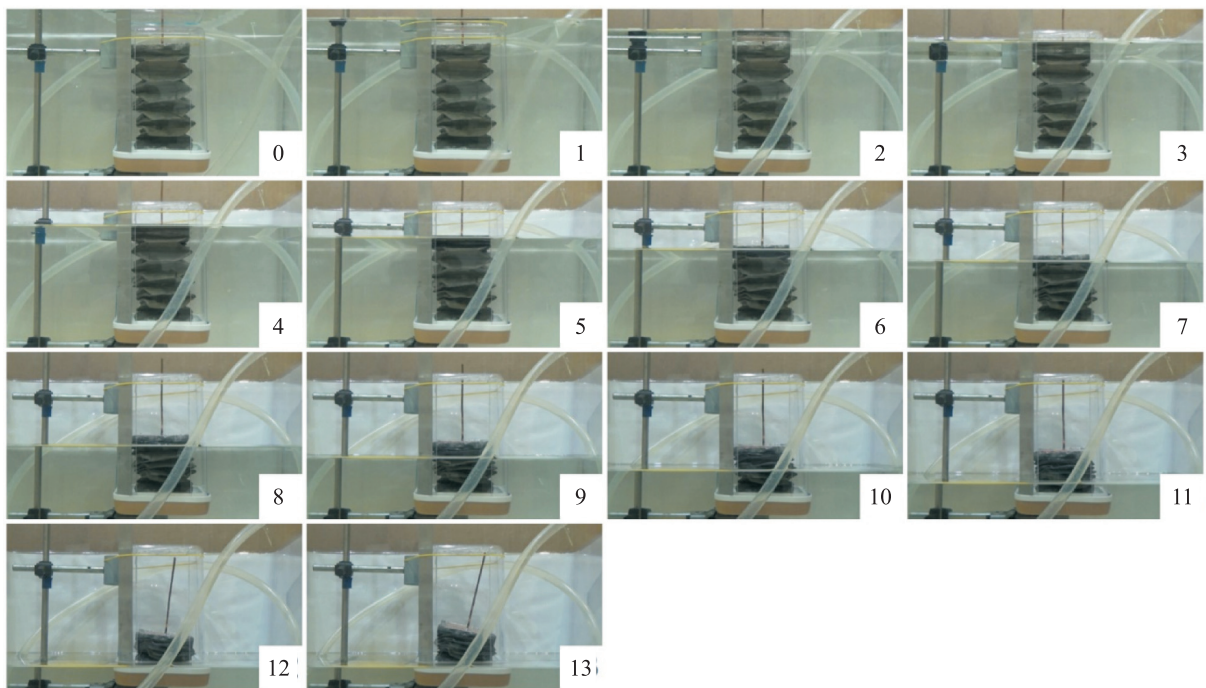
Отметим, что жесткая конструкция устройства получена ограничением степени свободы АУ вдоль его оси симметрии с помощью закрепления подвижной части в технологической оснастке.

Условия эксперимента: температура окружающей среды 20 °С, атмосферное давление 99,1 кПа, $Q = 31,3$ мл/с, $n = 1$. Физические характеристики жидкости: $\rho_{ж} = 997,8$ кг/м³, $\sigma = 78,9$ мН/м, максимально возможный объем вырабатываемой жидкой среды, обусловленный конструктивными особенностями ЭУ, равен 12 л. Структурные и физические характеристики КРФ: $d_{экв} = 303$ мкм, $KУС = 963$ Па (вычисленная без ограничений общности при $\Delta p_{сум} = 0$, $\theta = 0^\circ$), $h_{ст}^{lim} = 98,3$ мм.

По результатам анализа стоп-кадров (см. рис. 4, а и б) построены функции Φ^R и Φ^A , для которых $\Phi^R(t) = \Phi(h_{ст}^R(t), 0, 1)$ и $\Phi^A(t) = \Phi(h_{ст}^A(t), 0, 1)$ при $\Delta p_{сум} = 0$ и $n = 1$ (рис. 5), где $h_{ст}^R(t)$ и $h_{ст}^A(t)$ — высота удерживаемого столба жидкости ЖУ и АУ. Точками на графиках



а



б

Рис. 4. Стоп-кадры динамического процесса отбора жидкости с помощью ЖУ (а) и АУ (б)

обозначены номера соответствующих стоп-кадров, показанных на рис. 4, а и б.

Установлено, что в момент времени $t = 350$ с от начала эксперимента (точка 12 кривой $\Phi^R(t)$) ЖУ начинает пропускать газовую фазу через КРФ по причине нарушения гидравлического барьера (см. рис. 4, а, стоп-

кадр № 12). В этом случае графики $KUC(t)$ и $\Phi^R(t)$ пересекаются в точке 12 с координатами (350, 963), которая соответствует выражению $h_{cr}^R(t) = h_{cr}^{lim}$, и при $t > 350$ с неравенство (1) не выполняется. При этом невыработанный объем жидкости в емкости ЭУ составляет 0,5 л (4,2 % максимально возможного объема вырабатыва-

**Значения времени динамического процесса
для стоп-кадров при отборе жидкости
с помощью ЖУ и АУ**

Номер стоп-кадра	Время, с	Номер стоп-кадра	Время, с
0	0/0	6	163/179
1	26/28	7	192/212
2	52/58	8	221/244
3'	-/87,784	9	251/277
3	79/88	10	282/311
4	106/118	11	313/345
5	134/149	12	350/381

Примечание. В числителе дроби указаны значения для ЖУ, в знаменателе — для АУ.

емой жидкой среды). В случае применения АУ точка 12 кривой $\Phi^A(t)$ (см. рис. 5) соответствует практически полному отбору максимально возможного объема вырабатываемой жидкой среды (~12 л).

Процесс перемещения АУ силой всестороннего сжатия, которому соответствует стоп-кадр № 3' на рис. 4, б (не показан), начинается в момент времени $t \approx 87,8$ с от начала эксперимента, в точке 3' кривой $\Phi^A(t)$. В каждый момент времени $t > 87,8$ с точки графика функции Φ^A

расположены ниже кривой $\Phi^R(t)$, т. е. $\Phi^A(t) < \Phi^R(t) \forall t > 87,8$ с. Это свидетельствует о том, что правая часть неравенства (1) изменяется вследствие корректировки (уменьшения) объема конструкции КЗУ. В этом случае существование гидравлического барьера определяется не формулой (1), а вторым неравенством системы (2).

Отметим, что по завершении отбора максимально возможного объема жидкости (точка 12 кривой $\Phi^A(t)$) начинается процесс нарушения функционирования гидравлического барьера АУ (см. рис. 4, б, стоп-кадр № 12). В отличие от ЖУ это обусловлено расходом жидкой среды, расположенной внутри максимально сжатого КЗУ.

Для заданного класса КРФ $CPS\{\sigma, \theta, d_{\text{экв}}\}$, индуцированного параметрами σ , θ и $d_{\text{экв}}$, определим относительный коэффициент адаптивности:

$$k_{CPS}^{AR} = 2 - \Phi^A(t^A) / \Phi^R(t^R), \quad (11)$$

где t^A и t^R — момент времени, при котором нарушается функционирование гидравлического барьера ЖУ и АУ.

Заметим, что $k_{CPS}^{AR} \in [1; 2]$ в классе $CPS\{\sigma, \theta, d_{\text{экв}}\}$, причем $k_{CPS}^{AR} = 1$ соответствует ЖУ, а $k_{CPS}^{AR} = 2$ — АУ, обладающему КРФ с высокой степенью податливости. В точке 12 кривой $\Phi^R(t)$ выполнено

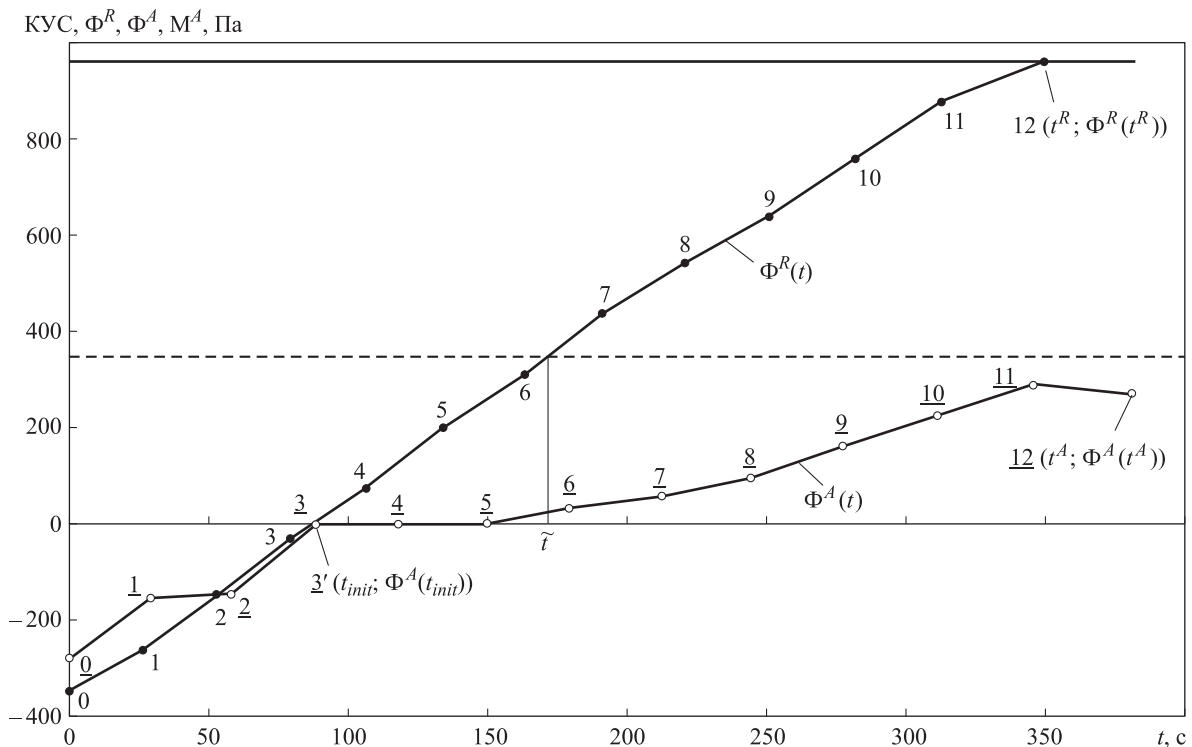


Рис. 5. Зависимость функциональных характеристик ЖУ и АУ от времени t :
— — КУС; ● — $\Phi^R(t)$; ○ — $\Phi^A(t)$; - - - - M^A

равенство $\Phi^R(t^R) = \text{КУС}$, поэтому формула (11) запишется в виде $k_{CPS}^{AR} = 2 - \Phi^A(t^A)/\text{КУС}$. Отметим, что задача минимизации функции Φ из неравенства (1) сводится к эквивалентной формулировке $k_{CPS}^{AR} \rightarrow \max$, так как

$$(k_{CPS}^{AR})_{\max} = \lim_{\Phi^A \rightarrow 0} k_{CPS}^{AR}.$$

Поскольку для рассматриваемого АУ k_{CPS}^{AR} отличен от единицы (приблизительно равен 1,72), введем постоянную (не зависящую от времени) функцию M^A , для которой при $\forall t \in [0; t^A]$ выполняется неравенство:

$$\text{КУС} \geq M^A > \Phi^A. \quad (12)$$

С одной стороны, формула (12) и рис. 5 показывают, что при минимизации функции Φ существует некоторый момент времени $\tilde{t} \in [t_{init}; t^A]$ (t_{init} — время начала перемещения подвижной части конструкции АУ), и справедлива система неравенств:

$$\begin{cases} \text{КУС} > M^A > \Phi^R \geq \Phi^A \quad \forall t \in [t_{init}; \tilde{t}], \\ \text{КУС} \geq \Phi^R \geq M^A > \Phi^A \quad \forall t \in [\tilde{t}; t^A]. \end{cases} \quad (13)$$

Соотношения (13) определяют функцию Φ^A как искомое локальное оптимальное значение Φ при решении задачи $\Phi \rightarrow \min$. Следовательно, для АУ классическое неравенство (1) можно уточнить и представить в виде $M^A > \Phi^A$.

С другой стороны, при $k_{CPS}^{AR} \in (1; 2]$ КЗУ автоматически реализует коэффициент запаса КУС АУ $k_{зап}^A \in \mathbb{R}$, $k_{зап}^A > 1$ [4], определяемый по формуле $k_{зап}^A = \text{КУС}/M^A$. Для рассматриваемой конструкции АУ $k_{зап}^A$ равен 2,75 при выбранном $M^A(t) = 350$ Па. Фактически, это может означать, что вместо текущего КРФ можно использовать такой разделитель фаз, у которого при сохранении параметров σ , θ и упругих характеристик эквивалентный диаметр $d_{экв}$ больше в $k_{зап}^A$ раз.

Математическая модель. Для компьютерного моделирования динамических процессов при работе АУ в составе системы выработки жидкости [8] обозначена структура комплексной нестационарной математической модели на основе фундаментальных законов механики сплошной среды, которая включает в себя:

- одномерную нестационарную модель изменения термодинамических параметров реального газа в переменном свободном объеме газожидкостной полости емкости [9, 10];
- трехмерную нестационарную модель движения однородной жидкой среды через дефор-

мируемый КРФ в переменном жидкостном объеме газожидкостной полости емкости [11–19];

- механическую модель поступательного движения подвижной части конструкции устройства под действием силы естественной и/или искусственной гравитации, а также поверхностных сил от взаимодействия с газовой и жидкой фазами [1, 20];

- трехмерную нестационарную асимптотическую модель поверхностных и объемных эффектов взаимодействия однородной жидкой среды, газовой фазы и материала КРФ в деформируемой боковой поверхности устройства [21–23].

Практическое применение способа. Предложенный способ отбора жидкости может найти применение в инженерно-технических системах различного назначения, таких как топливные системы космических летательных аппаратов; топливные системы атмосферных летательных аппаратов, для которых характерно секционирование бака, его загроможденность элементами подсистем, наличие различной по модулю и направлению суммарной перегрузки, высокочастотной вибрации и высокой температуры жидкого топлива; системы выработки жидкостей из баков сложной пространственной конфигурации; системы выработки химически опасных и радиоактивных жидкостей и газожидкостных смесей.

Выводы

1. Показана принципиальная возможность создания КЗУ, адаптирующегося к воздействию внешних факторов путем корректировки (уменьшения) геометрических размеров.

2. Экспериментально подтверждено, что такая корректировка может быть обеспечена в адаптивном (податливом) КЗУ за счет естественной силы всестороннего сжатия, воздействующей на его конструкцию в процессе выработки жидкости из емкости с момента появления капиллярного гидравлического барьера.

3. Представлены методические основы и структура комплексной математической модели физических процессов выработки жидкости из емкости через КЗУ изменяемой геометрии.

4. Результаты исследования позволяют расширить область применения КЗУ на системы, работающие в условиях нехарактерных для КЗУ воздействующих факторов.

Литература

- [1] Дергачев А.А., Иванов М.Ю., Кабанов В.А., Куранов Е.Г., Новиков А.Е., Реш Г.Ф., Большаков В.А., Новиков Ю.М. *Способ выработки топлива из бака летательного аппарата*. Пат. 2617903 РФ, 2017, бюл. № 13, 12 с.
- [2] Реш Г.Ф., Иванов М.Ю., Новиков А.Е., Куранов Е.Г. Способ отбора жидкости из емкости с использованием адаптивных инерционно-капиллярных устройств. *Актуальные проблемы космонавтики. Тр. XLII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства*, Москва, 23–26 января 2018, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 421–422.
- [3] ТУ 14-4-507–99. *Сетка тканая с квадратными ячейками микронных размеров*. 3 с.
- [4] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М., Синцов А.Л., Сухоставец В.Ф. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. Москва, Энергомаш, 1997. 328 с.
- [5] Козлов А.А., Новиков В.Н., Соловьев Е.В. *Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок*. Москва, Машиностроение, 1988. 352 с.
- [6] Челомей В.Н., Полухин Д.А., Миркин Н.Н., Орещенко В.М., Усов Г.Л. *Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями*. Москва, Машиностроение, 1978. 240 с.
- [7] Никитин В.И., Куранов Е.Г., Реш Г.Ф. *Топливный бак летательного аппарата*. Пат. 2497724 РФ, 2013, бюл. № 31, 8 с.
- [8] Новиков А.Е., Реш Г.Ф., Иванов М.Ю. Методика моделирования выработки топлива из баков летательных аппаратов в условиях воздействия знакопеременных перегрузок. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 2, с. 99–110. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/533503.html> (дата обращения 15 апреля 2018).
- [9] Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И. *Основы проектирования систем пневмо- и гидроавтоматики*. Москва, Издательский дом «Спектр», 2017. 459 с.
- [10] Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П. *Математические модели систем пневмоавтоматики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 296 с.
- [11] Димитриенко Ю.И. *Механика сплошной среды. В 4 т. Т. 3: Основы механики жидкости и газа*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.
- [12] Park J.-W., Ruch D., Wirtz R.A. Thermal/Fluid Characteristics of Isotropic Plain-Weave Screen Laminates as Heat Exchange Surfaces. *40th AIAA Aerospace Sciences*, 2002, AIAA Paper 2002–0208, pp. 1–9.
- [13] Bommesetty R.V.N., Joshi D.S., Kollati V.R. Flow Loss in Screens: A Fresh Look at Old Correlation. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2013, vol. 3, pp. 29–34.
- [14] Tian J., Kim T., Lu T.J., Hodson H.P., Queheillalt D.T., Sypek D.J., Wadley H.N.G. The Effects of Topology upon Fluid-Flow and Heat-Transfer within Cellular Copper Structures. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2004, vol. 47, pp. 3171–3186, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.010.
- [15] Fischer A., Gerstmann J. Flow Resistance of Metallic Screens in Liquid, Gaseous and Cryogenic Flow. *5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, München, 1–5 July 2013, pp. 1–12.
- [16] Middelstädt F., Gerstmann J. Numerical Investigations on Fluid Flow through Metal Screens. *5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, München, 1–5 July 2013, pp. 1–15.
- [17] Давыдова А.В. Гидравлическое сопротивление сетчатых разделителей фаз в нестационарном потоке жидкости. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2014, т. 4, № 7(70), с. 25–29.
- [18] Tsuchiya T., Koishi Y., Iwamoto M., Yamada H. Possibility of a Straightening Flow-Meter by Using Woven Screen. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2015, vol. 5, pp. 34–38, doi: 10.4236/ojfd.2015.51005.
- [19] Костюков А.В., Макаров А.Р., Мерзликин В.Г. Исследование теплогидравлических процессов в пористо-сетчатой матрице роторного теплообменника. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 1, с. 129–140.

- [20] Зарубин В.С. *Математическое моделирование в технике*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 496 с.
- [21] Корнев К.Г. *Пены в пористых средах*. Москва, Физматлит, 2001. 192 с.
- [22] Димитриенко Ю.И., Иванов М.Ю. Моделирование нелинейных динамических процессов переноса в пористых средах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2008, № 1, с. 24–38.
- [23] Иванов М.Ю. *Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых пористых системах с фазовыми превращениями*. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 16 с.

References

- [1] Dergachev A.A., Ivanov M.Yu., Kabanov V.A., Kuranov E.G., Novikov A.E., Resh G.F., Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M. *Sposob vyrabotki topliva iz baka letatel'nogo apparata* [Method of fuel production from the tank of the aircraft]. Patent RF no. 2617903, 2017, 12 p.
- [2] Resh G.F., Ivanov M.Yu., Novikov A.E., Kuranov E.G. *Sposob otbora zhidkosti iz emkosti s ispol'zovaniem adaptivnykh inertsiionno-kapillyarnykh ustroystv* [Method of fluid extraction from the reservoir using adaptive inertia-capillary devices]. *Aktual'nye problemy kosmonavtiki. Tr. 42 akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugih vydayushchihsiya otechestvennykh uchenykh-pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Actual problems of cosmonautics. Proceedings of the 42 academic readings on cosmonautics, dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists-pioneers of space exploration]. Moscow, 23–26 January 2018, Moscow, Bauman Press, 2018, pp. 421–422.
- [3] *TU 14-4-507-99. Setka tkanaya s kvadratnymi yacheykami mikronnykh razmerov* [TU 14-4-507-99. Grid woven with square cells of micron size]. 3 p.
- [4] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M., Sintsov A.L., Suhostavets V.F. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Capillary system of selection of the liquid from the tank to the spacecraft]. Moscow, Energomash publ., 1997. 328 p.
- [5] Kozlov A.A., Novikov V.N., Solov'ev E.V. *Sistemy pitaniya i upravleniya zhidkostnykh raketnykh dvigatel'nykh ustanovok* [Power and control systems for liquid rocket propulsion systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 352 p.
- [6] Chelomey V.N., Poluhin D.A., Mirkin N.N., Oreshchenko V.M., Usov G.L. *Pnevmo-gidravlicheskie sistemy dvigatel'nykh ustanovok s zhidkostnymi raketnymi dvigatelyami* [Pneumatic-hydraulic system propulsion systems, liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978. 240 p.
- [7] Nikitin V.I., Kuranov E.G., Resh G.F. *Toplivnyy bak letatel'nogo apparata* [The fuel tank of the aircraft]. Patent RF no. 2497724, 2013, 8 p.
- [8] Novikov A.E., Resh G.F., Ivanov M.Yu. *Metodika modelirovaniya vyrabotki topliva iz bakov letatel'nykh apparatov v usloviyah vozdeystviya znakoperemennykh peregruzok* [Simulation technique of fuel consumption from aircraft fuel tanks in the presence of alternating g-loads]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2013, no. 2, pp. 99–110. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/533503.html> (accessed 15 April 2018).
- [9] Arzumanov Yu.L., Halatov E.M., Chekmazov V.I. *Osnovy proektirovaniya sistem pnevmo- i gidroavtomatiki* [Basics of designing systems of pneumatic and hydraulic automation]. Moscow, Spektr publ., 2017. 459 p.
- [10] Arzumanov Yu.L., Halatov E.M., Chekmazov V.I., Chukanov K.P. *Matematicheskie modeli sistem pnevmoavtomatiki* [Mathematical models of pneumatic systems]. Moscow, Bauman Press, 2009. 296 p.
- [11] Dimitrienko Yu.I. *Mekhanika sploshnoy sredy. V 4 t. T. 3: Osnovy mekhaniki zhidkosti i gaza* [Continuum mechanics. In 4 vol. Vol. 3: Fundamentals of fluid and gas mechanics]. Moscow, Bauman Press, 2011. 463 p.

- [12] Park J.-W., Ruch D., Wirtz R.A. Thermal/Fluid Characteristics of Isotropic Plain-Weave Screen Laminates as Heat Exchange Surfaces. *40th AIAA Aerospace Sciences*, 2002, AIAA Paper 2002-0208, pp. 1-9.
- [13] Bommisetty R.V.N., Joshi D.S., Kollati V.R. Flow Loss in Screens: A Fresh Look at Old Correlation. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2013, vol. 3, pp. 29-34.
- [14] Tian J., Kim T., Lu T.J., Hodson H.P., Queheillalt D.T., Sypeck D.J., Wadley H.N.G. The Effects of Topology upon Fluid-Flow and Heat-Transfer within Cellular Copper Structures. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2004, vol. 47, pp. 3171-3186, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.010.
- [15] Fischer A., Gerstmann J. Flow Resistance of Metallic Screens in Liquid, Gaseous and Cryogenic Flow. *5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, München, 1-5 July 2013, pp. 1-12.
- [16] Middelstädt F., Gerstmann J. Numerical Investigations on Fluid Flow through Metal Screens. *5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, München, 1-5 July 2013, pp. 1-15.
- [17] Davydova A.V. Gidravlichesкое soprotivlenie setchatyh razdeliteley faz v nestatsionarnom potoke zhidkosti [The hydraulic resistance of mesh dividers of phases in the non-stationary liquid stream]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2014, vol. 4, no. 7(70), pp. 25-29.
- [18] Tsuchiya T., Koishi Y., Iwamoto M., Yamada H. Possibility of a Straightening Flow-Meter by Using Woven Screen. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2015, vol. 5, pp. 34-38, doi: 10.4236/ojfd.2015.51005.
- [19] Kostyukov A.V., Makarov A.R., Merzlikin V.G. Issledovanie teplogidravlicheskih protsessov v poristo-setchatoy matritse rotornogo teploobmennika [Research of Thermal-Hydraulic Processes in Porous Net-Shaped Matrix for Rotary Regenerator]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2017, no. 1, pp. 129-140.
- [20] Zarubin V.S. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical modeling in engineering]. Moscow, Bauman Press, 2010. 496 p.
- [21] Kornev K.G. *Peny v poristyh sredah* [Foam in porous media]. Moscow, Fizmatlit publ., 2001. 192 p.
- [22] Dimitrienko Yu.I., Ivanov M.Yu. Modelirovanie nelineynyh dinamicheskikh protsessov perenosa v poristyh sredah [Modeling of Nonlinear Dynamical Processes of Transfer in Porous Media]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences]. 2008, no. 1, pp. 24-38.
- [23] Ivanov M.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v deformiruemyyh poristyh sistemah s fazovymi prevrashcheniyami*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of dynamic processes in deformable porous systems with phase transformations. Cand. phys&math sci. diss.]. Moscow, Bauman Press, 2014, 16 p.

Статья поступила в редакцию 05.06.2018

Информация об авторах

ИВАНОВ Михаил Юрьевич (Москва) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана; старший научный сотрудник. АО «ВПК «НПО машиностроения» (143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

КУРАНОВ Евгений Геннадьевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана первый заместитель начальника Центрального конструкторского бюро машиностроения. АО «ВПК «НПО машиностроения» (143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

НОВИКОВ Андрей Евгеньевич (Реутов) — кандидат технических наук, заместитель начальника Центрального конструкторского бюро машиностроения, начальник отделения. АО «ВПК «НПО машиностроения» (143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

РЕШ Георгий Фридрихович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана; первый заместитель начальника отделения. АО «ВПК «НПО машиностроения» (143966, Реутов, Московская обл., Российская Федерация, ул. Гагарина, д. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Иванов М.Ю., Куранов Е.Г., Новиков А.Е., Реш Г.Ф. Экспериментально-теоретическое исследование адаптивного инерционно-капиллярного устройства отбора жидкости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 10, с. 94–105, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-94-105.

Please cite this article in English as:

Ivanov M.Y., Kuranov E.G., Novikov A.E., Resh G.F. Experimental and Theoretical Research of Adaptive Inertia-Capillary Device for Liquid Intake. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 10, pp. 94–105, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-94-105.

Information about the authors

IVANOV Mikhail Yurievich (Moscow) — Candidate of Science (Physics & Math), Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics. Bauman Moscow State Technical University; Senior Research Scientist. JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia (143966, Reutov, Moscow region, Gagarin St., Bldg. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

KURANOV Evgeniy Gennadievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University; First Deputy Head of the Central Design Bureau. JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia (143966, Reutov, Moscow region, Gagarin St., Bldg. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

NOVIKOV Andrey Evgenievich (Reutov) — Candidate of Science (Eng.), Deputy Head of the Central Design Bureau of Mechanical Engineering, Head of Department. JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia (143966, Reutov, Moscow region, Gagarin St., Bldg. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).

RESH Georgiy Fridrikhovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University; First Deputy Head of Department. JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia (143966, Reutov, Moscow region, Gagarin St., Bldg. 33, e-mail: vpk@vpk.npomash.ru).