

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЛИОФОБНЫЕ СИСТЕМЫ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Появившиеся в последние десятилетия результаты исследований особенностей термодинамического и механического поведения сложной высокодисперсной лиофобной системы (ВЛС), состоящей из капиллярно-пористого тела и несмачивающей это тело (лиофобной) жидкости [1 – 4], указывают на возможность ее широкого применения как в технике в целом, так и в авиационно-космической отрасли в частности. В таких системах полезная работа совершается за счет межфазного взаимодействия поверхности раздела капиллярно-пористой матрицы и лиофобной жидкости. Термодинамика поведения ВЛС отлична от традиционных рабочих тел (ВЛС обладают отрицательным температурным коэффициентом объемного расширения, т.е. при нагревании их объем уменьшается). В зависимости от параметров внешней среды (температура, механические нагрузки) в системе существенно изменяются объем и давление, что дает ей возможность автономно накапливать энергию и впоследствии выполнять полезную работу. Перечисленные особенности позволяют предположить перспективность использования ВЛС в качестве рабочего тела различных устройств.

В настоящее время уже существуют механизмы, работающие на основе свойств ВЛС [3–6]. Они могут быть разделены на две группы: механизмы, срабатывание которых происходит за счет изменения температуры ВЛС, и механизмы, элементы которых находятся под воздействием динамических механических нагрузок.

К первой группе можно отнести:

– механизм раскрытия солнечной батареи, где ВЛС нагревается принудительно [4];

– маховик переменного момента инерции [5], компенсатор давления герметичной емкости с жидкостью [6], где изменение температуры ВЛС происходит за счет изменения температуры окружающей среды.

Ко второй группе можно отнести автомобильные амортизаторы и демпферы автомобильного бампера [3].

Разработка механизмов, использующих ВЛС, базируется на проведенном теоретическом анализе, численных экспериментах с привлечением математических моделей поведения ВЛС, а также на экспериментальных исследованиях.

В работе [7] дана модель процесса теплового демпфирования, наблюдаемого в ВЛС, базирующаяся на модели пористого тела с коническими порами (рис. 1), которая может быть также применена для тел с

цилиндрическими и четочными порами (поры с переменным диаметром, в которых чередуются сужения и расширения).

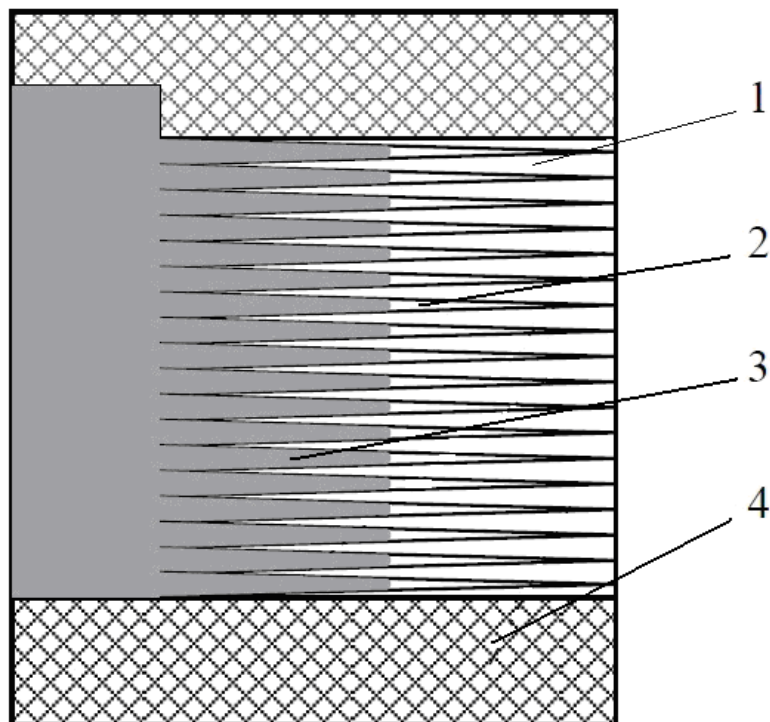


Рисунок 1 – Схема модели ЛТД: 1– матрица; 2 – поры; 3 – жидкость; 4 – теплоизоляция

Модель позволяет оценить эффективную теплопроводность элементарной ячейки пористого тела и закономерности изменения эффективной теплопроводности в зависимости от температуры.

Показано, что повышение температуры сопровождается более глубоким проникновением жидкости в поры, повышением теплопроводности и дополнительным поглощением тепла, что приводит, в свою очередь, к снижению температуры. Оценено соотношение теплоты, подводимой к ВЛС, и теплоты, затрачиваемой на образование межфазной поверхности. Таким образом, доказано, что в данном случае в соответствии с принципом Ле Шателье–Брауна наблюдается снижение температурного возмущения, т. е. система работает как тепловой демпфер.

В работе [8] представлена модель изотермической сжимаемости ВЛС на базе конической модели пор. По результатам анализа сделан вывод о том, что величина изотермической сжимаемости лиофобных систем носит сложный характер и зависит от многих факторов: геометрии пор, глубины заполнения, пористости, поверхностного натяжения, контактного угла смачивания. При давлении, превышающем капиллярное давление Лапласа

$$p_{\text{л}} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\theta$  – краевой угол смачивания поверхности матрицы лиофобной жидкостью ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ );  $r$  – радиус пор, и начале заполнения конических пор, изотермическая сжимаемость ЛС резко возрастает, и ее величина становится на несколько порядков выше сжимаемости лиофобной жидкости.

Величина поверхностного натяжения жидкости является функцией температуры жидкости, а именно, в соответствии с приведенной в [9] полуэмпирической зависимостью

$$\sigma(T) = \sigma_0 \left( 1 - \frac{T}{T_{\text{кр}}} \right)^n, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – постоянный коэффициент,  $\sigma_0 = \sigma(0)$ ;  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура, при которой  $\sigma = 0$ ;  $0,81 \leq n \leq 1,29$  для разных жидкостей, для большинства жидких металлов  $n \approx 1$ . В первом приближении для оценивания критической температуры вещества можно воспользоваться правилом Гульдберга:  $T_{\text{кр}} \approx 1,5T_{\text{кит}}$ .

Из выражений (1) и (2) очевидно, что давление, при котором начинается активное заполнение матрицы лиофобной жидкостью, является практически линейной функцией температуры.

На основании исследований, приведенных в работах [7, 8], предложена конструкция пассивного защитного устройства (ПЗУ) компенсатора давления герметичной емкости с жидкостью, которое используется в атомной, химической и других отраслях промышленности (рис. 2). В таком ПЗУ компенсация (стабилизация) давления происходит за счет изменения объема ВЛС при обратимом заполнении-опорожнении жидкостью пор матрицы.

В рабочем состоянии жидкость 8 заполняет герметичную емкость 7 полностью, сильфон 1 погружен в жидкость 8. В исходном состоянии номинальное давление  $P$  жидкости 8 в герметичной емкости 7 ниже допустимого  $P_{\text{доп}}$ , равного для рассматриваемого случая давлению Лапласа  $P_{\text{Лалл}}$ .

При давлении  $P < P_{\text{доп}} = P_{\text{Лалл}}$  лиофобная жидкость 2 не входит в поры 3-1 ПМ и в этом состоянии устройство (компенсатор давления) представляет собой практически гидравлически жесткую систему, не оказывающую влияния на работу герметичной емкости 7.

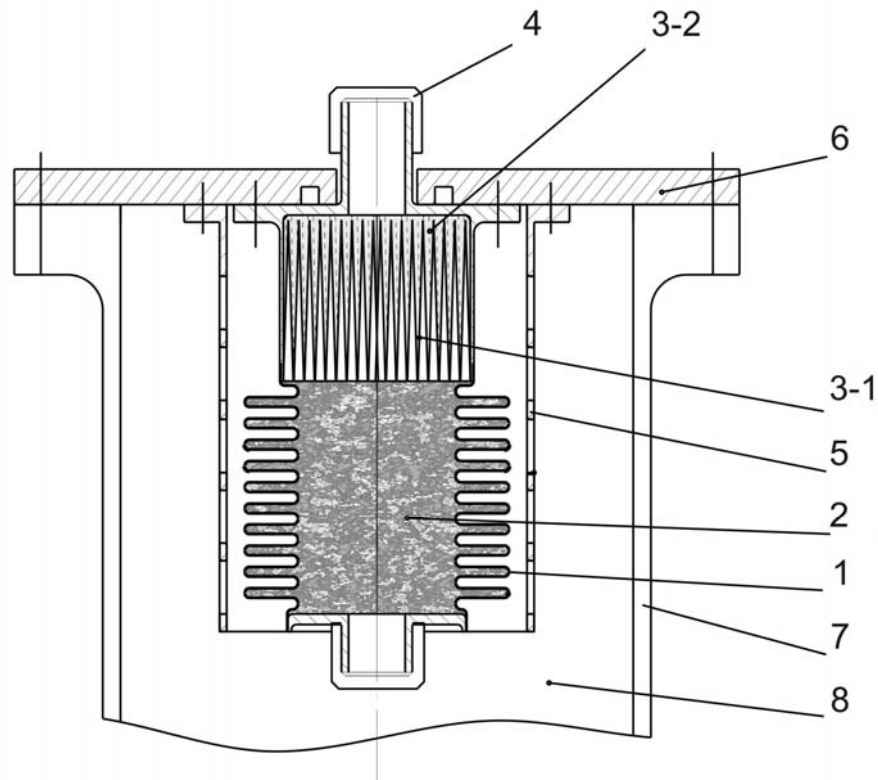


Рисунок 2 – Схема ПЗУ компенсатора давления герметической емкости:  
 1 – сиффон; 2 – лиофобная жидкость; 3 – пористый материал (ПМ), где 3-1 – поры материала, 3-2 – матрица; 4 – торцевая заглушка; 5 – направляющий перфорированный цилиндр; 6 – крышка герметической емкости; 7 – герметическая емкость; 8 – жидкость

В случае превышения давления в герметичной емкости 7, вызванного, например, ростом ее температуры (пожар), давление жидкости 8 в емкости 7 повышается. При  $P \geq P_{\text{доп}} = P_{\text{Лгапл}}$  рабочая лиофобная жидкость 2 устройства поступает в поры 3-1 пористого материала 3 и объем сиффона 1 уменьшается, при этом происходит снижение давления жидкости 8 в герметичной емкости 7. При изменении длины сиффона 1 направляющий цилиндр 5 препятствует осевому изгибу сиффона, что особенно важно при использовании длинных сиффонов и потоках жидкости 8 в емкости 7.

Также разработаны сиффонные ПЗУ по превышению температуры (рис.3), используемые в атомной энергетике.

Тепловое чувствительное пусковое устройство содержит матрицу, заполненную температурочувствительным веществом (рабочее тело 4), помещенную в герметичный сиффон с фиксированным концом и подвижным концом, который связан со спусковым механизмом. Упругий сиффон 7 в исходном состоянии сжат на величину рабочего хода. Температура плавления рабочего тела соответствует температуре срабатывания устройства. Стрелками на рисунке показано направление движения теплоносителя.

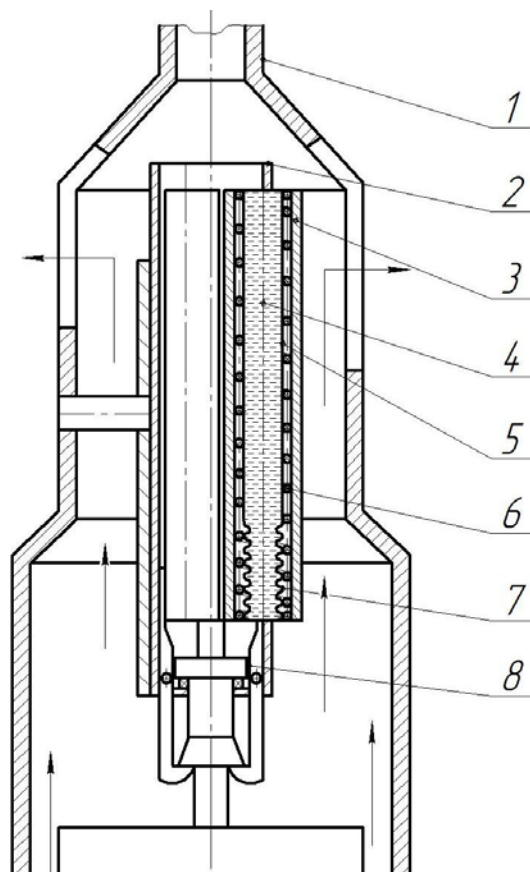


Рисунок 3 – ПЗУ по превышению температуры с тремя сифонными рабочими элементами: 1 – головка сборки защитного устройства пассивного типа; 2 – втулка подвижная; 3 – стакан подвижный; 4 – рабочее тело; 5 – контейнер; 6 – пружина высоко-температурная; 7 – сифон; 8 – стопорное кольцо

При плавлении рабочее тело выходит из пор матрицы, увеличивая объем сифона (явление гипердилатометрии при плавлении) и обеспечивая рабочий ход механизма. Дополнительно внутри подвижного стакана вдоль его оси размещена сжатая пружина 6, растягивающая сифон при плавлении температурочувствительного вещества на величину рабочего хода. Устройство позволяет увеличить безопасность эксплуатации и ресурс работы ядерных энергетических установок.

В работе [3] предложена капиллярная и корпускулярная модели поведения ВЛС на базе капиллярной, глобулярной (регулярная упаковка пересекающихся сфер) и губчатой моделей пористого тела, которые включают механизм гистерезиса в процессах расширения-сжатия; модель позволяет учесть влияние на эффект гистерезиса адгезии, топологии и величины пористого тела. На основе модели получены количественные описания теплофизических свойств системы, которые определяют характер гистерезисной петли, исследовано влияние деформационного фактора на процесс изотермического расширения сжатия ВЛС. Показано, что величина энергоемкости приборов на базе ВЛС, главным образом, определяется наличием гистерезисной петли, параметры ко-

торой могут регулироваться путем подбора соответствующих элементов рабочего тела.

Практическими результатами исследований, приведенных в работе [3], стали автомобильный амортизатор и демпферы автомобильного бампера (рис. 4).

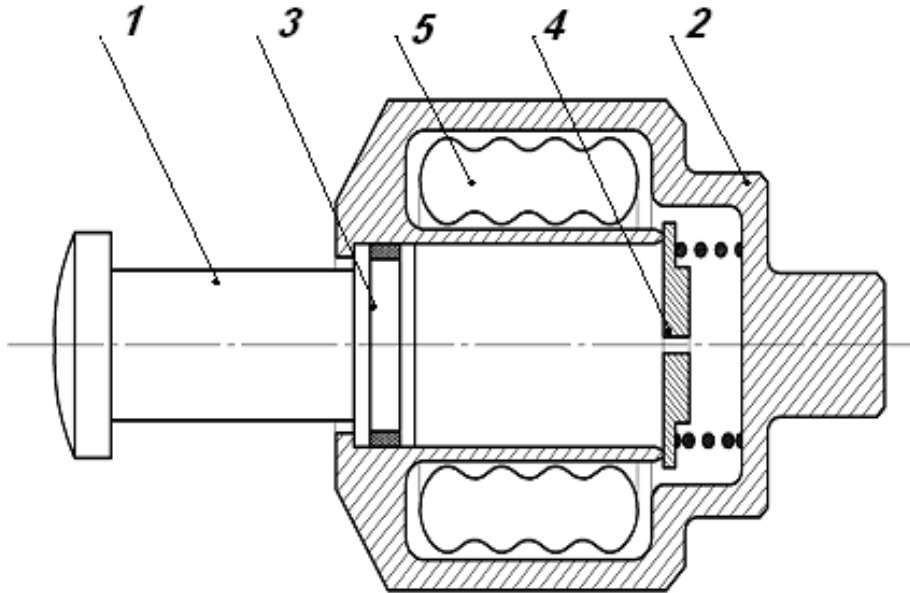


Рисунок 4 – Демпфер автомобильного бампера: 1 – шток; 2 – корпус; 3 – поршень; 4 – клапан-дроссель; 5 – гетерогенное рабочее тело

Под действием внешней нагрузки шток 1 перемещает поршень 3, давление в полости корпуса 2 возрастает. При достижении капиллярного давления Лапласа лиофобная жидкость внедряется в поры матрицы гетерогенного рабочего тела 5 (интрузия). При этом механическая энергия преобразуется в потенциальную энергию межфазовой поверхности «жидкость-твердое тело». Обратный процесс (экструзия) сопровождается высвобождением накопленной энергии, причем наблюдается явление гистерезиса, а именно, давление интрузии превышает давление экструзии. В экспериментальных исследованиях показано, что разработанный на базе ВЛС демпфер обладает более высокой по сравнению с традиционными аналогами (пнеumo- и гидроамортизаторами) мощностью диссипации энергии.

Исследование свойств и особенностей ВЛС, приведенных в работах [10, 11], позволило авторам предложить конструкцию маховика переменного момента инерции [5] (рис. 5), в котором повышение температуры рабочего тела приводит к заполнению лиофобной жидкостью пористой матрицы, расположенной на периферии вращающегося маховика, и тем самым – к увеличению его момента инерции.

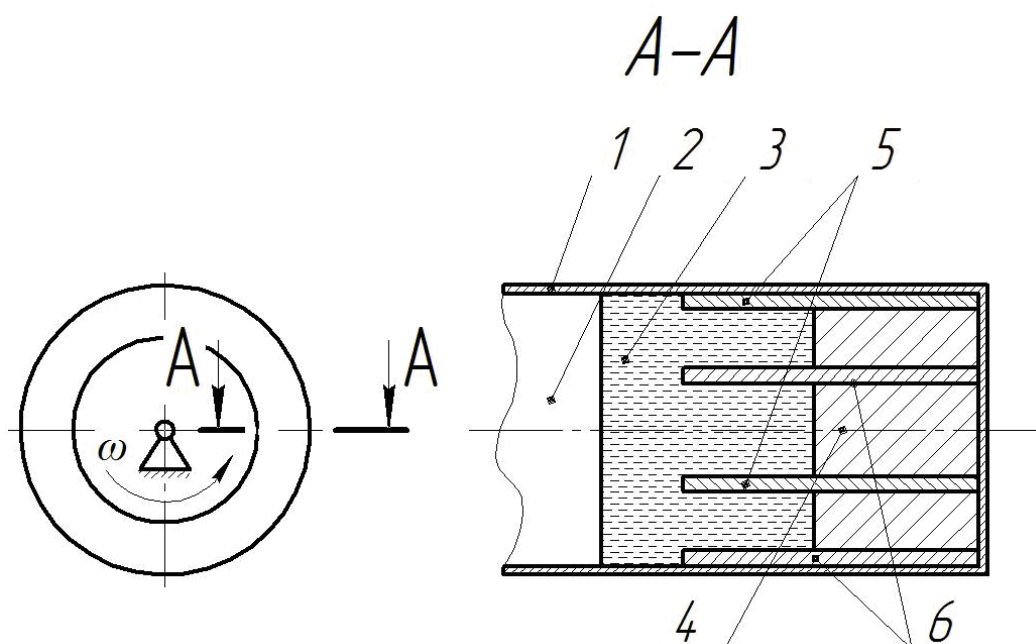


Рисунок 5 – Маховик переменного момента инерции:  
 1 – корпус; 2 – камера; 3 – подвижная среда;  
 4 – капиллярно-пористое вещество; 5 – устройства нагрева;  
 6 – устройства охлаждения

При вращении маховика с начальной частотой вращения подвижная среда 3, например жидкость, под действием центробежной силы оказывает давление на капиллярно-пористое вещество 4. Проникновению подвижной среды 3 в поры капиллярно-пористого вещества 4 препятствует капиллярное давление  $P_{\text{Капл}}$ .

Нагрев подвижной среды 3 и капиллярно-пористого вещества 4 устройством нагрева 5 снижает величину поверхностного натяжения подвижной среды 3 и соответственно величины капиллярного давления  $P$ , что приводит к перемещению подвижной среды 3 к периферии камеры 2 за счет проникновения в поры капиллярно-пористого вещества 4. Последнее вызывает увеличение момента инерции маховика за счет изменения расстояния между осью вращения и центром масс при постоянной скорости вращения маховика.

При охлаждении подвижной среды 3 и капиллярно-пористого вещества 4 устройством охлаждения 6 возрастает величина поверхностного натяжения подвижной среды 3 и капиллярного давления  $P$ , за счет которого подвижная среда 3 освобождает поры капиллярно-пористого вещества 4, перемещаясь от периферии камеры 2 к оси вращения маховика, уменьшается расстояние между осью вращения и центром масс, что приводит к снижению момента инерции.

Работоспособность представленных механизмов подтверждает адекватность предложенных моделей поведения ВЛС и возможность создания на их основе новых устройств.

## Список использованных источников

1. Термодинамическая компактность тепловых двигателей / В.А. Ерошенко // Изв. АН УССР, Промышленная теплотехника. – 1987. – №4. – С. 74 – 78.
2. Теплообмен при заполнении фобных капилляров жидкостью / В.А. Ерошенко // Изв. АН СССР, Коллоидный журнал. – 1987. – № 5. – С. 875 – 880.
3. Студенець В.П. Термодинамічні властивості та характеристики високодисперсних ліофобних систем як нових гетерогенних робочих тіл : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.14.06 / Студенець Віктор Петрович. – К. Нац. техн. ун-т України «КПІ», 2008. – 21 с.
4. Термомолекулярная энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.te.kpi.ua>. – Загл. с экрана.
5. Пат. 2147700 Российская Федерация, F16F15/30. Маховик переменного момента инерции / Шустер Л.Ш. , Волкова Л.А. , Сафонов А.В. Заявитель и патентообладатель Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – № 98113483/28 ; заявл. 14.07.1998 ; опубл. 20.04.2000.
6. Пат. 2187742 Российская Федерация, F16L55/04. Компенсатор давления герметичной емкости с жидкостью / Портяной А.Г., Сердунь Е. Н. , Сорокин А. П., Мальцев В. Г. Заявитель и патентообладатель Гос. унитарное предприятие «Государственный научный центр Российской Федерации Физико-энергетический институт им.академика А.И. Лейпунского». – № 2000130106/06 ; заявл. 30.11.2000 ; опубл. 20.08.2002.
7. Сорокин, А.П. Закономерности теплового демпфирования в системе «капиллярно-пористое тело – несмачивающая жидкость» / А.Г. Портяной, Е.Н. Сердунь, А.П. Сорокин // Тр. регионального конкурса научных проектов в области естественных наук / Изд-во АНО «Калужский научный центр». – Калуга, 2009. – Вып. 15. – С. 232 – 236.
8. Моделирование изотермической сжимаемость лиофобных капиллярно-пористых систем [Электронный ресурс] / А.Г. Портяной, Е.Н. Сердунь, А.П. Сорокин. – Режим доступа : <http://www.ippe.ru/podrtph/labs/labsorokin/labsorokin>
9. Изучение теплофизических характеристик лиофобных капиллярно-пористых систем [Электронный ресурс] / А.Г. Портяной, Е.Н. Сердунь, А.П. Сорокин. – Режим доступа : <http://www.science-kaluga.ru>.
10. Термомолекулярная энергетика и перспективы ее применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : / [http://www.mstu.edu.ru/science/conferences/11ntk/materials/section18/section18\\_11.html](http://www.mstu.edu.ru/science/conferences/11ntk/materials/section18/section18_11.html). – Загл. с экрана.
11. Термомолекулярная энергетика и перспективы ее применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.microsystems.ru/files/publ/40.htm>.

*Поступила в редакцию 07.06.2011.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*