

О практических методах определения порометрических характеристик тонких образцов из комбинированного пористого сетчатого материала

© Л.Г. Александров¹, С.Б. Константинов¹,
А.В. Марков¹, Ю.М. Новиков², И.В. Платов¹

¹ АО «НПО Лавочкина», Химки, 141400, Россия

² ООО «ЦВТМ при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, 105005, Россия

Показано значение порометрических характеристик пористой структуры в газожидкостном потоке в качестве фазоразделителя для оценки его работоспособности во внутрибаковых устройствах капиллярного типа топливных баков космических двигательных установок. Отмечено, что для изготовления проницаемого фазоразделителя со стабильной капиллярной структурой, а также с возможностью получения заданного значения гидравлического сопротивления целесообразно применять комбинированный пористый сетчатый материал. Представлена методика подготовки поверхности проницаемой структуры материала фазоразделителя к испытаниям на основе применения метода «пузырька» для практического определения одной из характеристик пористой структуры — капиллярной удерживающей способности. Рассмотрены принципы применения различных смачивающих жидкостей — воды, глицерина, этилового спирта. С учетом малых толщин фазоразделителей из комбинированных пористых материалов описаны разные виды схемных решений испытательных установок по определению капиллярной удерживающей способности пористых сетчатых материалов, отличающиеся от традиционных, применяемых в порометрии почв, горных пород и полученных на основе порошковой металлургии фильтрующих материалов.

Ключевые слова: сетчатый материал, газожидкостный поток, капиллярная удерживающая способность, коэффициент работоспособности, метод «пузырька», метод «сообщающихся сосудов», смачивающая жидкость

Введение. В данной статье рассматривается практическое определение такой характеристики проницаемых пористых структур, как капиллярная удерживающая способность (КУС). Если известны значения КУС проницаемой пористой структуры, а также ее гидравлического сопротивления газожидкостному потоку, можно оценить сепарирующие возможности этой структуры в качестве разделителя фаз при использовании в конкретных технических конструкциях. Когда практически требуется определить значение КУС проницаемой пористой структуры методом «пузырька», следует учитывать, что существенную роль в обеспечении достоверности получаемых результатов играют тщательность подготовки поверхности исследуемой структуры к испытаниям, правильный выбор смачивающей ее жидкости, а также проведение подготовки кромок испытываемого

образца к закреплению в испытательной установке. Кроме того, в случае применения метода «пузырька» для тонких проницаемых структур высокой пористости, какими являются фазоразделители газожидкостных потоков, важно выбрать такую схему испытательной установки, при которой наиболее удачно он будет реализован.

Цель данной работы — представить порометрию тонких высокопористых сред, состоящих из нескольких слоев мелкоячеистых (размером в диапазоне 10...60 мкм) металлических сеток, технологически объединенных в пористый сетчатый материал.

Физические основы использования проницаемой пористой структуры в качестве разделителя фаз в газожидкостном потоке. В конструкциях внутрибаковых устройств капиллярного типа (ВБУ КТ) топливных баков космических двигательных установок (КДУ) широко используются пористые проницаемые структуры [1], изготовленные по базовой технологии получения пористых сетчатых материалов (ПСМ) сваркой давлением, а именно горячей прокаткой металлических сеток в вакууме. Такие материалы на основе металлических мелкоячеистых сеток применяют для изготовления капиллярных газожидкостных сепараторов, устанавливаемых на выходе из топливных баков КДУ, например, в фазоразделительных устройствах [2]. Схема работы такого сепаратора в газожидкостном потоке приведена на рис. 1, на котором изображен газовый пузырь, прижатый жидкостным потоком к капиллярному элементу фазоразделительного устройства. Если размер газового пузыря больше размера ячейки пористой проницаемой структуры фазоразделительного устройства, то пузырь будет задерживаться этой структурой до тех пор, пока действие силы ее гидравлического сопротивления потоку не превысит действия силы поверхностного натяжения, возникающей на границе контакта поверхности газового пузыря с твердой поверхностью границы ячейки. Это условие можно записать следующим образом [3]:

$$\omega = \frac{\Delta P_{п.н}}{\Delta P_{г.ф}} > 1, \quad (1)$$

где ω — коэффициент работоспособности фазоразделителя; $\Delta P_{п.н}$ — перепад давления на границе газовый пузырь — сетка, обусловленный действием силы поверхностного натяжения; $\Delta P_{г.ф}$ — перепад давления, вызванный гидравлическим сопротивлением фазоразделительного устройства потоку при его некотором фиксированном значении.

Минимальное значение гидравлического перепада давления на границе газовый пузырь — сетка ($\Delta P_{квс}$), при котором газ начинает проталкиваться через сетку в виде отдельных пузырьков, получило название капиллярной удерживающей способности (КУС) сетки или

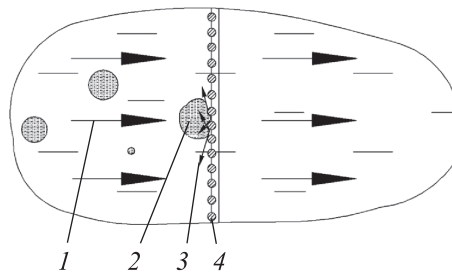
пористого проницаемого элемента. Этот процесс подробно описан в [4]. Расчет КУС для проницаемых структур выполняется по формуле

$$\Delta P_{п.н} = \Delta P_{КУС} = \frac{4\sigma \cos\Theta}{d_{п \max}}, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; Θ — краевой угол смачивания жидкостью поверхности материала сетки; $d_{п \max}$ — максимальный размер приведенной к цилиндрической форме поры (или круглой ячейки сетки) в элементе фазоразделителя.

Рис. 1. Схема газожидкостного потока в канале с проницаемым (сетчатым) фазоразделителем:

1 — направление движения потока жидкости; 2 — газовый пузырь; 3 — вектор силы поверхностного натяжения; 4 — сетчатый фазоразделительный элемент (далее — сетка, проницаемый элемент)



Для ПСМ, характеризующихся объемом пористой проницаемой структуры, гидравлическое сопротивление потоку можно традиционно определить по зависимости

$$\Delta P_{г.ф} = \zeta \frac{\rho W_{\phi}^2}{2}, \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкости; W_{ϕ} — скорость потока жидкости в ячейки сетки, представляющая собой отношение скорости набегающего потока к пористости проницаемого тела; ζ — коэффициент сопротивления элемента КПСМ потоку жидкости, зависящий от числа Рейнольдса.

Коэффициент сопротивления ζ предлагается аппроксимировать степенным выражением

$$\zeta = A + B \text{Re}^m. \quad (4)$$

Здесь A , B , m — интерполяционные коэффициенты, получаемые экспериментальным путем на основе математической обработки результатов гидравлических испытаний образцов ПСМ; Re — число Рейнольдса,

$$\text{Re} = \frac{W_{\phi} d_{п.ср}}{\nu}; \quad (5)$$

ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Используемый при расчете критерия Рейнольдса в выражении (5) характерный размер пористой среды $d_{п.ср}$ определяется экспериментально с учетом выражения (2), записанного в форме

$$\Delta P_{г.ф} = \frac{4\sigma \cos\Theta}{d_{п.ср}}. \quad (6)$$

На практике за средний размер (диаметр) пор $d_{п.ср}$ принимают условный размер, определяемый таким значением перепада давления газа, проходящего через смоченный жидкостью пористый проницаемый образец ПСМ, при котором смачивающая поверхность пористого образца жидкость начинает «кипеть» от проходящих через нее пузырьков газа. При испытаниях пористый образец ПСМ располагают горизонтально, а смачивающую жидкость наливают на его поверхность слоем толщиной 2...4 мм. Некоторые исследователи условно принимают за начало «кипения» смачивающей жидкости момент открытия всех пор проницаемого материала от присутствовавшей в них жидкости.

В методических указаниях к порометрическим приборам за $d_{п.ср}$ принимают условный размер пор проницаемого материала, соответствующий такому значению перепада газа, проходящего через смоченный жидкостью образец, при котором через образец в единицу времени начинает проходить 50 % расхода газа, измеряемого между моментом появления первых пузырьков и моментом начала полного «кипения» смачивающей жидкости. При этом фиксируемая зависимость расхода газа через образец от перепада давления газа на нем переходит от характера изменения, присущего смоченному образцу, к характеру изменения, присущего сухому образцу.

Применение в фазоразделителях проницаемых материалов на основе пористых сетчатых материалов. Разнообразие условий эксплуатации жидкостных ракетных двигательных установок порождает множество требований, предъявляемых к работе ВБУ КТ топливных баков двигательных установок космических аппаратов (КА), что влияет на требования к составам проницаемых материалов и технологиям изготовления на их основе фазоразделительных устройств. По мнению авторов статьи, наиболее полно этим требованиям соответствует комбинированный пористый сетчатый материал (КПСМ), концепция создания которого изложена в [5–7]. КПСМ успешно применяют для изготовления газожидкостных сепараторов ВБУ КТ топливных баков, так как это позволяет удовлетворять требованиям, предъявляемым не только к проницаемому полю таких материалов, но и к их монтажу в корпусные узлы ВБУ КТ.

При решении производственных задач разработки пористых проницаемых материалов и изготовления на их основе фазоразделительных

устройств для обеспечения стабильности качества КПСМ и изделий из них необходимо осуществлять производственный контроль основных параметров разрабатываемого или используемого КПСМ: капиллярной удерживающей способности ($\Delta P_{\text{КУС}}$) и гидравлического сопротивления фазоразделителя ($\Delta P_{\text{г.ф}}$) потоку при некотором фиксированном значении расхода. Эти характеристики КПСМ связаны с такими структурными параметрами, как $d_{\text{н. max}}$ и $d_{\text{н. ср}}$. Подтверждение их неизменности или поддержание их изменения в требуемом диапазоне значений в процессе изготовления фазоразделительного устройства — безусловное требование для получения надежного ВБУ КТ.

Контроль стабильности указанных характеристик КПСМ начинается с контроля целостности или с определения допустимых отклонений размеров ячеек исходных сеток перед изготовлением КПСМ и продолжается на этапе изготовления заготовок из КПСМ. Контроль стабильности характеристик КПСМ проводится и на последующих стадиях процесса изготовления фрагментов и самого фазоразделительного устройства в целом. Далее будут рассмотрены методы контроля КУС на начальной стадии производства фазоразделительных устройств — на стадии изготовления плоских заготовок из КПСМ. Для контроля КУС полученного материала КПСМ используют не сами плоские заготовки, а изготавливаемые одновременно с плоскими заготовками образца-свидетели, которые являются элементами одного и того же сетчатого поля, что и плоская заготовка. Немаловажно, что у образца свидетеля и плоской заготовки одно и то же состояние кромок КПСМ, которые в дальнейшем определяют качество соединения плоской заготовки с корпусными деталями ВБУ КТ.

Подготовка пористого элемента к экспериментальному определению КУС. Как и при контроле структурных характеристик других проницаемых материалов [8], существенное значение в экспериментальном определении КУС сепарирующего элемента, изготовленного из металлической мелкоячеистой сетки или КПСМ, имеют подготовка чистоты его поверхностей, контактирующих со смачивающей жидкостью, и качество закрепления испытуемого образца без повреждения или деформирования проницаемой поверхности. Наличие органических или минеральных загрязнений поверхности пористого элемента может приводить к увеличению значения краевого угла смачивания Θ поверхности, вплоть до полной несмачиваемости и потери КУС. Поскольку при производстве металлических мелкоячеистых сеток применяют ткацкие станки и смазывающие масла, перед определением значения КУС следует:

— убрать механические, органические и минеральные загрязнения, механически очистив поверхности сетки щетками в среде соответствующих растворителей, например нефраса;

– промыть сетку в ультразвуковой ванне в среде растворителя, проконтролировав моющее средство на присутствие органики (не более 5 мг/дм^3) и механических частиц (не более 5-го класса чистоты по ГОСТ 17216–2001) после промывки;

– прополоскать сетку в дистиллированной воде чистотой не более 5-го класса чистоты по ГОСТ 17216–2001, удалив остатки моющего вещества;

– продуть сетку сжатым воздухом, прошедшим через 5-микронный фильтр, освободив ее тем самым от воды в капельной форме;

– прополоскать сетку в этиловом спирте высшего сорта по ГОСТ Р 55878-2013 чистотой не более 5-го класса по ГОСТ 17216–2001, чтобы окончательно удалить следы воды из пористой структуры;

– продуть сетку сжатым воздухом, прошедшим через 5-микронный фильтр;

– провести термовакуумную сушку образца проницаемого материала (сетки) в течение 1 ч при температуре от $+60$ до $+90$ °С и давлении не более 665 Па (5 мм рт. ст.).

В связи с использованием проволоки из нержавеющей стали очистка сепарирующего элемента от окислов не рассматривается. Подготовленный таким образом образец-свидетель (рис. 2) необходимо поместить в пластиковый пакет, обжечь, чтобы удалить лишний воздух, и запаять.

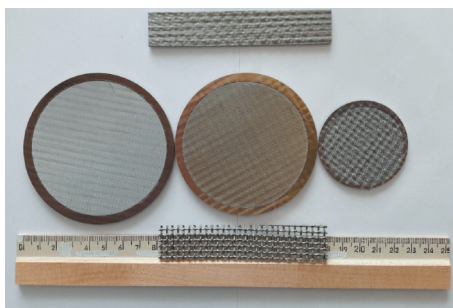


Рис. 2. Образцы КПСМ, ПСМ и сетки, прошедшей подготовку по технологии получения ПСМ, в виде кружков и плоских пластин

При установке образца или проницаемых элементов ВБУ КТ в испытательное приспособление необходимо контролировать условия его обжата по краям. Неправильное крепление может приводить к появлению первых пузырьков в зонах деформации проницаемого поля или из-под уплотняющего (нажимного) элемента. При повторных испытаниях с таким же результатом необходимо обратить внимание на возможный дефект КПСМ по краям плоской развертки элементов ВБУ КТ. Кружки КПСМ должны быть с подготовленными

кромками под установку и уплотнение в устройствах для испытаний. Плоские пластины не имеют подготовленных кромок под установку и уплотнение в устройстве для определения размеров пор $d_{п\ max}$ и $d_{п\ ср}$, в этом случае требуется выполнить специальное уплотнение кромок для правильного измерения и определения этих параметров.

Выбор смачивающей жидкости для определения КУС. Не всегда реальную жидкость, в которой работает фазоразделительное устройство, можно использовать для экспериментального определения КУС сепарирующего элемента. Поэтому используется «модельная» смачивающая жидкость, при выборе которой следует учитывать особенности подлежащих испытаниям сепарирующих элементов из металлической сетки или КПСМ:

- наличие только открытых пор (ячеек);
- малая толщина — для сеток от $6 \cdot 10^{-5}$ м и для КПСМ от $6 \cdot 10^{-4}$ м;
- сравнительно большие размеры ячеек — для сеток от $1 \cdot 10^{-5}$ м и для КПСМ от $3 \cdot 10^{-6}$ м;
- разброс размера ячеек от номинального: по ТУ на сетку 0040, 0056 допускается отклонение размеров ячеек до 90 % на площади не более 10 % и не более ± 10 % — для КПСМ.

С учетом оценки первых трех из перечисленных выше особенностей, для использования при определении КУС сепараторов из сеток и из КПСМ следует выбирать смачивающие жидкости, обладающие бóльшим значением отношения коэффициента поверхностного натяжения к плотности жидкости $[(\sigma \cos\Theta) / \rho]$. Выбор этого соотношения в качестве определяющего параметра не случаен, так как оно является частью критерия Бонда (Bo), характеризующего отношение массовых сил к силам поверхностного натяжения, действующим на границе раздела газ — жидкость:

$$Bo = \frac{\rho a l^2}{\sigma}, \quad (7)$$

где a — действующее ускорение; l — характерный размер (в случае с сетками или КПСМ — диаметр $d_{п\ max}$).

В качестве смачивающих жидкостей рекомендуются приведенные в таблице, которые подтвердили на практике [8, 9] возможность их применения при измерениях КУС на образцах, изготовленных из металлических сеток или КПСМ.

Наиболее предпочтительной жидкостью для смачивания, согласно значению комплекса $[(\sigma \cos\Theta) / \rho]$, является дистиллированная вода. Однако при ее использовании следует принимать во внимание высокую степень насыщенности воды атмосферными газами и многообра-

зие структурных состояний ее молекулы, что приводит к нестабильности значения комплекса $(\sigma \cos\Theta)$ и, следовательно, к большому разбросу значений экспериментальных результатов КУС. Для того чтобы получить высокую достоверность экспериментальных результатов по КУС, требуется проводить значительное количество опытов и долго вымачивать испытуемый образец перед началом испытаний. Далее идут почти ровень глицерин и этиловый спирт. Но этиловый спирт имеет с нержавеющей сталью значение угла смачивания, близкое к нулевому, и легко поддается удалению из пористой структуры после испытаний, что иногда позволяет использовать драгоценный образец для других исследований. Кроме того, если проводить измерения КУС на изделиях со сложным составом пористой конструкции, которые в дальнейшем должны стать рабочими, то этиловый спирт здесь можно считать наиболее предпочтительным.

Основные характеристики модельных жидкостей, используемых для смачивания

Жидкость	σ , н/м	ρ , кг/м ³	σ/ρ , м ³ /с ²	Θ , град
Дистиллированная вода	0,0729	1000	$7,29 \cdot 10^{-5}$	~ 60
Глицерин	0,0594	1250	$4,75 \cdot 10^{-5}$	~ 100
Спирт этиловый (96%-ный)	0,0228	807,8	$2,82 \cdot 10^{-5}$	~ 0

Для того чтобы получить как можно большую величину $\Delta P_{\text{КУС}}$ при наземных испытаниях пористых образцов, логично руководствоваться следующим правилом выбора смачивающей жидкости: чем больше ожидаемый размер пор сетчатого поля испытуемого образца, тем больше должно быть значение комплекса $[(\sigma \cos\Theta)/\rho]$ применяемой смачивающей жидкости.

Экспериментальные результаты по КУС, полученные на «модельной» жидкости, подлежат пересчету на жидкость «натурную». Для этого следует использовать для КУС выражение (2), представив соотношение этих параметров для «натурной» и «модельной» жидкостей:

$$\frac{\Delta P_{\text{КУСн}}}{\Delta P_{\text{КУСм}}} = \frac{\sigma_{\text{н}} \cos \Theta_{\text{н}}}{\sigma_{\text{м}} \cos \Theta_{\text{м}}}, \quad (8)$$

где «н» и «м» — индексы, обозначающие «натурную» и «модельную» жидкость соответственно.

Методы определения капиллярной удерживающей способности тонких металлических сеток или пронизаемых элементов на основе КПСМ. На практике при изучении пористых структур определяют такие параметры, как максимальный размер пор и функцию распределения пор по размерам, которые являются одними из

основных характеристик таких структур. С их помощью оценивается проницаемость пористых структур для разных проникающих сред.

Для определения в пористых материалах функции распределения пор по размерам промышленность выпускает приборы — порометры. Однако проведенные пробные испытания тонких высокопористых образцов фазоразделителей, изготовленных на основе КПСМ с максимальным размером пор, не превышающим 60 мкм, показали необходимость их конструктивной адаптации к использованию подобных материалов. Поэтому рассмотрим два метода определения КУС, практически доказавших целесообразность их применения в промышленных условиях для проведения контроля качества изготавливаемых из металлических сеток или КПСМ тонких сепарирующих элементов фазоразделительных устройств.

Метод «пузырька». Метод «пузырька» [10] основан на вытеснении газом смачивающей жидкости из контролируемой пористой структуры. Газ подается с одной из сторон пористого образца, как правило, снизу. При этом смачивающая образец жидкость тонким слоем налита на его поверхность (сверху). Схема лабораторной установки, реализующей указанный метод, представлена на рис. 3.

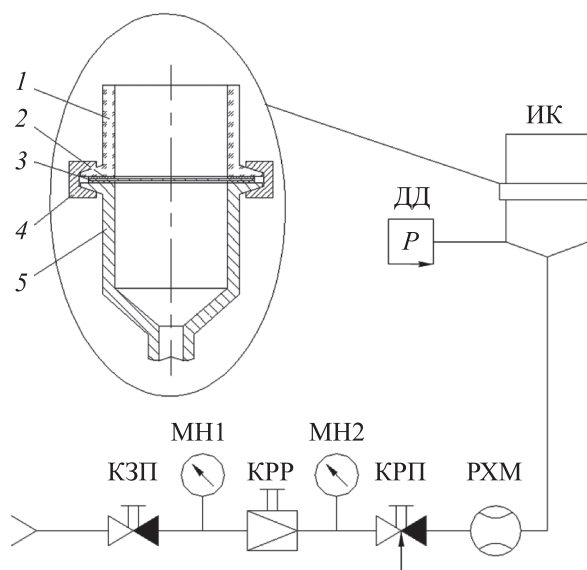


Рис. 3. Схема установки по определению КУС методом «пузырька»:

1 — прозрачная камера; 2 — уплотнение; 3 — пористый образец; 4 — стяжной хомут; 5 — опорный диффузор; ИК — испытательная кювета; ДД — датчик давления; КЗП — клапан запорный проходной ручной; КРП — клапан регулирующий проходной ручной; КРР — клапан редукционный ручной; МН1, МН2 — манометры 1, 2; РХМ — расходомер

Испытываемый образец сетки или КПСМ, представляющий собой плоский круг, должен быть загерметизирован по краям в испытательной кювете таким образом, чтобы вытесняющий газ не попал

в прозрачную камеру, минуя сетчатое поле образца. На верхнюю поверхность испытываемого образца наливается смачивающая жидкость слоем толщиной не более 2...4 мм, который не должен оказывать на испытываемый образец гидростатическое давление, соизмеримое по значению с КУС, и в то же время через него должны быть видны проходящие через сетчатое поле пузырьки газа, подаваемого с нижней поверхности образца. При подаче газа, для того чтобы исключить динамическое воздействие с его стороны на границу раздела газ — жидкость, скорость изменения давления подаваемого газа не должна превышать значения 98 Па/с. Причем чем больше размер ячеек сетчатого поля испытываемого образца, тем меньше должна быть скорость изменения давления газа. Давление, при котором зарегистрировано появление первого пузырька газа над испытываемым образцом, получило название капиллярной удерживающей способности, и ему соответствует максимальный размер ячейки сетки или поры КПСМ. При этом с помощью включенного в состав установки расходомера регистрируется расход газа через освободившуюся от смачивающей жидкости ячейку. Дальнейшее повышение давления вытесняющего газа будет приводить к открытию все новых и новых ячеек сетки, имеющих все меньшие размеры, и к увеличению расхода вытесняющего газа через сетчатый элемент. В конце концов, пористая структура сетчатого элемента освободится от смачивающей ее жидкости, а перепад давления на испытываемом образце будет соответствовать сопротивлению сухого образца. При пересчете результатов измерений по формуле (2) можно получить зависимость расхода газа \dot{m}_r от размера ячеек $d_{эфф}$, т. е. $\dot{m}_r = f(d_{эфф})$, которая позволяет определить принятую в технической литературе характеристику пористой среды — средний размер пор $d_{п.ср}$, соответствующий 50 % расхода газа через сетчатый элемент. Однако вследствие высокой степени регулярности сетчатого поля КПСМ, характеризующейся диапазоном отклонения размеров ячеек от номинального в пределах ± 10 %, придется проводить испытания сетчатых образцов дольше, чем могут быть получены результаты по КУС.

Метод сообщающихся сосудов. При реализации метода «пузырька» требуется применять оборудование, в состав которого входят расходомер, датчик давления и редукционный клапан, а также вторичная аппаратура для регистрации и обработки данных. Причем вполне возможно, что при широком спектре размеров ячеек пористой среды придется использовать первичные приборы различных поддиапазонов измерения и регулирования физических параметров. Рассматриваемый метод сообщающихся сосудов позволяет с помощью достаточно простого оборудования решить поставленную задачу определения значения КУС сетчатого образца и образца из КПСМ.

Вариант схемы установки по определению КУС методом сообщающихся сосудов, когда смачивающая жидкость начинает сливаться с помощью регулирующего клапана (КРП), представлен на рис. 4.

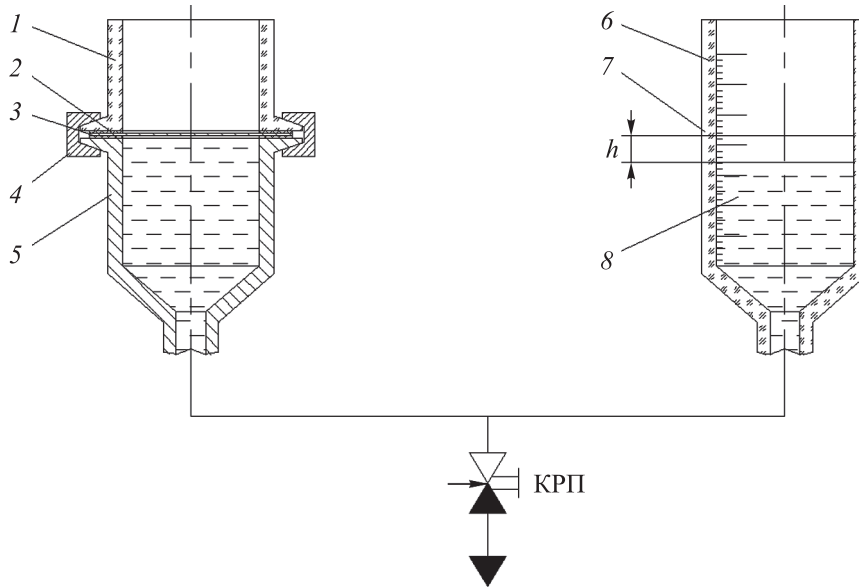


Рис. 4. Вариант схемы установки по определению КУС методом сообщающихся сосудов:

1 — прозрачная камера; 2 — уплотнение; 3 — пористый образец; 4 — стяжной хомут; 5 — опорный диффузор; 6 — измерительная емкость; 7 — шкала; 8 — смачивающая жидкость; h — высота гидростатического столба смачивающей жидкости; КРП — клапан, регулирующий проходной ручной

В прозрачной камере граница раздела газ — жидкость удерживается силами поверхностного натяжения, действующими на поверхности смоченной сетки, а в измерительной емкости уровень жидкости при открытом клапане КРП понижается до тех пор, пока гидростатическое давление удерживаемого сеткой столба жидкости не превысит КУС. В результате происходит прорыв газа через сетку или начинается прохождение отдельных пузырьков газа через образец КПСМ внутрь опорного диффузора. Если испытывается образец сетки, то при достижении перепада давления на ней, равного ее КУС, прорыв газа происходит по всей поверхности образца независимо от скорости изменения уровня жидкости в измерительной камере. Высота гидравлического столба жидкости, при которой газ начинает проходить через смоченную пористую структуру, фиксируется визуально. Максимальный размер ячейки сетки рассчитывается по формуле

$$d_{n \max} = \frac{\sigma \cos \Theta}{\rho h_{\max} g}, \quad (9)$$

где h_{\max} — максимальная высота, на которую опускается жидкость в измерительной камере относительно уровня испытуемого образца на момент прорыва первого пузырька в монтажной камере через сетку или образец КПСМ; g — ускорение свободного падения.

Значение расхода сливаемой жидкости также ограничивается требованием ϵ по ограничению скорости изменения перепада давления, действующего на границу раздела газ — жидкость, находящуюся в смоченной сетке.

Вариант схемы установки с сообщающимися сосудами, один из которых после заправки в сосуды смачивающей жидкости начинает плавно двигаться вниз по отношению к монтажной камере с установленным в ней испытываемым образцом сетки или КПСМ, представлен на рис. 5. Относительное перемещение сосудов, как и в случае показанной на рис. 4 схемы, создает на сетке перепад давления, который увеличивается по мере опускания передвигаемой емкости до тех пор, пока не сравняется с КУС испытуемого образца. Высота столба жидкости, удерживаемого смоченной сеткой, фиксируется визуально.

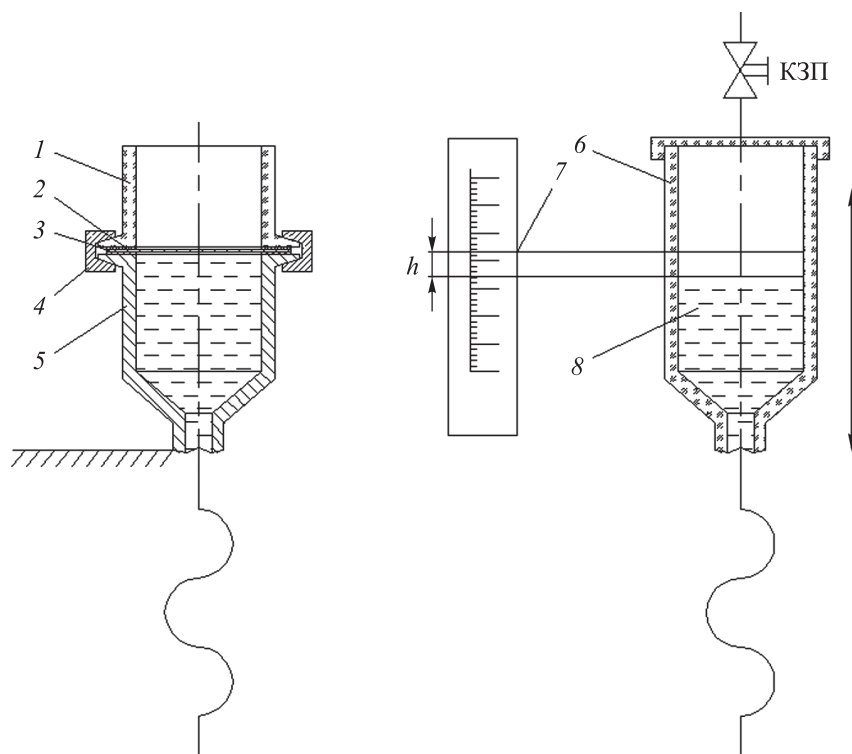


Рис. 5. Вариант схемы установки по определению КУС методом сообщающихся сосудов:

1 — прозрачная камера; 2 — уплотнение; 3 — пористый образец; 4 — стяжной хомут; 5 — опорный диффузор; 6 — передвижная емкость; 7 — шкала; 8 — смачивающая жидкость; h — высота гидростатического столба смачивающей жидкости; КЗП — клапан запорный проходной ручной

По сравнению с вариантом схемы, приведенным на рис. 4, рассматриваемый вариант схемы испытаний позволяет избавиться от использования большего количества жидкости, а также от применения первичных датчиков и вторичной аппаратуры, благодаря чему упрощаются метрологические средства метода.

Положительное отличие метода сообщающихся сосудов от метода «пузырька» заключается в том, что испытываемый образец не нагружен расположенной на нем массой смачивающей жидкости, которая может пролиться сквозь тонкий образец с крупными ячейками.

Заключение. В статье обосновано применение капиллярной удерживающей способности, которая используется для определения работоспособности газожидкостных фазоразделителей, в качестве одной из основных характеристик пористой проницаемой структуры. Даны рекомендации по подготовке проницаемых пористых образцов, помогающие обеспечить их чистоту, пригодность закрепляемой кромки образца к герметизации при закреплении в установке, а также сделать выбор смачивающей жидкости, для того чтобы повысить достоверность результатов испытаний этих образцов по определению их капиллярной удерживающей способности. Приведен обзор схем испытательных установок, которые, в отличие от традиционных промышленных порометров, позволяют использовать метод «пузырька» для определения капиллярной удерживающей способности проницаемых высокопористых тонких образцов материалов для изготовления фазоразделителей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М., Крылов В.И., Ягодников Д.А. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 6 (105), с. 130–142.
- [2] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Топливный бак с капиллярным внутрибаковым устройством космической двигательной установки. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2021, № 4, с. 15–21.
- [3] Сапожников В.Б., Крылов В.И., Новиков Ю.М., Ягодников Д.А. Наземная отработка капиллярных фазоразделителей на основе комбинированных пористо-сетчатых материалов для топливных баков жидкостных ракетных двигателей верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-707
- [4] Багров В.С., Курпатенков А.В., Поляев В.М. и др. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 1997, 328 с.
- [5] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Концепция создания высоконадежных фильтров для объектов повышенной опасности. *Экология и промышленность России (ЭКиП)*, 2001, № 11, с. 27–31.

- [6] Девисилов В.А., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Комбинированные пористые сетчатые металлы и изделия из них. *Безопасность в техносфере*, 2020, т. 9, № 2, с. 43–48.
- [7] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарошкин В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [8] Волков В.И., Кирколуп Е.Р. Экспериментальное исследование краевых углов натекания в горизонтальных коробах. *Известия Алтайского государственного университета, Химия*, 2008, № 3 (59), с. 50–56.
- [9] Гогонин И.И. Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении. *Теплофизика и аэромеханика*, 2010, т. 17, № 2, с. 261–266.
- [10] ГОСТ Р 50516–93. *Мембраны полимерные. Метод определения точки пузырька плоских мембран*. Москва, Изд-во стандартов, 5 с.

Статья поступила в редакцию 15.12.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Александров Л.Г., Константинов С.Б., Марков А.В., Новиков Ю.М., Платов И.В. О практических методах определения порометрических характеристик тонких образцов из комбинированного пористого сетчатого материала. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-1-2244>

Александров Лев Григорьевич — канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор АО «НПО Лавочкина». e-mail: aia@laspace.ru

Константинов Сергей Борисович — канд. техн. наук, доцент, главный специалист АО «НПО Лавочкина». e-mail: konstantinov@laspace.ru

Марков Александр Вадимович — ведущий инженер-конструктор АО «НПО Лавочкина». e-mail: aia@laspace.ru

Новиков Юрий Михайлович — канд. техн. наук, руководитель комплекса ООО «ЦВТМ при МГТУ им. Н.Э. Баумана», руководитель «Проект КПСМ». e-mail: jum.nov@yandex.ru

Платов Илья Вячеславович — канд. техн. наук, инженер-конструктор АО «НПО Лавочкина». e-mail: aia@laspace.ru

On practical methods to determine porometric characteristics of thin samples made from combined porous mesh material

© L.G. Alexandrov¹, S.B. Konstantinov¹, A.V. Markov¹,
Yu.M. Novikov², I.V. Platov¹

¹ Lavochnik Science and Production Association JSC, Khimki, 141400, Russia

² Center for High Technology in Mechanical Engineering of Bauman
Moscow State Technical University LLC, Moscow, 105005, Russia

On the example of a porous structure operation in the gas-liquid flow as the phase separator, the paper demonstrates the porometric characteristics effect to assess its performance in the capillary-type intra-tank devices of the space propulsion system fuel tanks. It is shown that for manufacture of a permeable phase separator taking into account the stable capillary structure and the possibility to obtain the hydraulic resistance given value, it is advisable to introduce a combined porous mesh material. For practical determination of one of the porous structure characteristics, i.e. the capillary holding capacity, a method is presented for preparing the permeable structure surface of the phase separator material for testing based on the “bubble” technique, and principles of using such wetting liquids as water, glycerin or ethyl alcohol are discussed. Taking into account small thicknesses of the phase separators made of combined porous materials, types of the circuit solutions of the test installations are provided for determining the capillary holding capacity of porous mesh materials differing from the traditional ones used in orosimetry of soils, rocks and filter materials obtained on the basis of powder metallurgy.

Keywords: mesh material, gas-liquid flow, capillary holding capacity, efficiency factor, “bubble” technique, “communicating vessels” technique, wetting liquid

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razrabotki kapillyarnykh toplivozabornykh ustroystv iz kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov dlya kosmicheskikh apparatov s dlitelnyim srokom aktivnogo suschestvovaniya [Current state and prospects of capillary fuel-intake units made of combined porous metals-mesh for long lifetime spacecraft]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 6 (105), pp. 130–142.
- [2] Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. Toplivnyy bak s kapillyarnym vnutribakovym ustroystvom kosmicheskoy dvigatel'noy ustanovki [Fuel tank with a capillary intra-tank device of a space propulsion system]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina — Bulletin of Lavochnik Association*, 2021, no. 4, pp. 15–21.
- [3] Sapozhnikov V.B., Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. Nazemnaya otrabotka kapillyarnykh fazorazdeliteley na osnove kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov dlya toplivnykh bakov zhidkostnykh raketnykh dvigateley verkhnikh stupeney raket-nositeley, razgonnykh blokov i kosmicheskikh apparatov [Ground tests of capillary phase separators based on combined porous mesh material for fuel tanks of liquid propellant engine in propulsion installations of space crafts, top steps of carrier rockets and upper-stage rockets]. *Inzhe-*

- nerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-707
- [4] Bagrov V.S., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M., et al. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Capillary systems of liquid selection from spacecraft tanks]. Moscow, UNPTs “ENERGOMASH” Publ., 1997, 328 p.
- [5] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Kontseptsiya sozdaniya vysokonadezhnykh fil'trov dlya ob'yektov povyshennoy opasnosti [The concept of creating highly reliable filters for high-risk objects]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii (Ecology and Industry of Russia)*, 2001, no. 11, pp. 27–31.
- [6] Devisilov V.A., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Kombinirovannye poristye setchatye metally i izdeliya iz nikh [Combined porous mesh metals and products from them]. *Bezopasnost v tekhnosfere — Safety in Technosphere*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 43–48.
- [7] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [8] Volkov V.I., Kirkolup E.R. Eksperimentalnoe issledovanie kraevykh uglov natekaniya v gorizontalnykh korobakh [Experimental research of leaking contact angles in horizontal ducts]. *Izvestiya of Altai State University Journal, Chemistry*, 2008, no. 3 (59), pp. 50–56.
- [9] Gogonin I.I. Vliyanie kraevogo ugla smachivaniya na teplootdachu pri kipenii [Influence of the wetting angle on heat transfer at boiling]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 261–266.
- [10] GOST R 50516–93. *Membrany polimernye. Metod opredeleniya tochki puzyrka ploskikh membrane* [Polymer membranes. A method for determining the bubble point of flat membranes]. Moscow, Publishing House of Standards, 5 p.

Alexandrov L.G., Cand. Sc (Eng.), Leading Design Engineer, Lavochkin Science and Production Association JSC. e-mail: aia@laspace.ru

Konstantinov S.B., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Chief Specialist, Lavochkin Science and Production Association JSC. e-mail: konstantinov@laspace.ru

Markov A.V., Leading Design Engineer, Lavochkin Science and Production Association JSC. e-mail: aia@laspace.ru

Novikov Yu.M., Cand. Sc. (Eng.), Head of the Center for High Technology in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University LLC.
e-mail: jum.nov@yandex.ru

Platov I.V., Cand. Sc. (Eng.), Design Engineer, Lavochkin Science and Production Association JSC. e-mail: aia@laspace.ru