

Эксплуатационные характеристики фильтровальных перегородок из проволочных сеток с ячейками микронных размеров

В.С. Спиридонов, доцент, кандидат техн. наук¹

Ю.М. Новиков, заведующий отделом, кандидат техн. наук²

В.А. Большаков, заведующий лабораторией²

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

²Научно-исследовательский институт энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана

e-mail: spir-VS0346@yandex.ru

Ключевые слова:

проволочная сетка,
способ переплетения проволоки,
размер ячеек,
коэффициент проницаемости,
фильтр.

Приведены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления проволочных тканых сеток с ячейками микронных размеров на ламинарном режиме фильтрации. Для оценки гидравлического сопротивления сеток использована величина коэффициента проницаемости. С целью устранения влияния масштабного фактора на результаты проведенных исследований введена безразмерная величина этого параметра в виде отношения коэффициента проницаемости к квадрату размера ячейки сетки. Исследования проведены на безнапорной гидравлической установке по специально разработанной методике, обеспечивающей высокую точность определения этого параметра. Установлено влияние типа переплетения проволоки на величину безразмерного коэффициента проницаемости. Характер влияния типа переплетения проволоки на величину этого параметра подтвержден результатами анализа внутренней структуры проволочных сеток. На основе полученных данных разработана методика выбора типа сетки для изготовления фильтровальной перегородки с оптимальными характеристиками при заданной величине номинальной толщины фильтрации. На основе канальной модели пористого тела проведена оценка величины коэффициента гидравлического сопротивления проволочных сеток с различным типом переплетения проволоки. Установлена зависимость этого параметра от типа переплетения проволоки. Показана необоснованность использования коэффициента извилистости пор при оценке гидравлического сопротивления сеток.

1. Введение в проблему

Надежность функционирования гидравлических систем ракетно-космической и авиационной техники в значительной степени зависит от чистоты используемых в них жидких сред. Наличие твердых частиц в компонентах топлива и в рабочих жидкостях гидропривода систем управления летательных аппаратов ведет к забиванию форсунок и нарушению работоспособности подвижных элементов регулирующей аппаратуры, что становится причиной их отказа и возникновения аварийных ситуаций с тяжелыми последствиями для людей и окружающей среды. Так,

согласно [1] до 50% всех отказов гидравлических систем авиационной техники вызвано чрезмерным загрязнением используемых в них рабочих жидкостей.

Для очистки жидкостей гидравлических систем от механических загрязнений широко используют встроенные фильтры с перегородками из проволочных тканых сеток различных типов [2]. Сочетание однородности внутренней структуры, присущей всем тканым материалам, с механической прочностью металлической проволоки обеспечивает высокую надежность таких перегородок, а варьируя диаметром, химическим составом и способами

переплетения проволоки позволяет получать фильтровальные материалы с очень широким спектром характеристик для работы практически в любых условиях эксплуатации.

Как известно, основными эксплуатационными характеристиками фильтровальных перегородок являются номинальная толщина фильтрации a_n и гидравлическое сопротивление, описываемое зависимостью перепада давления Δp на перегородке от удельного объемного расхода q фильтруемой среды. При изготовлении перегородок из проволоочных тканых сеток величину a_n обычно принимают равной размеру ячейки сетки $a_{яч}$, а зависимость $\Delta p = f(q)$ определяют экспериментально.

Для проволоочных сеток с квадратными ячейками, изготавливаемых по ГОСТ 6613-86, размер ячейки в долях миллиметра указывается в номере сетки, а для фильтровых тканых сеток, изготавливаемых по ГОСТ 3187-76, в качестве размера ячейки, имеющей форму пространственного криволинейного треугольника, используют диаметр сферы $d_{сф}$, вписанной в эту ячейку. Величину $d_{сф}$ можно вычислить по формуле, приведенной в [3]:

$$d_{сф} = \frac{\sqrt{(d_2 - B \sin^2 \varphi)^2 - (1 - \sin^2 \varphi)(d_2^2 \frac{l^2 k^2}{n_2^2} - B^2 \sin^2 \varphi)}}{1 - \sin^2 \varphi} - \frac{(d_2 + \sin^2 \varphi)}{1 - \sin^2 \varphi}, \quad (1)$$

где d_1 и d_2 — диаметр проволоки основы и утка; n_1 и n_2 — количество проволоки основы и утка на базовой

длине l ; $B = \frac{l}{n_1} - d_1$ — расстояние между проволокой основы; $\varphi = \arcsin \frac{(d_1 + d_2)n_1}{l}$ — угол охвата основы ут-

ком; k — безразмерный коэффициент, зависящий от типа переплетения проволоки основы и утка: для плотняного переплетения $k = 1$, для саржевого одностороннего $k = 2$, для саржевого двустороннего $k = 1,5$.

В ГОСТ 3187-76, а также в ряде ТУ на некоторые виды фильтровых тканых сеток указывают значения n_1 и n_2 , соответствующие базовой длине $l = 100$ мм.

В связи с тем, что одинаковый размер ячеек может быть получен для сеток с различным типом переплетения проволоки, разработка фильтровальных систем с оптимальными эксплуатационными характеристиками невозможна без исследования влияния типа переплетения проволоки на гидравлическое сопротивление сетки. Особую актуальность эта задача имеет для сеток микронных размеров, обладающих высоким гидравлическим сопротивлением, что су-

щественно увеличивает затраты энергии на процесс фильтрации рабочих сред.

2. Состояние вопроса

Решению данной задачи посвящено значительное количество работ. Результаты наиболее полного исследования гидравлических характеристик проволоочных тканых сеток различных типов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в [4]. Для обработки результатов экспериментов в безразмерной форме мы использовали канальную модель пористого тела, с помощью которой, по аналогии с трубной гидравликой, гидравлические характеристики пористых материалов представляются в виде зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re , вычисляемых по формулам

$$\lambda = \frac{2\Delta p b h}{l_{он} \rho w_{он}^2}, \quad (2)$$

$$Re = \frac{w_{он} l_{он} \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где ρ и μ — плотность и динамическая вязкость фильтруемой среды; h — толщина пористой перегородки; b — коэффициент извилистости поровых каналов, учитывающий увеличение длины искривленных поровых каналов по сравнению с толщиной пористой перегородки; $l_{он}$ — определяющий размер пористой структуры; $w_{он}$ — определяющая скорость потока в порах.

При проведении расчетов по формулам (2) и (3) в качестве определяющего размера использован размер ячейки $a_{яч}$ сетки, в качестве определяющей скорости — среднеобъемная скорость $w_{п}$ потока в порах, вычисляемая по величине пористости Π сетки, а значения коэффициента извилистости пор b были приняты согласно рекомендациям [5]: $b = 1,3$ для фильтровых сеток и $b = 1$ для сеток с квадратными ячейками.

Анализ полученных результатов показал [4], что при выбранном методе обработки экспериментальных данных четкого влияния типа переплетения проволоки в сетке на характер зависимости $\lambda = f(Re)$ не наблюдается, а рассчитанные по формуле (2) значения коэффициента λ произвольным образом — с разбросом до 30% — располагаются вблизи графической зависимости, которая была аппроксимирована формулой

$$\lambda = \frac{72}{Re} + 1,3. \quad (4)$$

Полученные результаты мы объясняем погрешностями эксперимента, а также наличием технологических допусков на геометрические размеры сеток. По нашему мнению, гораздо большее влияние на результаты экспериментов оказали недостаточно полное исследование зависимости $\lambda = f(Re)$ в ламинарной области фильтрации, где влияние структуры сеток на их гидравлические характеристики проявляется наиболее четко, а также погрешностями, неизбежно возникающими при замене реальных пористых структур моделями любого типа.

Анализ структуры проволочных тканых сеток показал [6, 7], что их внутренние каналы имеют сравнительно малое относительное удлинение $1,5 < h/a_{яч} < 7$, а размеры и форма поперечного сечения этих каналов существенно изменяются по толщине сетки. Вполне очевидно, что на ламинарном режиме течения гидравлическое сопротивление таких каналов определяется главным образом дополнительными потерями напора на непрерывное перестроение профиля скоростей в потоке по длине канала, а на турбулентном — потерями напора на вихреобразование при обтекании проволочек. Использование канальной модели, основанной на уравнении Дарси–Вейсбаха (2), не позволяет учесть все эти особенности внутренних каналов проволочных тканых сеток, что вносит в результаты исследований существенные погрешности, возникающие как при выборе определяющих параметров $l_{он}$ и $w_{он}$, так и при расчете величины коэффициента извилистости b .

3. Методика проведения исследований

В реальных условиях эксплуатации фильтровальные перегородки из сеток микронных размеров, как правило, работают при малых удельных нагрузках q , соответствующих ламинарному режиму фильтрации. На этом режиме фильтрации гидравлическое сопротивление пористых перегородок обычно характеризуют величиной коэффициента проницаемости K_{II} , определяемой из уравнения Дарси по формуле

$$K_{II} = \frac{w_{\phi} \mu h}{\Delta p}, \quad (5)$$

где w_{ϕ} — скорость фильтрации, численно равная удельному объемному расходу q фильтруемой среды.

Вычисляемая непосредственно по результатам прямых измерений величина K_{II} является однозначной и объективной оценкой гидравлического сопротивления пористых перегородок и поэтому вполне может быть использована для исследования влияния способа переплетения проволоки на гидравлические

характеристики сеток. Для устранения влияния масштабного фактора на результаты этого анализа величина K_{II} приведена к безразмерному виду

$$K_{II}^1 = \frac{K_{II}}{l_{хар}^2}, \quad (6)$$

где $l_{хар}$ — характерный размер внутренней структуры сетки, в качестве которого использован размер ее ячейки $a_{яч}$.

Экспериментальные исследования величины K_{II} проволочных тканых сеток различных типов проведены на безнапорной гидравлической установке при фильтрации дистиллированной воды, топлива ТС-1 и минерального масла под действием гидростатического давления столба фильтруемой жидкости. Образцы сеток устанавливались в днище корпуса, имеющего форму открытого вертикального цилиндра.

Скорость фильтрации w_{ϕ} жидкости через образец сетки с площадью поверхности фильтрации S_{ϕ} и скорость опускания уровня жидкости dH/dt в цилиндрическом корпусе связаны между собой соотношением

$$w_{\phi} = -\frac{S_{\phi}}{S_{\psi}} \cdot \frac{dH}{d\tau}, \quad (7)$$

где S_{ψ} — площадь поперечного сечения цилиндрического корпуса.

При подстановке соотношения (7) в уравнение (5) и выражении в нем перепада давления Δp через гидростатический напор столба фильтруемой жидкости получено

$$\frac{\rho g H S_{\phi} K_{II}}{\mu h} = -S_{\psi} \frac{dH}{d\tau}, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения; H — высота столба жидкости над поверхностью исследуемого образца сетки.

Разделение переменных в уравнении (8) и интегрирование его в пределах от H_1 до H_2 с учетом очевидного для ламинарного режима равенства $K_{II} = \text{const}$ позволило получить соотношение для расчета величины этого коэффициента по результатам прямых измерений в виде

$$K_{II} = \frac{\nu h S_{\phi}}{g S_{\psi} \tau} \cdot \ln \frac{H_1}{H_2}, \quad (9)$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости фильтруемой жидкости; τ — время, в течение которого уровень жидкости в цилиндрическом корпусе опускается с H_1 до H_2 .

Контроль режима течения жидкостей через образцы исследуемых сеток осуществлялся по величине числа Рейнольдса Re , определяемой по формуле

$$Re = \frac{(H_1 - H_2) S_{\text{ц}} a_{\text{яч}}}{S_{\phi} \Pi \tau \nu} \quad (10)$$

Подбором вязкости ν фильтруемой жидкости и высоты ее уровней H_1 и H_2 над поверхностью сеток обеспечивались режимы течения жидкостей при значениях $Re < 1$, соответствующих ламинарной области фильтрации.

4. Обсуждение полученных результатов

Результаты экспериментальных исследований величины коэффициента K_{Π} тканых сеток с различным типом переплетения проволоки, проведенных по вышеизложенной методике, представлены в табл. 1. Там же приведены значения безразмерного коэффициента проницаемости K_{Π}^{-1} , рассчитанные по формуле (6). Как видно из табл. 1, наблюдается однозначное влияние типа переплетения проволоки в сетке на величину коэффициента K_{Π}^{-1} : наибольшими значениями этого коэффициента обладают проволочные сетки с квадратными ячейками, наименьшими — фильтровые сетки с саржевым односторонним переплетением проволоки.

На основе статистической обработки результатов экспериментов, представленных в табл. 1, определены средние для каждого типа сеток значения K_{Π}^{-1} . Установлено, что для сеток с квадратными ячейками $\overline{K_{\Pi}^{-1}} = 0,0312$, для фильтровых сеток с полотняным переплетением проволок $\overline{K_{\Pi}^{-1}} = 0,0239$, для фильтровых сеток с саржевым односторонним переплетением $\overline{K_{\Pi}^{-1}} = 0,0103$.

Характер влияния способа переплетения проволоки на гидравлические характеристики сеток полностью согласуется с результатами графического исследования их внутренней структуры [6, 7]. Согласно данным этих работ изменение величины просвета t по толщине сетки характеризуется наличием одного минимума у фильтровых сеток с полотняным переплетением проволоки и двух и трех минимумом соответственно у фильтровых сеток с саржевым двухсторонним и саржевым односторонним переплетением. Известно, что наибольшие потери напора в гидравлических трактах возникают в местах уменьшения их проходного сечения, где происходит ускорение потока с соответствующим перестроением профиля скорости. Именно по этой причине величина коэффициента K_{Π}^{-1} у фильтровых саржевых односторонних сеток, внутренние каналы которых имеют три узких сечения, почти в 2,5 раза меньше, чем у фильтровых

Таблица 1

Характеристики проволочных тканых сеток

Тип сетки	№ сетки	Толщина h , мм	Размер ячейки	Значение коэффициентов	
				$K_{\Pi} \cdot 10^{12}$, м ²	K_{Π}^{-1}
Фильтровая саржевого одностороннего переплетения	125/730	0,09	9,6	0,76	0,0082
	80/720	0,12	14,4	2,5	0,0121
	С685	0,13	20	4,1	0,0102
	С450	0,20	31	11,4	0,0118
	С200	0,48	65	43,3	0,0102
С120	0,58	116	124	0,0092	
Фильтровая саржевого двухстороннего переплетения	СД56	1,01	240	681	0,0118
Фильтровая полотняного переплетения со сдвоенной основой	П300	0,17	37	22,5	0,0164
Фильтровая полотняного переплетения	П160	0,42	83	161	0,0234
	П120	0,48	113	319	0,0250
	П100	0,50	134	498	0,0277
	П90	0,55	151	514	0,0225
	П80	0,59	162	589	0,0224
	П76	0,64	169	726	0,0256
	П60	0,86	219	1043	0,0217
	П56	0,88	230	1248	0,0234
	П40	1,13	304	2128	0,0230
С квадратной ячейкой саржевого переплетения	0040	0,07	40	47	0,0295
	0071	0,13	71	161	0,0319
	0140	0,22	140	595	0,0304
	0160	0,29	160	848	0,0331

сеток полотняного переплетения, внутренние каналы которых имеют лишь одно такое сечение.

Представленные выше результаты могут быть использованы для оптимизации эксплуатационных характеристик фильтров тонкой очистки, имеющих фильтровальные перегородки из проволочных тканых сеток с ячейками микронных размеров. Так, при одном и том же значении номинальной толщины очистки жидкостей a_n величины коэффициента проницаемости двух сеток с различным типом переплетения проволоки связаны соотношением

$$K_{П2} = K_{П1} \frac{\bar{K}_{П2}^1}{\bar{K}_{П1}^1}. \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (11) и (5) позволяет получить соотношения для сопоставления значений w_ϕ и Δp при фильтрации жидкостей через проволочные тканые сетки с различным типом переплетения проволоки при равных значениях a_n . Так, в случае равных значений перепада давления $\Delta p_1 = \Delta p_2$

$$w_{\phi 2} = w_{\phi 1} \frac{\bar{K}_{П2}^1}{\bar{K}_{П1}^1} \cdot \frac{h_1}{h_2}, \quad (12)$$

а в случае равных значений скорости фильтрации $w_{\phi 1} = w_{\phi 2}$

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\bar{K}_{П1}^1}{\bar{K}_{П2}^1} \cdot \frac{h_2}{h_1}. \quad (13)$$

Сопоставление характеристик сеток 004 и П300, имеющих практически равные значения номинальной толщины фильтрования a_n (см. табл. 1), показывает, что согласно (12) при равных значениях Δp скорость фильтрации w_ϕ через сетку 004 почти в 4,6 раза больше, чем через сетку П300. Согласно (13) при равных значениях w_ϕ перепад давления Δp на сетке 004 почти в 4,6 раза меньше, чем на сетке П300.

Как уже отмечалось выше, в ряде случаев результаты гидравлических испытаний проволочных сеток обрабатывают в виде безразмерной зависимости

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (14)$$

где A и B — постоянные коэффициенты, характеризующие соответственно вязкостные и инерционные потери напора фильтруемой среды внутри сетки.

Путем совместного решения уравнений (2), (3), (5) и (6) можно получить соотношение, связывающее значения коэффициентов A и $K_{П}^1$ на ламинарном режиме фильтрации

$$A = \frac{2\Pi}{bK_{П}^1}. \quad (15)$$

Результаты расчетов по формуле (15) средней величины коэффициента A для проволочных тканых сеток различных типов при значениях коэффициента b , принятых согласно [5], представлены в табл. 2. Как видно, полученные нами значения коэффициента A несколько меньше средней величины этого параметра, приведенной в [4]. Данное расхождение объясняется существенным расширением области проведенных нами исследований гидравлических характеристик сеток в сторону меньших значений числа Re , что обеспечило более точное определение величины коэффициента A .

Согласно проведенным по формуле (15) расчетам (см. табл. 2), фильтровые сетки с полотняным переплетением проволоки характеризуются меньшей величиной коэффициента A по сравнению с сетками, имеющими квадратные ячейки, что явно противоречит особенностям внутренней структуры этих типов сеток. Причина этого несоответствия, по нашему мнению, в некорректном введении в формулу (2) коэффициента извилистости пор, фактически предназначенного лишь для обоснования различия в гидравлическом сопротивлении сеток с разным типом переплетения проволоки. Как уже было показано выше на примере фильтровых сеток, гидравлическое сопротивление их внутренних каналов определяется главным образом потерями на трение, возникающими в результате трансформации профиля скоростей потока при изменении размеров и формы поперечного сечения этих каналов и мало зависит от длины каналов.

Результаты расчетов, проведенных по формуле (15) при значениях $b = 1$ для всех типов сеток, представлены в табл. 2. Усложнение геометрии переплетения проволоки в сетке ведет к усложнению ее внутренней структуры с соответствующим возрастанием гидравлического сопротивления сетки. При этом наблюдается однозначная зависимость величины коэффициента A в соотношении (14) от типа переплетения проволоки в сетке.

Таблица 2

Значение коэффициента A для проволочных тканых сеток

Тип переплетения проволоки в сетке	Значение коэффициента b	
	Согласно [5]	$b = 1$
Сетки с квадратными ячейками	45,7	45,7
Фильтровые сетки с полотняным переплетением проволочек	41,8	54,3
Фильтровые сетки с полотняным переплетением проволочек с двумя основами	62,8	81,6
Фильтровые сетки с саржевым односторонним переплетением проволочек	52,9	68,8