

Д. Е. ТУК, А. А. ГАРИПОВ, В. А. ЦЕЛИЩЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТАХ С ОБЪЕМНЫМ ПРИНЦИПОМ ФИЛЬТРАЦИИ

Исследование течения жидкости в фильтроэлементах с объемным принципом фильтрации. Рассмотрено моделирование фильтрующих пакетов с объемным принципом фильтрации, проведено исследование течения жидкости в каналах фильтрующего пакета с объемным принципом фильтрации. *Фильтр; фильтроэлемент; фильтрация*

Проблемы развития авиационной, космической и корабельной техники постоянно выдвигают требования разработки новых фильтрующих материалов. Рабочая жидкость гидравлической системы в значительной степени определяет возможные рабочие параметры, ресурс и надежность работы всей гидравлической системы. Известно, что обеспечение низкого перепада давлений на фильтроэлементе, особенно при засоренном фильтре, является достаточно сложной задачей. Для снижения сопротивления и поддержания работоспособности системы необходимо резко увеличивать фильтрующую поверхность при одновременном сохранении габаритов фильтра.

Для решения поставленной задачи создаются фильтрующие элементы с эффектом объемного фильтрования – частицы загрязнения в данном случае задерживаются в глубине фильтроэлемента. Далее они поступают в сквозные или тупиковые каналы и, в зависимости от извилистости и размеров каналов, задерживаются в толще фильтроэлемента. Гофрированная структура фильтрующих элементов позволяет получать увеличенную рабочую поверхность и усиливает эффект объемной фильтрации.

При объемной фильтрации используются рулоны материала, и рабочая жидкость протекает не через материал, а скорее вдоль слоев рулона материала. Материал имеет сложную неоднородную структуру, которая была крепирована перед сворачиванием в рулоны. В объемных элементах осевого потока гораздо больше материала, чем в других типах, и поэтому они могут удерживать большие объемы твердых загрязнений и рабочей жидкости.

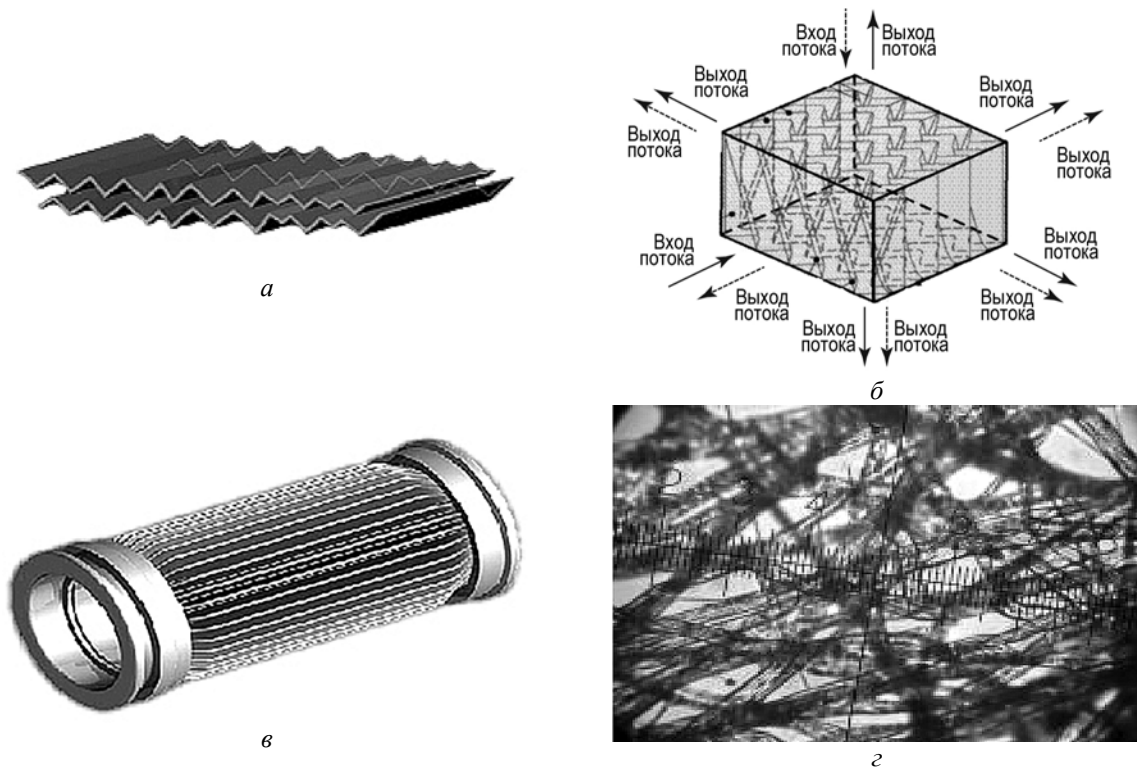
Причем грязеемкость таких фильтров много больше, чем поверхностных (одномерных). Следует особо подчеркнуть, что очистка

рабочих сред может производиться такими фильтроэлементами не только в радиальном, но и в осевом направлениях (рис. 1, б), т. е. имеет место «объемная фильтрация».

При определенном сложении фильтрующего материала получается фильтроэлемент, у которого при заданных габаритах обеспечивается максимальное заполнение всего объема элемента сложной плотноупакованной объемной фильтрующей структурой (рис. 2). Предложенные фильтрующие элементы и технология их изготовления позволяют получать практически неограниченную рабочую поверхность и создавать режим объемной фильтрации. Технология производства фильтровальной бумаги из волокон стекла различных размеров, уложенных хаотично, позволяет получать материалы с открытыми порами, размер которых варьируется в широких пределах. Размер пор определяется как плотностью укладки волокна на приемную поверхность, так и толщиной самого волокна. Возможности технологии позволяют обеспечивать градиентное изменение размера пор по толщине слоя получаемых материалов. Фильтрующий элемент из стекловолокна устойчив к высокому перепаду давления в момент «холодного» пуска.

За счет этого удалось существенно повысить грязеемкость, прочностные характеристики, а следовательно, и ресурс работы фильтроэлемента. Сложная объемная ячеистая структура предложенных элементов усиливает свойства объемной фильтрации, так как при любом направлении потока среда проходит через фильтрующий материал.

Особенно заметной эта особенность становится при относительно небольшом сопротивлении фильтрующего материала – оно приводит к завихрению и рассеиванию на элементарные потоки в области соприкосновения соседних слоев материала, их перемешиванию и эффективному выделению загрязнений за счет центробежных сил.



**Рис. 1.** Фильтр с объемной фильтрующей структурой: *а* – траектория закручивания объемного фильтрующего материала; *б* – направления движения потоков рабочей жидкости в фильтроэлементе; *в* – внешний вид фильтроэлемента; *г* – структура объемного фильтрующего материала под микроскопом

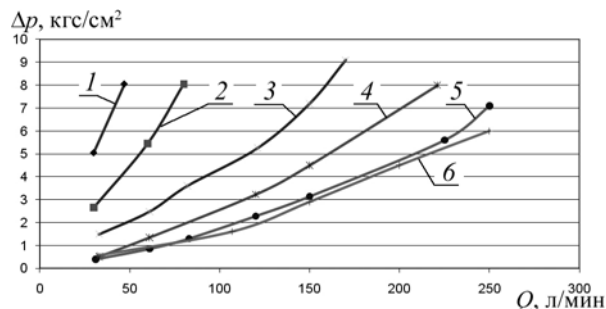
В таблице приведены характеристики объемного фильтра.

Данный фильтр – это гидравлический фильтр тонкой очистки, предназначенный для очистки рабочей среды в линии слива гидравлической системы самолета. Фильтр имеет перепускной и отсечные клапана, сигнализатор перепада давления (засорения) на фильтроэлементе.

#### Основные параметры и характеристики рассматриваемого фильтра

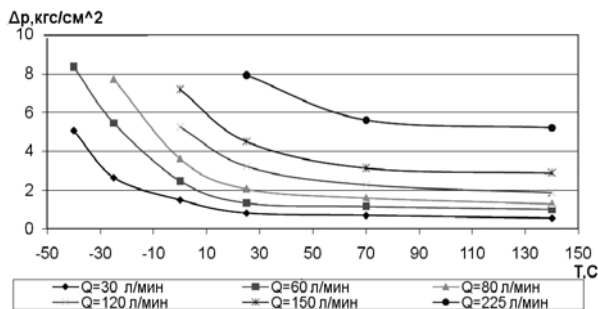
Наименование параметра	Значение
Номинальная тонкость фильтрации, мкм	5
Рабочая среда	масло НГЖ-5У ТУ 38.401-58-57-93, жидкость Skydrol LD-4
Давление рабочей среды, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ):	
– номинальное	3 (30)
– максимальное	4,6 (46)
Номинальный расход, л/мин	150
Рабочий диапазон расхода через фильтр, л/мин	30÷170
Масса сухого фильтра, кг, не более	4,0

По данным испытаний лаборатории ФГУП УАП «Гидравлика» построены гидравлические характеристики фильтров и фильтроэлементов при температурах рабочей среды в диапазоне (–40...+140) °С, представленные на рис. 2. Несмотря на значительное уменьшение массогабаритных характеристик и увеличение полезной площади фильтрации, гидравлическое сопротивление объемного фильтра не превышает показателей сетчатых фильтров.

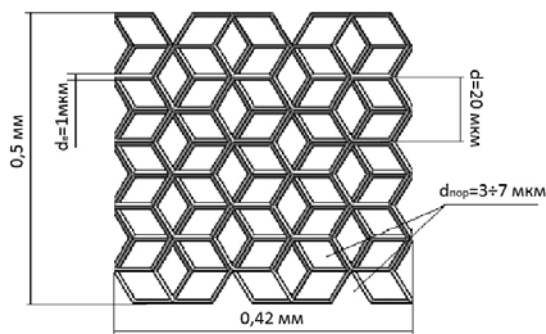


**Рис. 2.** Гидравлические характеристики объемного фильтроэлемента при различных температурах: 1 –  $T = -40$  °С; 2 –  $T = -25$  °С; 3 –  $T = 0$  °С; 4 –  $T = +25$  °С; 5 –  $T = +70$  °С; 6 –  $T = +140$  °С.

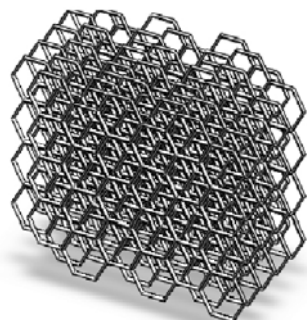
На основе экспериментальных исследований получены зависимости перепада давления от температуры рабочей жидкости (рис. 3) при различных расходах в объемном фильтроэлементе.



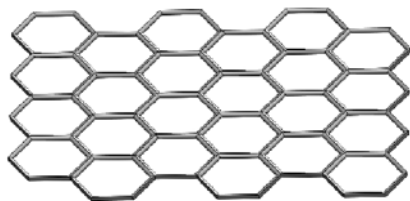
**Рис. 3.** Зависимости перепада давления в фильтроэлементе с объёмным принципом фильтрации от температуры рабочей среды при различных расходах



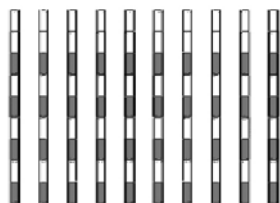
*a*



*б*



*в*

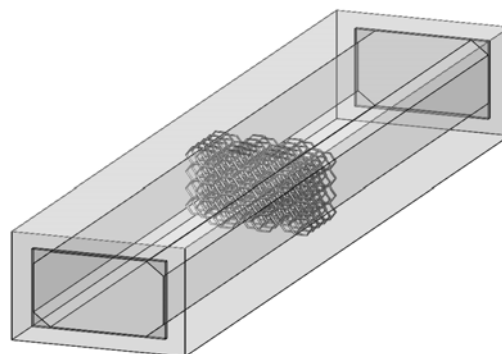


*г*

**Рис. 4.** Структура фильтрующего материала МФТО-5: *a* – основные параметры моделируемого фильтрующего материала; *б* – трехмерный вид материала; *в* – структура одного слоя; *г* – вид сбоку

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить концепцию численного моделирования фильтров объемной фильтрации, обосновать выбор алгоритмов расчета, начальные и граничные условия для решения математической модели фильтроэлемента. Компьютерное моделирование осуществлялось в пакете прикладных программ COSMOS Flow Works. В качестве расчетного материала фильтроэлемента объемного фильтрации выбран материал типа МФТО-5. В связи с тем, что структура фильтрующего материала достаточно сложна (рис. 1, *з*), при построении твердотельной модели было принято допущение, что ячейка слоя сетки имеет форму шестигранника. Слой сетки фильтрующего материала будет иметь сотовый вид, представленный на рис. 4, *в*. Фильтрующий пакет представляет собой 10 сотовых слоев материала, каждый из которых смещен друг относительно друга.

Твердотельная модель расчетной области фильтрующего материала для численного моделирования создана в пакете трехмерного моделирования SolidWorks и представлена на рис. 5.



**Рис. 5.** Область расчета в COSMOSFloWorks

Объемная сетка создавалась в программном продукте Flow Simulation 2010.

Дополнительно в расчетной сетке в областях с максимальными градиентами скорости и давления применялось локальное измельчение сетки. Уменьшение размера сетки использовалось в области межслойного пространства и в области около волокон с повышенной турбулизацией потока. Пример области с локальным уменьшением размеров сетки представлен на рис. 6.

Результаты численного моделирования позволили визуализировать течение потоков рабочей жидкости по всему объему фильтрующего материала (рис. 7, *а*) и построить картину распределения давления при прохождении жидкостью фильтрующего материала (рис. 7, *б*).

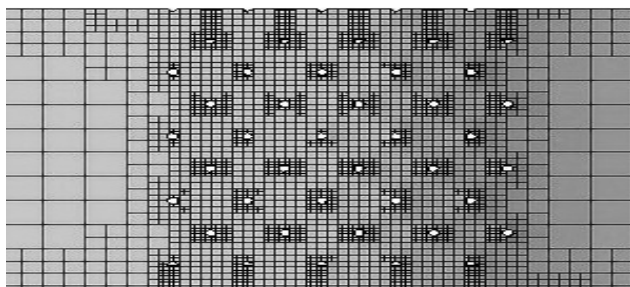
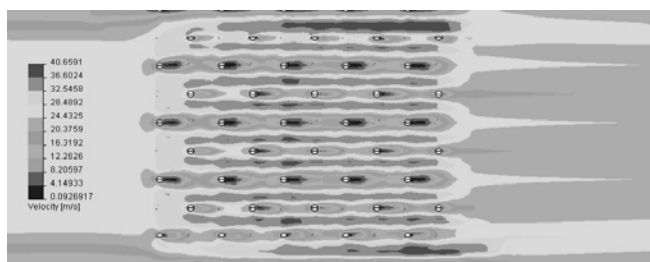
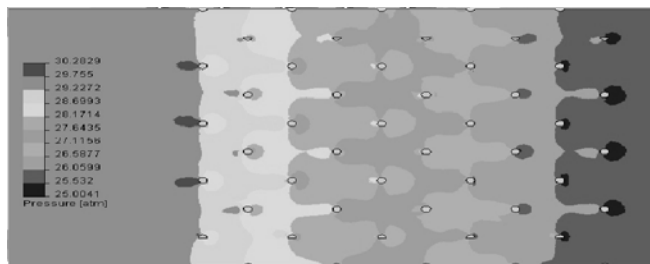


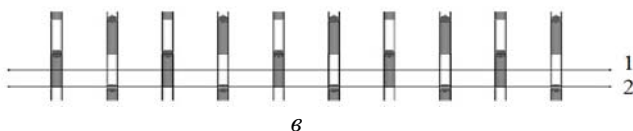
Рис. 6. Локальное измельчение расчетной сетки



*a*



*б*



*в*

Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования в пакете COSMOS Flow Works: *a* – распределение скоростей при прохождении жидкости фильтрующего материала; *б* – распределение давления при прохождении жидкости фильтрующего материала; *в* – схема измерений

Из результатов расчета распределения скоростей при прохождении жидкостью фильтрующего материала следует, что скорость течения жидкости увеличивается на 0,3 % при прохождении каждого из слоев фильтрующего материала. В объеме сетки поток жидкости развивает высокую скорость течения в сквозных каналах, а скорость за волокнами практически равна нулю.

Распределение давления при прохождении жидкостью фильтрующего материала показывает, что при прохождении жидкостью каждого из слоев фильтрующего материала давление понижается. Основная часть потерь давления происходит на первых слоях

фильтрующего элемента, что свидетельствует о том, что они воспринимают большую часть нагрузки и подвержены большей деформации по сравнению с последующими слоями.

График скорости при прохождении рабочей жидкости фильтрующего материала приведен на рис. 8. На рис. 7, *в* приведена схема измерений параметров.

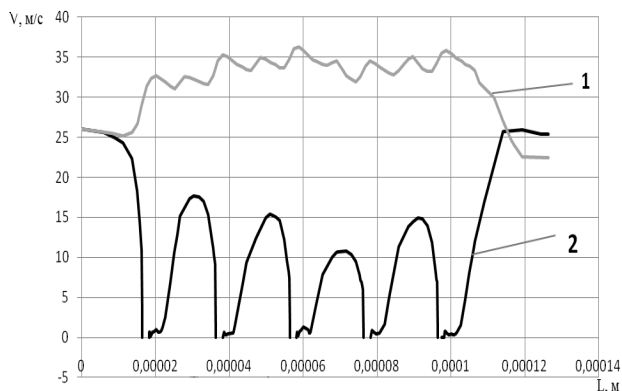


Рис. 8. График скорости потока жидкости при прохождении фильтрующего материала

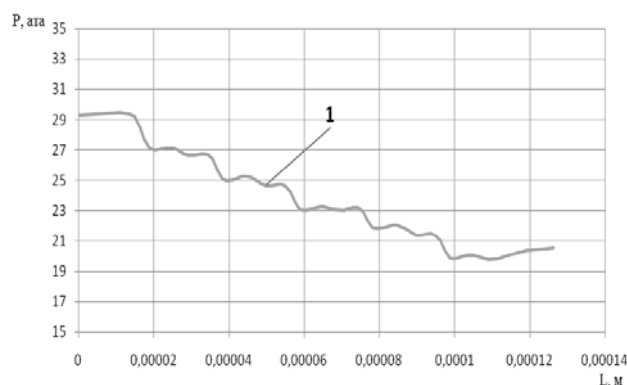
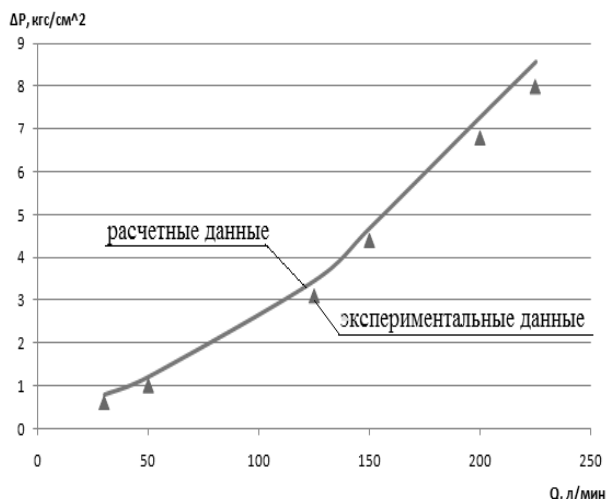


Рис. 9. График давления при прохождении фильтрующего материала

Измерения давления проводились на двух участках, первый участок не пересекает волокна фильтрующего материала, второй – проходит через материал, пересекая волокна. Из графика распределения скорости видно, что после увеличения скорости на первом слое участка 1 (рис. 8) далее происходят незначительные (не более 9%) пульсации скорости на каждом последующем слое. На втором участке измерений поток рабочей жидкости упирается в пересечения волокон, где скорость равна нулю, после прохождения пересечения волокон скорость при выходе из турбулентной зоны возрастает. В дальнейшем при движении жидкости вдоль фильтроэлемента значение её средней скорости от слоя к слою носит синусоидальный характер.



**Рис. 10.** Гидравлическая характеристика фильтроэлемента

На рис. 10 приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований фильтроэлемента с объёмным принципом фильтрации. Значения относительных погрешностей расчета (т.е. отклонения расчетных данных от экспериментальных) составляют не более 7%. Незначительное расхождение результатов можно объяснить тем фактором, что при моделировании не учитывался разброс размеров ячеек слоя фильтрующего материала в диапазоне от 3 до 10 мкм.

Таким образом, можно утверждать, что предварительные исследования в области численного моделирования на базе пакета COSMOS Flow Works достаточно точно в первом приближении отражают процессы, происходящие в фильтрах с объёмным принципом фильтрации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белянин П. Н., Черненко Ж. С.** Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1964. 295 с.
2. **Бродский Г. С.** Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М.: Горная промышленность, 2003. 359 с.
3. **Рыбаков К. В.** Фильтрация авиационных топлив. М.: Транспорт, 1977. 164 с.
4. **Гарипов А. А. Тук Д. Е. Целищев В. А.** Сравнение гидравлических характеристик фильтроэлементов современных летательных аппаратов // сб. докл. IX науч.-техн. конф. «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства» ИнЭрт-2010 / ДГТУ. Ростов-на Дону, 2010. С.147–158.

#### ОБ АВТОРАХ

**Тук Дмитрий Евгеньевич**, главный конструктор ФГУП УАП «Гидравлика». Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УГАТУ, 1980). Иссл. в обл. фильтрации жидкости.

**Гарипов Артур Альбертович**, аспирант каф. прикл. гидромех. (УГАТУ, 2009). Дипл. инж. техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. фильтрации жидкости.

**Целищев Владимир Александрович**, зав. каф., проф. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. автоматизации энергетических установок.