

УДК 621.373.826

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГРАДИЕНТНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫМ МЕТОДОМ СЛС

© 2006 И. И. Журавлева<sup>2</sup>, Т. В. Рожченко<sup>2</sup>, А. Л. Петров<sup>1</sup>, В. И. Щербаков<sup>1</sup>,  
А.И. Снарев<sup>3</sup>, И. В. Шишковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

<sup>2</sup>Самарский государственный университет

<sup>3</sup>Самарский государственный технический университет

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования по коррозионной стойкости однородных и неоднородных фильтрующих элементов, синтезированных послойно методом СЛС. Показано, что при одних и тех же режимах спекания при переходе от МПК–7,0 к МПК–3,5 термостойкость МПК повысилась: количество золь-фракции незначительно возросло (на ~ 5%), а средневязкостная молекулярная масса снизилась в 1,4 раза и составила  $60 \cdot 10^3$ . В процессе спекания плотность материала снизилась в ~ 1,6 раза, а пористость и газопроницаемость образцов возросли на 29 и 25%, соответственно. Разработана оригинальная графо-расчетная методика и для определения протоковых характеристик фильтрующих элементов, как однородных (изотропных) так и анизотропных, для фильтров цилиндрической формы.

### Введение

В настоящее время методами порошковой металлургии изготавливается широкий спектр многокомпонентных фильтрующих элементов на основе углеродистой или коррозионно-стойкой сталей, металлокерамики, никеля или его сплавов с хромом и молибденом, титана, бронзы, циркония, алюминия, карбидов тугоплавких металлов [1], метал-лорезины (материал МР [2]). Между тем этот дешевый способ производства имеет и ряд недостатков, обусловленных самой технологией прессования, а именно, сравнительно простыми внешними и/или внутренними формами фильтров (пластинки, трубки, конусы, диски и т.п.).

Технология селективного лазерного спекания (СЛС) позволяет создавать пористые объемные изделия любой заданной формы, проектируя эту форму и внутреннюю структуру самого объекта на стадии компьютерного моделирования в среде известных графических САПР (AUTOCAD, Pro/Engineer, Solid Work и т.д.). В наших работах последних лет для технологии СЛС были предложены новые метал-полимерные (МПК) [3], биметаллические [4] и интерметаллидные [5] порош-

ковые композиции, которые могут быть рекомендованы в качестве исходного материала для создания как однородных, так и, что очень важно, неоднородных (анизотропных, функционально-градиентных – (ФГ)) фильтрующих элементов. Также нами изучались физико-механические свойства однородных и изотропных объемных изделий из МПК – твердость, пористость, проницаемость, предел разрушения, теплопроводность, коэффициент температурного расширения спекаемого композиционного материала [6]. Следует четко понимать, что экономическая целесообразность использования дорогостоящей технологии СЛС наступает лишь в том случае, когда стоит задача создания функциональных единичных изделий сложной формы с уникальными физико-химическими свойствами, которые могут найти применение для медицины, фармакологии, в нефтегазохимии, электротехнике, автомобильной, авиационной или других отраслях точного машиностроения.

Еще одним направлением использования пористых структур являются мембранные технологии [7] и создание дозирующих устройств для фармацевтической (медицинской) про-

мышленности [8-10]. Так, в работе [10] предлагается уже конкретно методом СЛС синтезировать пористый полимерный имплантат (Drug Delivery Device – /DDD/) и насыщать его биоактивным препаратом. При вживлении его в организм пациента осуществляется дозированное растворение препарата.

Ранее в работах Самарского филиала ФИАН была показана возможность синтеза изделий из ФГМ [11, 12] на основе МПК с переменным содержанием смешиваемых компонентов для достижения эффекта концентрационного градиента, либо структурируя укладку порошковой композиции. Также было предложено использование синтезируемых послойно методом СЛС пористых изделий в качестве фильтрующих элементов для гидрозащиты погруженных электронасосов [13]. Основная задача этих фильтров – в агрессивных условиях окружающей среды (повышенные температуры, давления, трибомеханический и коррозионный износ) осуществлять отделение сопутствующих газов при нефтедобыче. После прохождения лабораторных фильтрационных испытаний они показали уникальные характеристики по ряду параметров [14]. Поэтому синтезированные нами методом СЛС однородные фильтрующие элементы были рекомендованы и успешно прошли полевые испытания в качестве фильтров гидрозащит на нескольких нефтяных месторождениях. Временные рамки проведенных испытаний с нашими фильтрами были существенно перекрыты по сравнению с фильтрами, синтезируемыми методами порошковой металлургии.

### **Требования к синтезируемым изделиям и методика проводимых экспериментов**

Основным параметром фильтрующих элементов является поддерживаемая в течение длительного времени тонкость очистки и проницаемость, которые зависят от материала, фракционного состава и формы исходного порошка, технологии изготовления фильтра. Среди факторов, влияющих на свойства фильтров, следует назвать и температуру спекания, выбор (тип) фильтруемой жидкости (газа), давление фильтрации, геометрические пара-

метры фильтра, возможность его регенерации.

Известно, что равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации зависит от характера распределения пористости в объеме фильтрующего элемента. Сама методология послойного СЛС создает условия и указывает пути для управления этим параметром, формируя градиент свойств фильтрующего элемента. Представляется перспективным еще на уровне компьютерной визуализации в среде САПР заранее определять структуру спекаемых объектов и геометрическое расположение материала компонент, их составляющих. Это позволит синтезировать объемные изделия, структура и свойства которых изменяются не только в зависимости от направления, а также зависят от координаты в выбранном направлении.

В процессе эксплуатации грунтовые (пластовые) воды нефтяных месторождений являются той агрессивной средой, в которой может происходить коррозия и последующее разрушение фильтрующих элементов. По этой причине, например металлические фильтры гидрозащиты погруженных электродвигателей установок электроцентробежных насосов выходят из строя уже через 6 месяцев эксплуатации. Традиционно, для защиты оборудования нефтяных скважин от коррозионных разрушений используют различные ингибиторы, которые закачивают в нефтеносные пласты или подают в трубы, откуда они далее увлекаются нефтью.

Проведенный в сотрудничестве с кафедрой органической химии СамГУ и кафедрой “Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов” СамГТУ анализ химического состава пластовых вод показал, что концентрация сероводорода в них превышает допустимые нормы (табл. 1, графа 4). Следовательно, в нашем случае основным коррозионным агентом является сероводород. На основании полученных результатов в соответствии с установленными требованиями была приготовлена модель пластовой воды с концентрацией сероводорода 2000 мг/дм<sup>3</sup>. При сопоставлении содержания сероводорода в пластовой и модельной водах пришли к заключению, что 1 сутки выдерживания об-

Таблица 1. Химический состав пластовой воды (Красноярское месторождение)

Пласт (№ скважины)	Дата отбора	$\text{HCO}_3^-$ , мг/л	СГ, мг/л	$\text{SO}_4^{2-}$ , мг/л	$\text{Ca}^{2+}$ , мг/л	$\text{H}_2\text{S}$ , мг/л	Общая жесткость, мг-экв/л	pH
Б <sub>2</sub> (504) [данные независимых авторов]	IX – 1991	286,7	141728,0	1441,1	5951,9	–	–	–
Наши исследования	V – 2003	244,1	151360,0	4144,6	9859,7	107,6	717,5	5,68

разцов в искусственно насыщенной сероводородом воде соответствуют 20 – 25 суткам эксплуатации в производственных условиях.

В связи с изложенным, нами были приготовлены модели пластовой воды с различными концентрациями сероводорода. Для этих испытаний подготовлены (как однородные, так и неоднородные – т.е. анизотропные по высоте) образцы (по три на каждый опыт) фильтров стандартных размеров (в виде цилиндра диаметром ~ 10 мм и высотой ~ 20 мм). Эксперименты по ускоренному старению образцов в условиях сероводородной коррозии осуществлялись при температуре 10 °С в течение 2, 4 и 6 месяцев, что соответствует 1,5, 3,5 и 5 годам эксплуатации. Также еще одна серия аналогичных образцов была приготовлена для изучения старения в условиях более активной коррозии (при повышенной температуре 80 °С).

Поскольку связующим звеном при лазерном спекании метал(латунь)-полимерных

порошковых композиций является поликарбонат (в нашем случае марки ЛЭТ), предлагалось изучить, как переход от одной марки полимера (ЛЭТ7.0) к другой (ЛЭТ3,5 – более высокая молекулярная масса) сказывается на прочностных свойствах фильтров. При этом режимы лазерного спекания фильтров с поликарбонатом разных марок были выбраны одинаковыми, поскольку их оптимизация проводилась ранее (мощность ЛВ Р=10 Вт, скорость сканирования ЛИ – 11,5 см/с, при расфокусировке лазерного пучка [6]).

Наконец, так как метод СЛС позволяет смоделировать на стадии компьютерного проектирования градиент свойств будущего изделия, нами были подготовлены серии образцов (по три на опыт) для измерения проницаемости (пористости) ФГ фильтров в сравнении с полученными ранее данными по проницаемости (пористости) однородных фильтров из МПК. В частности на рис. 1, 2 представлен



**Рис. 1.** Общий вид однородных по высоте фильтрующих элементов. Слева направо: 1 – размер фракции 63...100 мкм, высота приращения по слоям  $h = 200$  мкм; 2 – 100...160,  $h = 200$  мкм; 3 – 63...100,  $h = 100$  мкм; 4 – <50 мкм,  $h = 200$  мкм.



**Рис. 2.** Общий вид неоднородных по высоте фильтрующих элементов. Слева направо: 1 – 63...100,  $h = 200$  мкм, (9 вертикальных цилиндрических каналов, видны как "белесые" пятна на поверхности); 2 – 63...100 = const, изменялась –  $h = 100, 150, 200, 250, 300$ , по 3мм; 3) - изменялся размер <50, 50...63, 63...100, 100...160 мкм по 4 мм,  $h = 200$  мкм = const

внешний вид образцов однородных (рис. 1) и неоднородных (анизотропными) (рис. 2) по высоте фильтрующих элементов.

### Результаты исследований и их обсуждение

Исследования показали, что при одних и тех же режимах спекания при переходе от МПК–7,0 к МПК–3,5 термоустойчивость МПК повысилась, очевидно, за счет более высокой молекулярной массы ЛЭТ3,5. Образцы МПК–7,0 успешно выдержали испытание на старение в течение первых 4 месяцев – количество гель-фракции оставалось практически без изменения, поэтому данный материал может быть рекомендован для изготовления фильтров гидрозащиты погруженных электродвигателей ЭЦН на нефтепромыслах Заполярья.

На рис. 3 представлены результаты стойкостных испытаний однородных по высоте фильтров в процессе коррозии. Как видно, вследствие сероводородной коррозии

содержание гель-фракции на основании результатов экстракции на аппаратах Сокслета, возрастает почти в 2 раза, причем в последние два месяца испытаний, в то время как молекулярная масса равномерно по времени падает в 2-2,5 раза. Это говорит о наличии процессов деструкции исходного полимера (ЛЭТ7,0), что как следствие, приводит к ухудшению физико-механических характеристик фильтров.

Испытаниях на старение МПК–3,5 при  $T = 10^{\circ}\text{C}$  показали, что в течение первых 2 месяцев значительно возросла вероятность процессов гелеобразования и химической деструкции: содержание гель-фракции увеличилось в  $\sim 2,5$  раза, а молекулярная масса снизилась в  $\sim 2$  раза. При этом образцы стали более рыхлыми по структуре, о чем свидетельствуют данные по плотности и открытой пористости (рис. 4). На коэффициенте абсолютной газопроницаемости образцов это отразилось незначительно – его величина снизилась на  $\sim 15\%$ , возможно, из-за нарушения однородности материала.

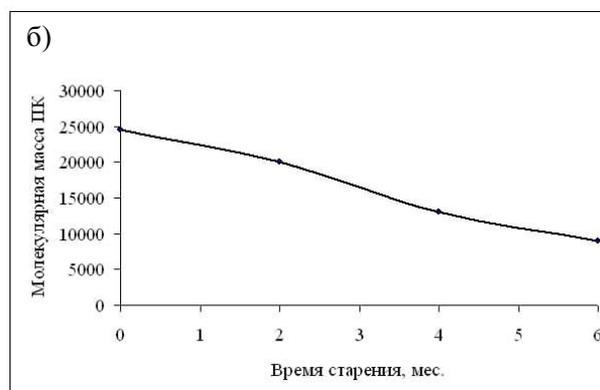
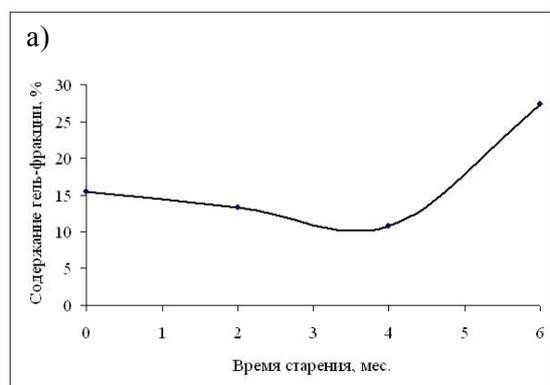


Рис. 3. Изменение содержания гель- фракции (а) и молекулярной массы ПК (б) в образцах МПК–7,0 в процессе старения.



Рис. 4. Зависимость плотности (а) и коэффициента открытой пористости (б) образцов МПК–3,5 от температурного режима старения

Повышение температуры испытаний МПК–3,5 до 80 °С после двух первых месяцев старения привело к более ощутимым изменениям: содержание гель-фракции возросло в 6-7 раз, а молекулярная масса снизилась в 6-8 раз (рис. 5). При этом плотность образцов снизилась незначительно (~ 1,2 раза), хотя доля открытых пор осталась практически неизменной. Величину коэффициента абсолютной газопроницаемости для таких образцов оценить не удалось из-за значительного снижения их прочности.

В табл. 2 представлены результаты измерения плотности, проницаемости (пористости) функционально-градиентных фильтров в сравнении с полученными ранее данными по проницаемости (пористости) однородных фильтров из МПК.

Показано, что изменение толщины спекаемого слоя или варьирование различных фракций поликарбоната по высоте, а также неравномерное спекание по объему не отразились существенным образом на внутренней структуре изделия – пористость и газопроницаемость изменялись незначительно.

Нами были проведены также имитационные испытания, в ходе которых пропускали воздух через предварительно смоченный машинным маслом образец. Смоченный образец фильтра и вода над ним имитировали реальный процесс, происходящий в фильтрах гидрозащиты погруженных электродвигателей установок электроцентробежных насосов ЭЦН.

Сопоставляя основные показатели композиционного материала (плотность и общую пористость) до и после испытаний на про-

ницаемость, установили, что плотность образцов в процессе испытаний увеличилась на 16,4%, а пористость уменьшилась почти в 2 раза (на 47,6%). Это можно объяснить вероятным образованием трехмерной сетчатой структуры. Это подтвердили результаты экстракции на аппаратах Сокслета.

### Проведение численных расчетов расходных характеристик однородных фильтрующих элементов простейших форм

Традиционным способом континуального аналитического описания пропускной способности пористых сред является закон Дарси [15]. Так, физический смысл методики ГОСТа 26450.2-85 по измерению проницаемости сводится к измерению объема (расхода)  $Q$  жидкости или газа, прошедшего через образец высотой  $H$  за единицу времени. Тогда, согласно закону Дарси эта величина

$$Q = \frac{K * \Delta P}{\mu * H} * S, \quad (1)$$

где  $K$  (мм<sup>2</sup>) – рассчитываемый по значению расхода коэффициент проницаемости,  $\mu$  (Па\*с) – динамическая вязкость фильтруемой среды,  $\Delta P$  (Па) – перепад давления,  $S$  (м<sup>2</sup>) – площадь поперечного сечения фильтра. Сам закон Дарси является упрощенной формой системы уравнений Навье – Стокса. Заметим, что в рамках континуального подхода практически невозможно описать аналитически пористую структуры среды, а тем более смоделировать градиент свойств (структуры). Зато такой подход позволяет проводить интуитивно прозрачный анализ и получать фи-

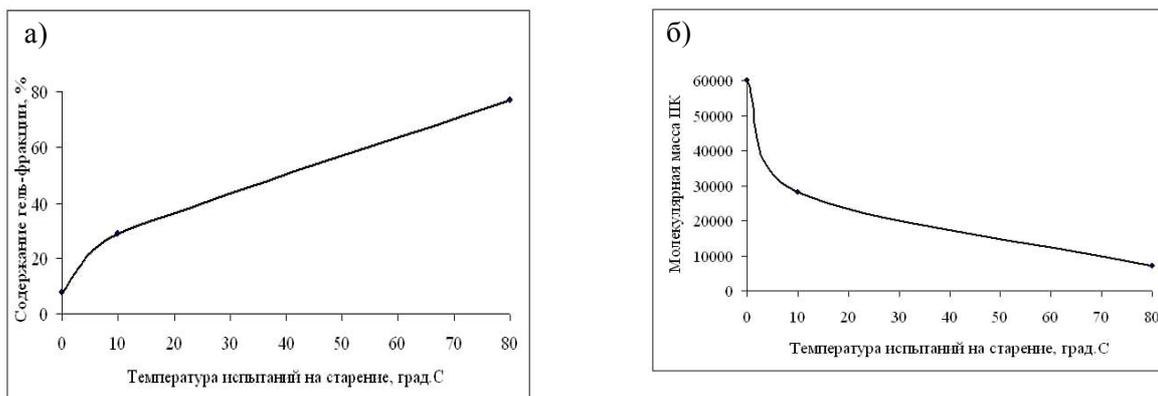


Рис. 5. Зависимость содержания гель- фракции (а) и молекулярной массы ПК (б) в образцах МПК–3,5 от температурного режима старения

Таблица 2. Плотность, пористость и газопроницаемость образцов из МПК-7,0 и МПК-3,5

Марка ПК в масле МПК (номер образца по табл.)	Размер частиц МПК, мкм	Высота проращивания слоев при СТС, h (мм)	Плотность (метод гидростат. взвешивания), г/см <sup>3</sup>	Плотность P <sub>2</sub> (метод жидко насыщения), г/см <sup>3</sup>	Общая пористость P <sub>2</sub> (расчит. из P <sub>2</sub> ), %	Общая пористость P <sub>2</sub> (расчит. из P <sub>2</sub> ), %	Коэффициент охлывной пористости K <sub>п</sub> %	ΔK <sub>п</sub> , %	Удельный объем пор, см <sup>3</sup>	Коэффициент абс. газопроницаемости K <sub>г</sub> , мдари
ЛЭГ-7,0	<63	200	3,38	3,03	33,19	25,64	31,43	31,54	0,10	16711
ЛЭГ-7,0 <sup>1)</sup>	<63	200	3,93	—	13,43	—	—	—	—	20945
Однородные образцы из МПК на основе ЭГ-3,5										
ЛЭГ-3,5 (№1)	63-100	200	3,37	2,68	40,95	25,80	33,32	7,64	0,28	28616
ЛЭГ-3,5 (№2)	100-160	200	3,26	2,16	52,42	28,27	46,13	7,56	0,44	32819
ЛЭГ-3,5 (№3)	63-100	100	3,22	2,46	45,89	29,00	42,46	6,71	0,45	23511
ЛЭГ-3,5 (№4)	<50	200	—	1,90	58,13	—	29,28	6,28	0,27	13576
Неоднородные (анализировать по вкл) образцы из МПК на основе ЭГ-3,5										
ЛЭГ-3,5 (№5)	63-100	200	—	2,30	49,41	—	45,26	8,09	0,40	31124
ЛЭГ-3,5 (№6)	100	100, 150, 200, 250, 300 (по 3 мм)	—	2,15	52,67	—	40,50	7,66	0,39	24926
ЛЭГ-3,5 (№7)	<50, 50-63, 63-100, 100-160 (по 4 мм)	200	—	1,99	56,22	—	52,40	7,53	0,52	30388
После коррозионных испытаний образцы из МПК на основе ЭГ-3,5										
ЛЭГ-3,5 (№1) <sup>2)</sup>	63-100	200	—	1,9923	56,119	—	47,8580	6,7866	0,5098	28822
ЛЭГ-3,5 (№2) <sup>2)</sup>	100-160	200	—	1,8104	60,190	—	53,4857	8,9540	0,4781	24105
ЛЭГ-3,5 (№3) <sup>2)</sup>	63-100	100	—	1,8286	59,7180	—	52,5972	8,3144	0,4719	25753
ЛЭГ-3,5 (№1) <sup>3)</sup>	63-100	200	—	1,9745	56,5040	—	38,7336	11,8711	0,5059	—
ЛЭГ-3,5 (№2) <sup>3)</sup>	100-160	200	—	1,8669	58,8743	—	46,3945	11,1709	0,6794	—
ЛЭГ-3,5 (№3) <sup>3)</sup>	63-100	100	—	1,8609	59,0065	—	45,3688	10,0358	0,7344	—

Примечания:

<sup>1)</sup> После испытаний на проницаемость пропитанных маслом образцов воздухом, проведенных согласно ГОСТ 25283-93;<sup>2)</sup> После 2 месяцев старения при T = 10°C; <sup>3)</sup> После 2 месяцев старения при T = 80°C

зически ясные результаты.

Нами был проведен сравнительный численный анализ возможностей профессиональных пакетов прикладных программ – “ANSYS” и “FEMLAB” применительно к задачам гидродинамики потоков в пористых средах, какими и являются синтезируемые нами фильтрующие элементы. В указанных профессиональных пакетах пористая среда моделируется с помощью понятия о “распределенном дополнительном сопротивлении”, создаваемой пористой средой при движении через нее жидкости или газа (рис. 6). Это распределенное сопротивление  $R$  (или добавочный градиент давления) должно быть задано в каждой точке расчетной среды самим исследователем. Брать его необходимо (и это одна из трудностей) из экспериментальных данных или из каких-либо интуитивных соображений. Конечно, ANSYS позволяет смоделировать зерна пористой среды в виде шариков (или других правильных тел) и провести расчет обтекания на отдельном шарике произвольной формы. Такой расчет на группе шариков мы планируем сделать в дальнейшем, чтобы выявить основные закономерности течения. Однако, когда число шариков (зерен) стремится к сотням тысяч, провести рас-

чет течения между всеми шарами становится практически невозможным [16].

Поэтому, система уравнений движения для плоской задачи нами была записана в виде:

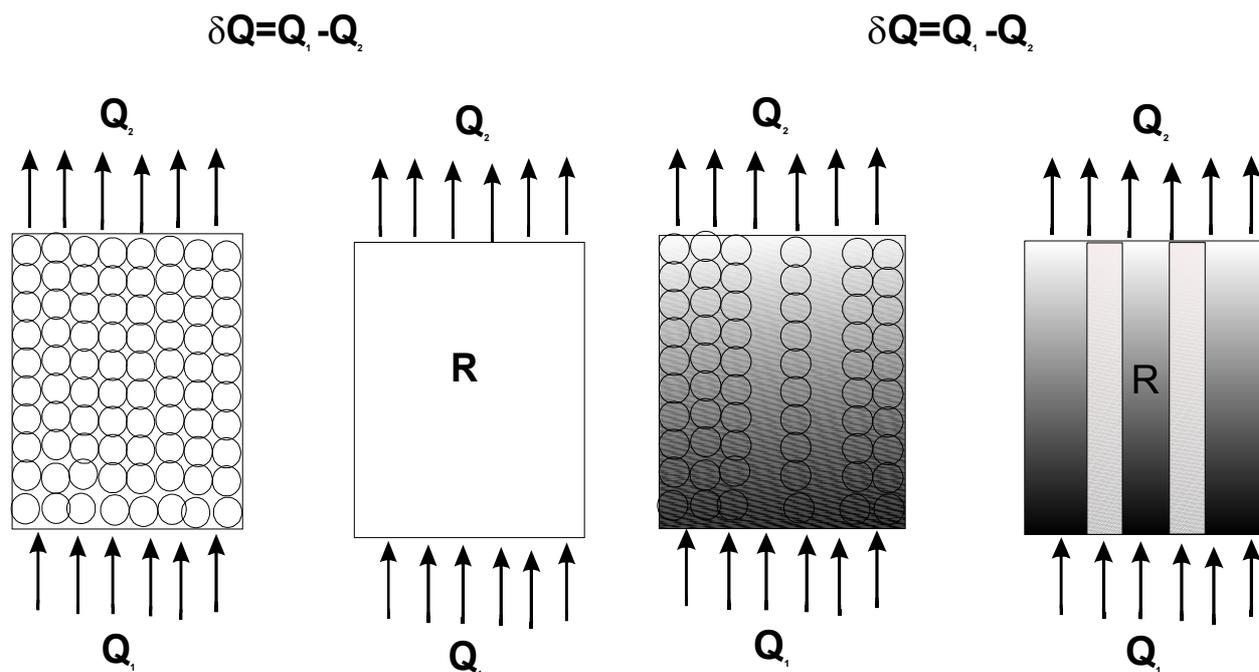
$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = \rho * g_i + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu * \frac{\partial V_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial x_j} + R_i, i, j = 1, 2. \quad (2)$$

и дополнена уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial x_i} = 0, i = 1, 2. \quad (3)$$

В этой системе уравнений искомыми являются компоненты скоростей потока –  $V_1$  и  $V_2$ , а также давление  $P$ . В ANSYS считаются известными размеры расчетной области (геометрические характеристики фильтрующего элемента) и физические свойства потока: плотность  $\rho$ , динамическая вязкость  $\mu$  и сила тяжести  $g$ . На границе расчетной области задается известный из экспериментов перепад давления  $dQ$ .

Как отмечалось ранее, распределенное сопротивление  $R_i$  должно быть задано при расчете, опираясь на экспериментальные данные, часто полученные в линейном приближении (см. уравнение (1)). В действительности



**Рис. 6.** Подходы к моделированию проницаемости пористой среды: слева – однородный фильтр (система шариков заменяется распределенным сопротивлением  $R$ ); справа – неоднородный фильтр (степень неоднородности обозначена в затемнении)

сти система уравнений должна быть двух- (а то и трех-) мерной, и это серьезная проблема при теоретическом описании явления.

Пакет ANSYS FLORTAN CFD имеет несколько конечных элементов для описания данной ситуации. Так, элементы 2D FLORTAN 141 (двумерный) и 3D FLOTRAN 142 (трехмерный) распределенное сопротивление, заданное к единице объема определяют так:

$$R_i = \frac{\partial P}{\partial x_i} = - \left[ K \rho V_i |V| + \frac{f}{D_h} \rho V_i |V| + C \mu V_i \right], i = 1, 2. \quad (4)$$

Здесь первое слагаемое описывает само распределенное сопротивление, второе – трение на стенках, третье – проницаемость. Сложность адаптации пакета ANSYS к реальной физике явления состоит в том, что модуль скорости потока равен компоненте скорости ( $|V|=V_i$ ) только при одномерном движении, для более общего случая, слагаемое  $K \rho V |V| = K \rho V_i |V_i| \phi$ . Погрешность  $f$  в некоторых случаях может быть высока.

Элементы FLUID 141 и FLUID 142 также имеют возможность учета насосного наддува.

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = C_1 + C_2 |V_i| + C_3 V_i^2. \quad (5)$$

Однако, задание распределенного сопротивления с помощью этой формулы дает правильные расчеты только при неотрицательных значениях скоростей по расчетному полю и отсутствию турбулентностей. Получается, что фактически турбулентность в пористой среде ANSYS вообще не считает.

Пакет FEMLAB (COMSOL AB) является конечно-элементным расширением пакета MATLAB и отличается рядом уникальных

возможностей. Можно самостоятельно аналитически задать вид уравнения или систему уравнений, можно комбинировать уравнения из различных разделов физики (multi physic). Наконец, любые краевые условия и параметры задачи (уравнения) можно задавать функционально или параметрически, используя все возможности пакета MATLAB.

Поэтому, записав уравнение движения (2) в системе FEMLAB, можно пытаться моделировать распределенное сопротивление  $R_i$ . Более того, функционально можно задать вязкость  $m$ , привнося в расчет тем самым элементы турбулентности. То есть считать, что эффективная вязкость  $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$  складывается из кинематической и динамической (турбулентной) составляющей. Этот подход известен как (k-ε) приближение [16].

Однако наряду с вышеизложенным нами была предложена своя оригинальная графо-расчетная методика пред подготовки численных расчетов. Смысл ее сводится к следующему. Не пытаться моделировать фильтрующий элемент в виде набора простейших частиц (шариков, цилиндров и пр.) или “доставать” из опыта параметр  $R$ . Необходимо сделать шлиф (поперечное сечение) фильтрующего элемента (рис. 7а – увеличение  $\times 20$ , шкала 0,5 мм), обработать полученное фото макроструктуры – операции (рис. 7 б-с). Считать файл векторной графики средствами ANSYS или FEMLAB. Важно подчеркнуть, что такой подход решает проблемы адекватности графического описания расчетной области и реальной пористой среды (среда берется из эксперимента). Более того, теперь структура пор фильтра может быть любой – однородной или анизотропной, задача введе-

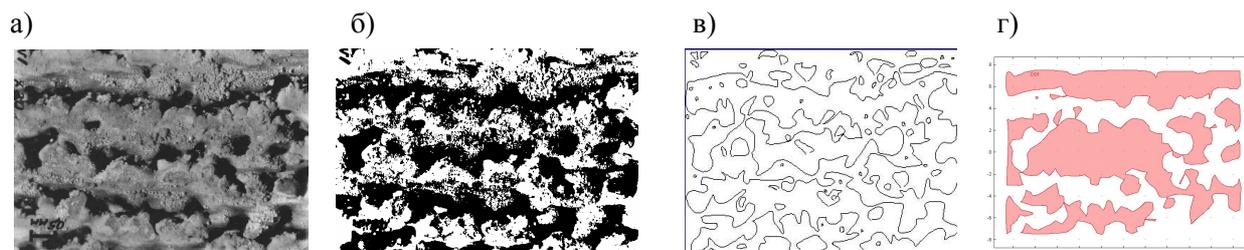


Рис. 7. Графическая обработка изображения:

а - PCX файл, 256 цветов, полутоновое изображение вертикального сечения фильтра; б - операция удаления цвета, монохромный режим; с – конвертация изображения в векторную графику; д – графическое представление расчетной области - среда FEMLAB

ния распределенного сопротивления и его определения полностью отпадает. Результаты наших расчетов потоковых характеристик и сравнение с экспериментом (табл. 2) мы планируем представить в отдельной статье.

### Заключение

Таким образом, нами проведены экспериментальные исследования по старению пористых фильтрующих элементов, синтезируемых методом СЛС, в условиях сероводородной коррозии. Показано, что МПК-7,0 может быть рекомендован для изготовления фильтров гидрозащиты погруженных электродвигателей ЭЦН на нефтепромыслах Заполярья. Показано, что изменение толщины спекаемого слоя или варьирование различных фракций поликарбоната по высоте, а также неравномерное спекание по объему – функциональный градиент, не отразились существенным образом на пористости и газопроницаемости фильтров.

Разработана оригинальная графо - расчетная методика и для определения протоковых характеристик фильтрующих элементов, как однородных (изотропных) так и анизотропных, для фильтров цилиндрической формы.

Представленные работы проводились, в том числе, при поддержке грантов РФФИ № 04-03-96500-р2004 Поволжье\_a, 06-08-00102 Инж\_a.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атте К., Оцетск К.* Металлокерамические фильтры, изготовление, свойства и применения. Ленинград. 1959.
2. *Изжеуров Е.А.* Основы расчета и проектирование изделий из материала МР для гидрогазосистем энергетических установок. М.: Машиностроение. 2001.
3. *Шишковский И.В., Куприянов Н.Л.* Способ изготовления объемных изделий из порошковой композиции. Заявка на изобретение. N 95110182/ 02 (017874) от 16.06.96, 10.с. Бюллетень изобретений ВНИИПИ № 10, 1997, ст. 44. Патент № 2145269 зарегистрирован 10.02.2000 г.
4. *Шишковский И.В., Куприянов Н.Л., Гуреев Д.М., Петров А.Л.* Способ изготовления объемных изделий из биметаллических порошковых композиций. Патент на изобретение № 2217266 от 27 ноября 2003 г, по заявке № 99127935 от 30.12.1999.
5. *Шишковский И.В., Макаренко А.Г., Петров А.Л.* Способ изготовления объемных изделий из порошковых композиций. Заявка № 2000101975/02, дата приоритета 28.01.2000 г. Патент № 2217265 зарегистрирован 27.11.2003 г.
6. *Аскольская И.А., Шишковский И.В.* Физико-механические свойства объемных изделий, синтезированных методом селективного лазерного спекания. // Механика композиционных материалов и конструкций 1999. Т. 5 № 3
7. *Платэ Н.А.* Мембранные технологии – авангардное направление развития науки и техники XXI века. // Мембраны. Критические технологии. 2000. № 1.
8. *Leong K.F., Phua K.K.S., Chua C.K., Du Z.H., Teo K.O.M.* Fabrication of porous polymeric matrix drug delivery devices using the selective laser sintering technique. // Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 215. Part H. 2001.
9. *Cheah C.M., Leong K.F., Chua C.K., Low K.H., Quek H.S.* Characterization of microfeatures in selective laser sintered drug delivery devices. // Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 216. Part H: J. Engineering in Medicine. 2002.
10. *Liew C.L., Leong K.F., Chua C.K., Du Z.* Dual Material Rapid Prototyping Techniques for the Development of Biomedical Devices. Part 1: Space Creation. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2001. V. 18. P. 717–723.
11. *Шишковский И.В.* Синтез функциональных изделий из градиентных материалов методом селективного лазерного спекания. // Перспективные материалы. 2001. № 5.
12. *Петров А.Л., Щербаков В.И., Шишковский И.В.* Способ лазерного синтеза объемных изделий. Заявка № 2000120948/20, дата приоритета 11.08.2000 г. Патент № 2212982 от 27.09.2003 г.
13. *Щербаков В. И., Снарев А. И., Петров А.Л., Шишковский И.В.* Лазерный синтез метал-полимерных фильтрующих элемен-

- тов с заданными свойствами // Известия АН. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 9.
14. *Снарев А.И., Куренков А.М., Щербаков В.И., Петров А.Л., Шихковский И.В.* Разработка метал-полимерных фильтрующих элементов с заданными свойствами для гидрозащиты УЭНЦ // Интеграл. Передовые нефтегазовые технологии. 2002. № 2 (37).
15. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения открытой пористости жидконасыщением. ГОСТ 26450.2-85. Метод определения абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
16. *Меламед Л.* Э Femlab и ANSYS в расчетах гидродинамики атомных реакторов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. № 2(6) 2004.

## NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROPERTIES OF GRADIENT FILTER ELEMENTS, SYNTHESIZED VIA SLS METHOD

© 2006 I.I. Juravleva<sup>2</sup>, T.V. Rojchenko<sup>2</sup>, A.L. Petrov<sup>1</sup>, V.I. Scherbakov<sup>1</sup>,  
A.I. Snarev<sup>3</sup>, I.V. Shishkovski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Samara State University

<sup>3</sup> Samara State Technical University

In the present paper, experimental study by corrosion resistance (as homogeneous as heterogeneous) filter elements, synthesized via SLS method, are carried out. It is shown, that at the same conditions of laser sintering under transferring from MPC-7,0 to MPC-3,5 powder composition – the thermal stability has increased: the amount of a sol fraction has insignificantly increased (on ~ 5 %), and average viscous molecular weight has decreased in 1,4 times and has made  $60 \times 10^3$ . During a sintering process the density of a material has decreased in ~ 1.6 times, as porosity and gas permeability of the 3d filters have increased by 29 and 25 %, accordingly. It was designed the original graph -numerical procedure for definition of flow characteristics of filter elements cylindrical form, as isotropic as anisotropic internal structure.