

## ЛАБИРИНТНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ-РЕАКТОР В ТЕХНОЛОГИЯХ С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ ЖИДКОСТЯМИ<sup>1</sup>

Галимов Р.А., Данилин А.Н., Карнет Ю.Н., Паршина М.С.,  
Семёнов Н.А., Яновский Ю.Г.

*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

### РЕЗЮМЕ

Предлагаются и анализируются устройства для одновременного смешивания и реагирования в потоке разнородных по свойствам жидких сред в технологиях синтеза и использования магнитореологических суспензий. Рассматриваются два варианта лабиринтного смесителя-реактора, которые могут быть выбраны для реализации различных по задачам технологий.

Рассмотренные устройства изготовлены и испытаны с использованием магнитоуправляемых суспензий для технических и медико-биологических приложений.

**Ключевые слова:** магнитореологические среды; синтез; лабиринтный смеситель-реактор; демпферы; магниточувствительные сорбенты

## LABYRINTH MIXER-REACTOR IN TECHNOLOGIES WITH MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS

Galimov R.A., Danilin A.N., Karnet Yu.N., Parshina M.S.,  
Semenov N.A., Yanovsky Yu.G.

*Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

### SUMMARY

Special devices are suggested and analyzed for simultaneous mixing and reaction heterogeneous fluids in flow technologies with magnetorheological suspensions. Two variants of labyrinth mixer-reactor are considered which can be used for technologies with different purposes.

The described devices have been produced and tested with magnetorheological suspensions in technical and biomedical applications.

**Key words:** magnetorheological fluids; synthesis; labyrinth mixer-reactor; damper; magnetosensitive sorbents

### ВВЕДЕНИЕ

Получение магнитных жидкостей (МЖ) и магнитно-реологических суспензий (МРС) с заданными свойствами является важной задачей для многих технических и медико-биологических приложений. В технике они могут быть использованы как рабочие среды в демпферных устройствах [1,2] и в процессах

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда:  
код проекта № 14-19-01653.

магнитной сепарации немагнитных материалов (руд), как смазочные и герметизирующие материалы и как теплоносители, поведение которых можно регулировать при помощи наложения сил внешнего магнитного поля. В медицине – как магнитные носители оболочек, обладающих сорбционной активностью для связывания и последующего удаления патологических веществ из организма человека в специальных магнитных ловушках [3-6].

Как известно, магнитные жидкости представляют собой взвесь однодоменных микрочастиц ферро- и ферримагнетиков в жидкой среде (керосине, воде, толуоле, минеральных и кремнийорганических маслах и т.п.). В качестве магнетика используется высокодисперсное железо, ферромагнитные окислы ферриты никеля, кобальта. Седиментационная устойчивость систем с магнитными частицами обеспечивается адсорбционными слоями, препятствующими сближению частиц. Повышенная устойчивость осуществляется введением определенного количества стабилизатора – поверхностно-активного вещества (ПАВ), состоящего из полярных органических молекул, которые создают на поверхности дисперсных частиц адсорбционно-сольватные слои. Величина намагниченности насыщения зависит от размера частиц и их объемной концентрации, обусловленных параметрами среды: pH среды, природы магнитной компоненты. Увеличение размера частиц ограничено из-за возможности слипания частиц за счет их большого магнитного момента или нарушения условия однодоменности. В устойчивых системах обычно размер частиц не превышает 10-15 нм. Анализ основных методов синтеза показал, что наиболее перспективными методами в целях получения устойчивых суспензий с хорошими магнитными характеристиками являются механический метод и метод химической конденсации. При этом важная роль отводится процессам смещения компонент суспензии с одновременным протеканием физико-химических взаимодействий.

В технологиях синтеза и использования МРС значимую роль играют процессы смешивания и реагирования жидких компонент в потоке в течение заданного времени экспозиции. Это необходимо не только для получения однородно-дисперсной среды, но и для наиболее полного физико-химического взаимодействия частиц суспензии. Для реализации этих процессов используют специальные устройства – смесители-реакторы, конструкции которых разнообразны в зависимости от принципа действия и условий их использования.

Ниже даётся описание и расчёт параметров конструкций двух вариантов лабиринтного смесителя-реактора, представляющего собой устройство для смешивания разнородных по вязкости жидкостей и суспензий с целью получения однородных по составу жидких сред и наиболее эффективного прохождения физико-химического реагирования компонент жидкостей по всему рабочему объему.

## 1. СПИРАЛЬНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ-РЕАКТОР

Спиральный смеситель-реактор состоит из четырех частей: корпуса, двух торцевых пробок-фиксаторов (далее – пробок) и вкладыша, который вставляется внутрь корпуса и зажимаются с торцов пробками [7]. Возможный вариант конструкции представлен на рис.1. Пробки могут соединяться с корпусом, например, с помощью резьбового соединения или плотной посадки. Одна из пробок может быть изготовлена вместе с корпусом в виде единой детали. Вкладыш может зажиматься внутри корпуса пробками или фиксироваться

плотной посадкой непосредственно в корпусе смесителя с контактом или без контакта с пробками. При изготовлении деталей смесителя-реактора могут быть использованы различные материалы: металлы, керамика, пластмассы или резины в зависимости от целей использования смесителя-реактора.

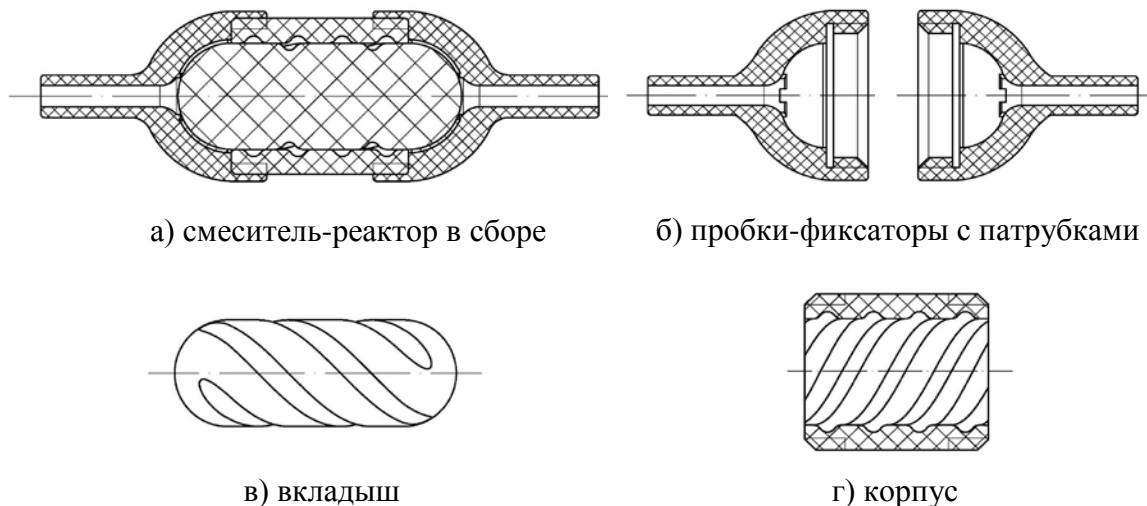


Рис.1. Спиральный смеситель-реактор и его элементы.

Конструкция вкладыша должна обеспечивать зазоры между торцевыми поверхностями вкладыша и внутренними поверхностями пробок для свободного протекания жидкостей.

На внутренней поверхности корпуса по всей его длине изготавливаются каналы по винтовым линиям (спиралям) вдоль оси корпуса. На поверхности вкладыша также изготавливаются спиральные каналы вдоль оси вкладыша. Направления углов наклона спиральных каналов корпуса и вкладыша могут быть как противоположными, так и совпадающими. Противоположные направления наклона используются для интенсивного смешивания компонент жидкостей. Однонаправленные спиральные каналы корпуса и вкладыша используются для слабоинтенсивного смешивания жидкостей, когда существуют ограничения на число Рейнольдса, характеризующего степень турбулизации смешивания потоков. При совпадающих направлениях углы наклона спиральных каналов корпуса и вкладыша должны отличаться друг от друга.

Пробки имеют патрубки, расположенные, например, по оси смесителя-реактора и предназначенные для соединения с магистралями. По одному патрубку внутрь смесителя-реактора подаются смешиваемые жидкости, по патрубку на противоположном конце смесителя-реактора однородная смесь этих жидкости выводится.

В начальный момент неоднородная смесь жидкостей подается под некоторым давлением или самотеком в патрубок одной из пробок, заполняя объем между пробкой и вкладышем. В этом объеме жидкости начинают смешиваться и после его заполнения продолжают движение по спиральным каналам, равномерно распределяя общий объем поступающих жидкостей между каналами корпуса и вкладыша.

В местах пересечения каналов корпуса и вкладыша потоки, движущиеся относительно друг друга под разными углами, сталкиваются. Это приводит

к резкому изменению скоростей и давления в потоке, турбулизации течения и, как следствие, интенсивному перемешиванию компонент жидкой среды.

Пусть  $W$  – объемный расход подводящей магистрали (трубки), выраженный в миллилитрах за одну минуту. В предлагаемой конструкции смесителя-реактора имеется  $2n$  заходов спиралей ( $n$  на вкладыше и  $n$  на внутренней поверхности корпуса). Поэтому поступающий объем жидкости будет делиться примерно поровну между спиральными каналами. Значит, одному спиральному каналу соответствует расход

$$W_1 = W/(2n) [\text{мл}/\text{мин}] = 25W/(3n) [\text{мм}^3/\text{сек}].$$

Обозначим скорость потока жидкости по спиральному каналу смесителя через  $v$  [ $\text{мм}/\text{сек}$ ]. Тогда объем смеси, который протекает за одну секунду через сечение одного спирального канала, равен

$$v \cdot F = W_1 = 25W/(3n),$$

где  $F$  [ $\text{мм}^2$ ] – площадь поперечного сечения канала.

Отсюда вычисляем линейную скорость потока жидкости по одному каналу

$$v = 25W/(3nF).$$

Введем величины:  $t_p$  – минимально допустимое время реагирования компонент жидкой среды,  $W_{\max}$  – максимально допустимый расход течения жидкости, которые будем считать известными. Тогда длина спирального канала, обеспечивающая эффективность реагирования компонент при максимальном расходе

$$L = v \cdot t_p = 25W_{\max} t_p / (3nF).$$

Произведение  $L \cdot F$  определяет:

объем жидкости в одном канале  $V = 25W_{\max} t_p / (3n)$

и суммарный объем  $V^{\Sigma} = 2n \cdot V = 50W_{\max} t_p / 3$ .

Эффективная длина смесителя

$$L_{\text{мес.}} = L \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между воображаемой осью канала и поперечным сечением смесителя.

Ограничение на скорость движения жидкости по каналу будем задавать через максимально допустимое значение числа Рейнольдса  $Re_{\max}$ . Эта величина, как известно, связывает линейную скорость течения жидкости  $v$ , плотность текущей жидкости  $\rho$ , диаметр условно круглого сечения канала  $\tilde{d}$  и динамическую вязкость  $\eta$  протекающей жидкой среды формулой

$$Re = \rho \tilde{d} v / \eta.$$

При  $Re = Re_{\max}$  имеем выражение для максимально допустимой скорости потока

$$v_{\max} = Re_{\max} \eta / (\rho \tilde{d}).$$

Тогда суммарный максимально допустимый расход определяется по формуле

$$W_{\max}^{\text{Re}} = 3n v_{\max} F / 25 = 3n Re_{\max} \eta F / (25 \rho \tilde{d}).$$

В качестве конкретного примера рассмотрим смеситель-реактор для проведения экстракорпоральной детоксикации биологической среды от токсинов с помощью магнитоуправляемых сорбентов. Известно [8], что для таких процедур максимальный расход  $W_{\max} \leq 200 \div 250 \text{ мл}/\text{мин}$ ,

а эффективное время сорбции  $t_p$ , необходимое для связывания и удерживания на сорбентах токсинов без заметного проявления коагуляции, составляет примерно 10-20 сек. Для определённости принимаем  $W_{\max} = 200 \text{ мл/мин}$ ,  $t_p = 20 \text{ сек}$ .

В качестве биологической среды будем рассматривать суспензию плазмы крови или лимфы с сорбентами. Плотность и вязкость суспензии принимаются соответственно равными

$$\rho = 1050 [\text{кг/м}^3] = 1050 \cdot 10^{-9} [\text{кг/мм}^3], \quad \eta = 4 \cdot 10^{-3} [\text{Па} \cdot \text{с}] = 4 \cdot 10^{-6} [\text{кг/(мм} \cdot \text{с)}].$$

Известно, что для крови предельное значение числа Рейнольдса составляет 900–1200. Очевидно, что предельно допустимое значение  $Re$  для рассматриваемой суспензии, лишенной форменных элементов, выше. Однако для определённости принимаем  $Re_{\max} = 1200$ .

Выберем вкладыш с внешним диаметром 20 мм и четырьмя заходами одинаковых спиральных каналов с углом наклона относительно поперечного сечения смесителя  $\alpha = 30 \text{ град}$ . Соответственно принимается, что корпус смесителя имеет аналогичные каналы с четырьмя заходами спиралей под тем же углом. Принимается также, что поперечное сечение произвольного канала представляет собой половину круга диаметром  $d = 8 \text{ мм}$ . Тогда

$$n = 4, \quad F = \pi d^2 / 8 \approx 25.13 \text{ мм}^2;$$

$$L = 25 W_{\max} t_p / (3nF) \approx 332 \text{ мм}, \quad L_{\text{смес.}} = L \sin \alpha \approx 166 \text{ мм};$$

$$V^2 = 50 W_{\max} t_p / 3 \approx 66.7 \text{ см}^3.$$

Диаметр условно круглого сечения определим по формуле

$$\tilde{d} = 2\sqrt{F/\pi} \approx 5.66 \text{ мм}.$$

Тогда

$$W_{\max}^{\text{Re}} = 3n Re_{\max} \eta F / (25 \rho \tilde{d}) \approx 9740 [\text{мл/мин}],$$

что существенно превышает назначенный предельный расход  $W_{\max} = 200 \text{ мл/мин}$ .

## 2. ЯЧЕИСТЫЙ СМЕСИТЕЛЬ-РЕАКТОР

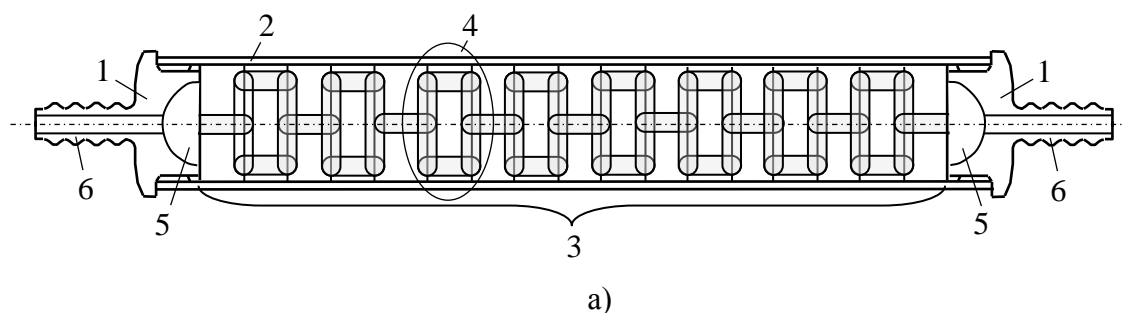
Ячеистый смеситель-реактор – другой вариант лабиринтного смесителя-реактора, вкладыш которого набирается из одинаковых ячеек, формирующих разнообразные по конфигурации внутренние каналы. Длина ячеистого смесителя-реактора может легко изменяться добавлением или удалением ячеек. Предполагаемыми областями применения смесителя-реактора являются разделы медицины, биологии и химии, связанные с подготовкой суспензий для использования в сорбционных технологиях, в том числе, для детоксикации биологических жидкостей организма.

Смеситель (рис.2) состоит из трех основных частей: двух торцевых пробок-фиксаторов 1 (далее – пробки), корпуса цилиндрической формы 2 в виде трубки и цилиндрического вкладыша 3, который составляется из набора одинаковых ячеек (сегментов) 4. В конструкции смесителя может быть предусмотрена камера предварительного смешивания 5 – свободное пространство внутри корпуса между пробкой и начальным торцом ячеистого вкладыша.

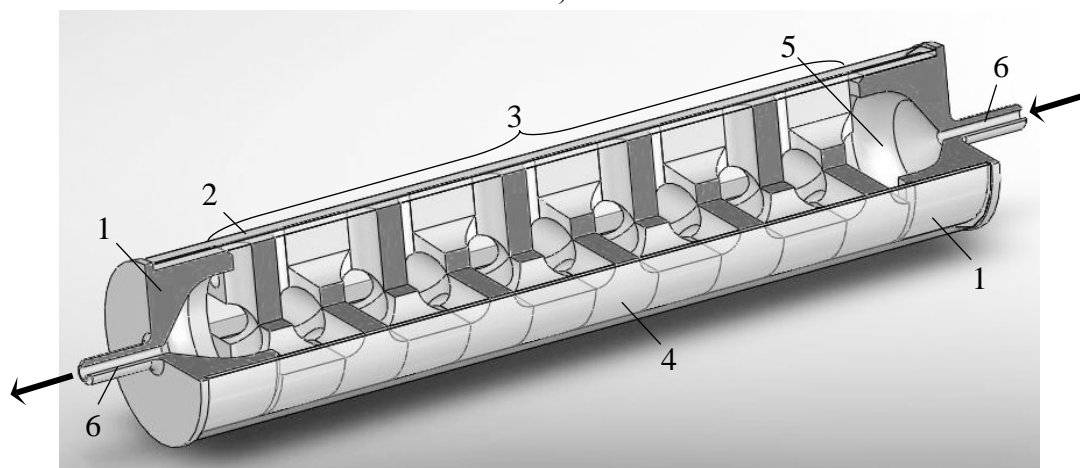
При сборке вкладыша его ячейки должны быть ориентированы относительно друг друга таким образом, чтобы обеспечить соосность

соответствующих каналов соседних ячеек для обеспечения свободного протекания жидкости. Для этого ячейки могут иметь выступы и отвечающие им углубления, координирующие взаимную угловую ориентацию ячеек и облегчающие выполнять сборку вкладыша. Также для облегчения сборки вкладыша ячейки могут иметь сквозные отверстия для продевания шпилек (спиц), которые могут иметь на концах резьбу для навинчивания крепежных изделий и стягивания ячеек в единое изделие (вкладыш). Вкладыш, составленный их набора ячеек, вставляется внутрь цилиндрического корпуса без зазора или с незначительным натягом и фиксируется с торцов торцевыми пробками. Пробки могут соединяться с корпусом, например, с помощью резьбового соединения или плотной посадки. Одна из пробок может быть изготовлена вместе с корпусом в виде единой детали. Торцевые пробки имеют патрубки 6, расположенные, например, по оси смесителя-реактора и предназначенные для соединения с трубками магистралей. По одному патрубку внутрь смесителя-реактора подаются смешиваемые жидкости (входных патрубков может быть несколько – отдельно для каждой смешиваемой жидкости), по патрубку пробки на противоположном конце смесителя-реактора однородная смесь этих жидкости выводится.

Вкладыши могут зажиматься внутри корпуса пробками или фиксироваться плотной посадкой непосредственно в корпусе с контактом или без контакта с пробками.



а)



б)

Рис.2. Ячеистый смеситель-реактор: а) элементы конструкции в сборе; б) общий вид с вырезанной четвёртой частью.

Движение жидкости по каналам ячеек происходит по схеме, представленной на рис.3. В местах пересечения каналов происходит столкновение потоков жидкости с сильной турбулизацией течения, что способствует перемешиванию

жидкостей, разрушению агломератов и сгустков. Исходным полуфабрикатом при изготовлении ячейки является отторцованный круговой цилиндр. Каналы в ячейке могут изготавливаться сверлением, фрезерованием, электроэрозионным способом и др. методами. Ячейка с каналами также может быть изготовлена с использованием технологий литья. Конфигурация каналов в ячейке может быть различной в зависимости от технологичности и стоимости производства. Вкладыш 3 может изготавливаться как единое целое.

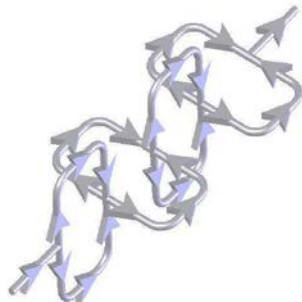


Рис.3. Схема движения жидкости по каналам ячеек смесителя-реактора.

Два наиболее технологичных варианта ячейки представлены на рис.4.

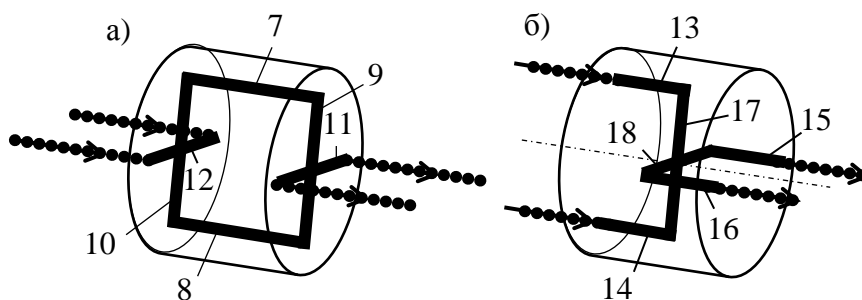


Рис.4. Схемы исполнения ячеек.

В варианте а) каналы 7, 8 могут быть получены сверлением или фрезерованием. Каналы 9-12 могут быть получены, например, фрезерованием с получением сечения канала в виде половины круга. При соединении с соседними ячейками торцевые каналы восстанавливают каналы с круговым сечением.

В варианте б) все каналы получаются сверлением: каналы 13-16 – сверлением торцевых поверхностей, каналы 17, 18 – цилиндрической поверхности. Однако в этом случае необходимо заделать отверстия на цилиндрической поверхности. При плотной посадке вкладыша в цилиндрическом корпусе эту операцию можно не выполнять.

Вид ячейки по схеме варианта а) показан на рис.5. Рассмотренный выше вариант конструкции ячеистого смесителя-реактора предполагает пересечение каналов вкладыша под прямым углом. Однако возможны варианты пересечения каналов под углами, отличными от прямого. Возможно также наличие ячеек, пространства которых образуют две петли каналов, а также более двух петель каналов. Схема поперечного сечения ячейки двухпетлевого вкладыша показана на рис.6. По каналам с маркером «I» жидкость поступает в ячейку. В месте пересечения торцевых каналов, обозначенным маркером «M», потоки сталкиваются и интенсивно перемешиваются. По каналам с маркером «O»

жидкость выводится из ячейки. Общий вид такой ячейки показан на рис.7. Как пример, на рис.8 показана ячейка трёхпетлевого вкладыша.

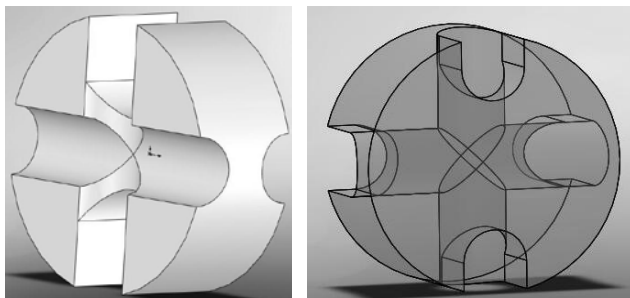


Рис.5. Вид ячейки по схеме варианта а). Слева – вид в изометрии, справа – прозрачное изображение.

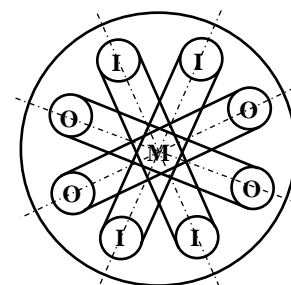


Рис.6. Вариант многоканальной ячейки.

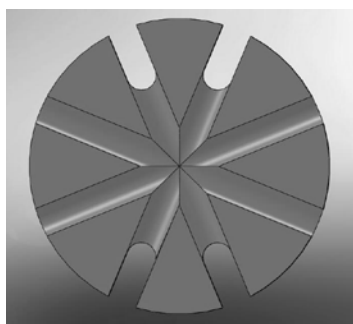


Рис.7. Общий вид ячейки двухпетлевого вкладыша.

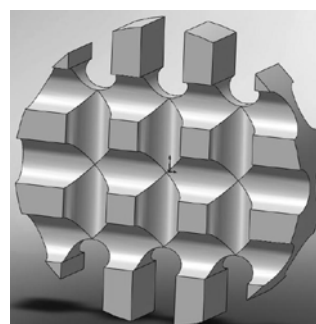


Рис.8. Общий вид ячейки трёхпетлевого вкладыша.

Ячеистая структура вкладыша позволяет варьировать длиной смесителя-реактора, подбирая её опытным путём или путём математических расчётов для получения суспензий приемлемой однородности и (или) для обеспечения требуемого времени реагирования компонент смешиваемых жидкостей. Например, это имеет большое значение при смешивании крови, лимфы, плазмы с жидкими сорбентами с целью извлечения токсинов из биосреды.

Регулярная структура каналов вкладыша позволяет дать оценки объёмным и скоростным параметрам ячеистого смесителя-реактора.

Рассмотрим, например, вариант ячейки, показанный на рис.4б), при пересечении цилиндрических каналов с одинаковым радиусом  $r$  под прямым углом. Каналы в месте пересечения отдельно показаны на рис.9а). Область пересечения двух каналов цилиндрической формы имеет вид «подушки» и показана на рис.9б). Объем «подушки» равен  $V_{\circ} = 16r^3/3$ . Эту формулу можно получить, используя, например, принцип Кавальери.

Из рис.10 видно, что объем каналов одной ячейки

$$V_1 = 4 \frac{l}{2} \pi r^2 + 2h\pi r^2 - \frac{16}{3} r^3 = 2r^2 \left[ \pi(l+h) - \frac{8}{3} r \right].$$

Суммарный объем каналов вкладыша, состоящего из  $n$  ячеек, равен

$$V_{\Sigma} = nV_1 = n \cdot 2r^2 \left[ \pi(l+h) - \frac{8}{3} r \right] = 2r^2 \left[ \pi L + n \left( \pi h - \frac{8}{3} r \right) \right],$$

где  $L = nl$  – суммарная длина вкладыша.



Пусть нам задан объемный расход  $W$  жидкости, согласованный по размерности со скоростью  $v$  движения жидкости по каналам смесителя-реактора. Единицами измерения  $W$ , например, могут быть  $[мл/мин]$ ,  $[мм^3/с]$  и др.

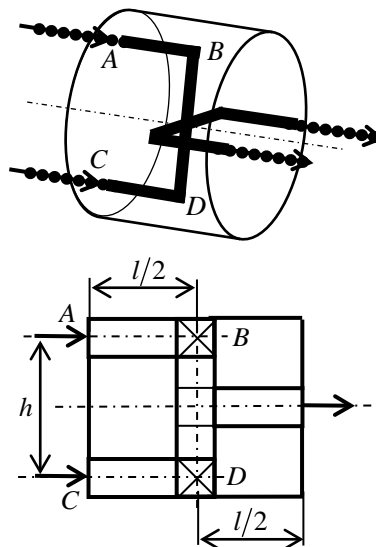
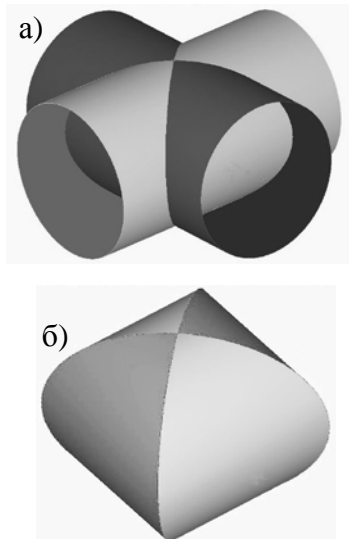


Рис.9. Пересечение двух цилиндров под прямым углом. Рис.10. К вычислению объема ячейки.

Объем жидкости, который протекает за единицу времени через сечение двух каналов ячейки, равен  $2v \cdot \pi r^2 = W$ , откуда вычисляем среднюю скорость потока жидкости по каналам смесителя-реактора

$$v = \frac{W}{2\pi r^2}.$$

Пусть нам известно минимально допустимое время сорбции  $t_{сорб.}$ . Тогда формулы для  $V_{\Sigma}$  и  $v$  позволяют вычислить требуемую длину вкладыша или число ячеек для обеспечения требуемого времени реагирования ингредиентов жидкости.

Скорость жидкости по продольным и диаметральному каналам соответственно равны  $v_l = l/t_l$ ,  $v_h = h/t_h$ . Общее время движения по каналам одной ячейки  $t_1 = t_l + t_h = (l + h)/v$ .

Суммарное время движения по каналам вкладыша  $t_{\Sigma} = n(l + h)/v = n \cdot 2\pi r^2(l + h)/W$ . Число ячеек  $n$  выбирается из условия  $t_{\Sigma} \geq t_{сорб.}$  при заданном расходе  $W$  протекания жидкости через ячеистый смеситель-реактор.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа имеет прикладной характер с целью описания и анализа устройств для приготовления многокомпонентных смесей с использованием магнитоуправляемых жидкостей. Предложены два варианта лабиринтного смесителя-реактора, предназначенные для одновременного смешивания и физико-химического реагирования жидких компонент в потоке в течение заданного времени. Даны примеры использования устройств в сорбционных технологиях эфферентной терапии. Предложены способы оценок конструктивных параметров

смесителей-реакторов для выбора наиболее эффективных решений. Испытания показали технологичность в изготовлении, простоту в использовании, а также работоспособность предложенных конструктивных схем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Такетоми С., Тикадзуми С.* Магнитные жидкости. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
2. *Данилин А.Н., Карнет Ю.Н., Семёнов Н.А., Шклярчук Ф.Н., Юмашев О.Б., Яновский Ю.Г.* Моделирование гистерезиса энергорассеяния гасителя пляски проводов ЛЭП // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №3. – С.423-433.
3. *Данилин А.Н., Семёнов Н.А., Шалашилин А.Д., Никитин С.М., Карандин В.И., Рожков А.Г.* Изучение структурно-реологических свойств лимфы и крови в процедурах детоксикации с использованием магнитоуправляемых наносорбентов // Вестник лимфологии. – 2013. – №3. – С.27-29.
4. *Яновский Ю.Г., Рожков А.Г., Карандин В.И., Данилин А.Н., Никитин С.М., Гусева М.А., Густова Т.А., Алёхин А.И., Гончаров Н.Г.* Сорбционная активность магнитоуправляемых наночастиц в биологических средах организма // Технологии живых систем. – 2012. – Т.9. – №5. – С.23-31.
5. *Семёнов Н.А., Карандин В.И., Рожков А.Г., Шалашилин А.Д., Данилин А.Н., Никитин С.М.* Исследование структурно-реологических свойств лимфы и крови в процедурах детоксикации с использованием магнитоуправляемых наносорбентов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4. – Часть 5. – С.2485-2487.
6. *Яновский Ю.Г., Данилин А.Н., Никитин С.М., Литвин Я.А., Семёнов Н.А., Рожков А.Г., Карандин В.И., Нагаев Р.М.* Новые функциональные магнитоуправляемые наносорбенты для экстракорпоральной очистки крови и лимфы от метаболитов и токсинов // III-й Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010». Сборник материалов. – Москва, 2010. – Т.3. – С.228-231.
7. Описание изобретения к патенту РФ «Лабиринтный спиральный смеситель-реактор» № 2356612, кл. В 01F 5/06, заявлено 26.10.2007 г., опубликовано 27.05.2009 г.
8. *Рожков А.Г., Карандин В.И.* Эфферентная терапия в хирургической клинике – М.: Изд-во «Миклош», 2010. – 255 с.

Поступила в редакцию 26 февраля 2015 года.

---

### Сведения об авторах:

Галимов Родион Александрович – ст.лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [rodion599@gmail.com](mailto:rodion599@gmail.com)

Данилин Александр Николаевич – д.ф.-м.н., проф., гл.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [andanilin@yandex.ru](mailto:andanilin@yandex.ru)

Карнет Юлия Николаевна – к.ф.-м.н., уч.секр., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)

Паршина Мария Сергеевна – ст.лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [marianna016@list.ru](mailto:marianna016@list.ru)

Семенов Николай Александрович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [semenov.n@iam-ras.ru](mailto:semenov.n@iam-ras.ru)

Яновский Юрий Григорьевич – д.т.н., проф., гл.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)