

УДК 621.45.04

ББК 35.51

С-92

*Схалыхов Анзаур Адамович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета Майкопского государственного технологического университета, 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, т. (8772) 570412.*

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ МЕМБРАННОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ИЗ МАСЕЛ**  
(рецензирована)

*Мембранный реактор это основной агрегат в производстве биодизеля и его математическая модель представляется тремя блоками: модель кинетики, модель гидравлики, модель вязкости. Все блоки взаимосвязаны, например, из модели кинетики получаем информацию о составе реакционной смеси, что является основой определения вязкости. Основой решения поставленной задачи является система дифференциальных уравнений формальной кинетики переэтерификации.*

*Ключевые слова: мембранный реактор, модель вязкости реакционной смеси, математическая модель гидравлики, модель кинетики, биодизель.*

*Skhalyakhov Anzaur Adamovich, Cand. of technical sciences, senior lecturer, professor of the chair of technology, machinery and equipment for food production, dean of the technological faculty of Maikop State Technological University, 385000, Republic of Adyghea, Maikop, 191 Pervomaiskaya St., tel.: (8772) 570412.*

**RESULTS OF THE MODELING OF THE FUNCTIONING OF THE MEMBRANE REACTOR FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM OILS**

*The membrane reactor is the basic unit in the production of biodiesel and its mathematical model has been presented in three blocks: a model of the kinetics, a model of the hydraulic, and a model of viscosity. All blocks are interconnected, for example, from the model of the kinetics we obtain information on the composition of the reaction mixture, which is the basis for determining the viscosity. The basis for solving this problem is the system of differential equations of formal kinetics of re-etherification.*

*Keywords: membrane reactor, a model of the viscosity of the reaction mixture, a mathematical model of hydraulic model of the kinetics of biodiesel.*

Мембранный реактор это основной агрегат в производстве биодизеля и его математическая модель представляется тремя блоками (рисунок 1): модель кинетики [5], модель гидравлики [1], модель вязкости [2]. Все блоки взаимосвязаны, например, из модели кинетики получаем информацию о составе реакционной смеси, что является основой определения вязкости. Имея информацию о вязкости, получаем оценку гидравлики и время, необходимое для модели кинетики.



Рис. 1. Схема моделирование работы мембранного реактора

Основой решения поставленной задачи является система дифференциальных уравнений формальной кинетики переэтерификации [1;3]. Ключевым параметром этой системы уравнений является время пребывания реакционной смеси в картридже [2;3].

Учитывая, что состав смеси, а, следовательно, и вязкость зависит от времени пребывания смеси в канале фильтрующего элемента, параметр вязкости смеси, на выходе из аппарата определялся по формуле [2]:

$$\mu(t, tC) := \exp \left( \frac{m\_T(t)}{m\_T(t) + m\_E(t) + m\_A(t) + m\_M(t) + m\_G(t) + m\_D(t)} \cdot \ln \left( \eta\_T(tC) \cdot \frac{m \cdot s}{kg} \right) \dots \right) \cdot \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$+ \frac{m\_E(t)}{m\_T(t) + m\_E(t) + m\_A(t) + m\_M(t) + m\_G(t) + m\_D(t)} \cdot \ln \left( \eta\_E\_var(tC) \cdot \frac{m \cdot s}{kg} \right) \dots$$

$$+ \frac{m\_A(t)}{m\_T(t) + m\_E(t) + m\_A(t) + m\_M(t) + m\_G(t) + m\_D(t)} \cdot \ln \left( \eta\_A(tC) \cdot \frac{m \cdot s}{kg} \right) \dots$$

$$+ \frac{m\_G(t)}{m\_T(t) + m\_E(t) + m\_A(t) + m\_M(t) + m\_G(t) + m\_D(t)} \cdot \ln \left( \eta\_G(tC) \cdot \frac{m \cdot s}{kg} \right) \dots$$

$$+ \frac{m\_M(t)}{m\_T(t) + m\_E(t) + m\_A(t) + m\_M(t) + m\_G(t) + m\_D(t)} \cdot \ln \left( \eta\_M\_var(tC) \cdot \frac{m \cdot s}{kg} \right) \dots$$

$$+ \frac{m\_D(t)}{m\_T(t) + m\_E(t) + m\_A(t) + m\_M(t) + m\_G(t) + m\_D(t)} \cdot \ln \left( \eta\_D\_var(tC) \cdot \frac{m \cdot s}{kg} \right) \dots$$

В этом случае расходы смеси на входе и выходе из фильтрационного канала определяют время пребывания смеси в аппарате.

$$T1 := \frac{L_{wet}}{\left( \frac{Q_L(0, m, n, r_p, R_L, R_M, \_R, \_L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu_0(T_0, A_0, tC))}{\pi \cdot R_L^2} \dots \right) + \frac{Q_L(L_{wet}, n, r_p, R_L, R_M, \_R, \_L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu_{mixT1})}{\pi \cdot R_L^2}}$$

Итерационным пересчетом добивались совпадения прогнозируемой вязкости  $\mu_{mixT1}$  и кинетической  $\mu(T1, tC)$ . Для дополнительного контроля за сходимостью итераций контролировали расчетное значение времени контакта фаз, определяемое формулой:

$$T2 := \frac{L_{wet}}{\left( \frac{Q_L(0, m, n, r_p, R_L, R_M, \_R, \_L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu_0(T_0, A_0, tC))}{\pi \cdot R_L^2} \dots \right) + \frac{Q_L(L_{wet}, n, r_p, R_L, R_M, \_R, \_L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu(T1, tC))}{\pi \cdot R_L^2}}$$

При совпадении вязкостей и времени с точностью до 0,1% итерации прекращались, и результат численного моделирования считался окончательным.

Используя полученную модель, определили влияние конструктивных параметров картриджа на выход целевого продукта. Изучалось влияние начального давления и перепада давлений на концах фильтрующих элементов при изменении числа этих элементов в картридже. Поверхность отклика модели для четырех фильтрующих элементов в картридже длиной 0,8 м представлена ниже (рисунок 2).

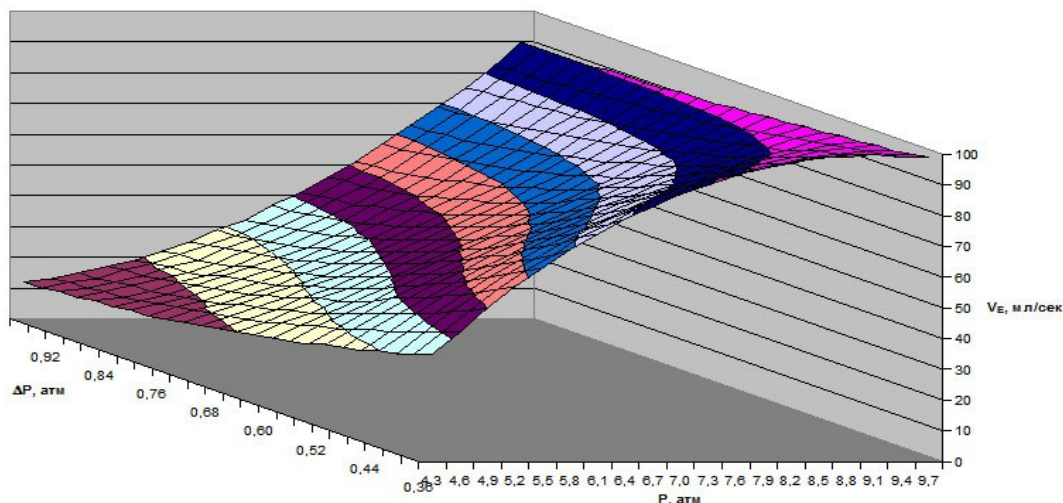


Рис. 2. Поверхность отклика модели для четырех фильтрующих элементов в картридже длиной 0,8 м

Обобщая влияние числа элементов на выход целевого продукта, получили несколько аналогичных поверхностей. Наибольший выход продукта обеспечивается при наличии пяти фильтрующих элементов в картридже. Это связано с оптимизированным соотношением между гидравлическим сопротивлением выходящего фильтрата и временем пребывания смеси в фильтрующих элементах.

Для выяснения влияния длины мембран на эти показатели были построены аналогичные поверхности отклика на различных длинах фильтрующих элементов. С увеличением длины фильтрующих элементов выход целевого продукта растет, что связано с увеличением времени пребывания смеси в картридже. Типичный вид поверхность отклика для длины пяти элементов представлен ниже (рисунок 3).

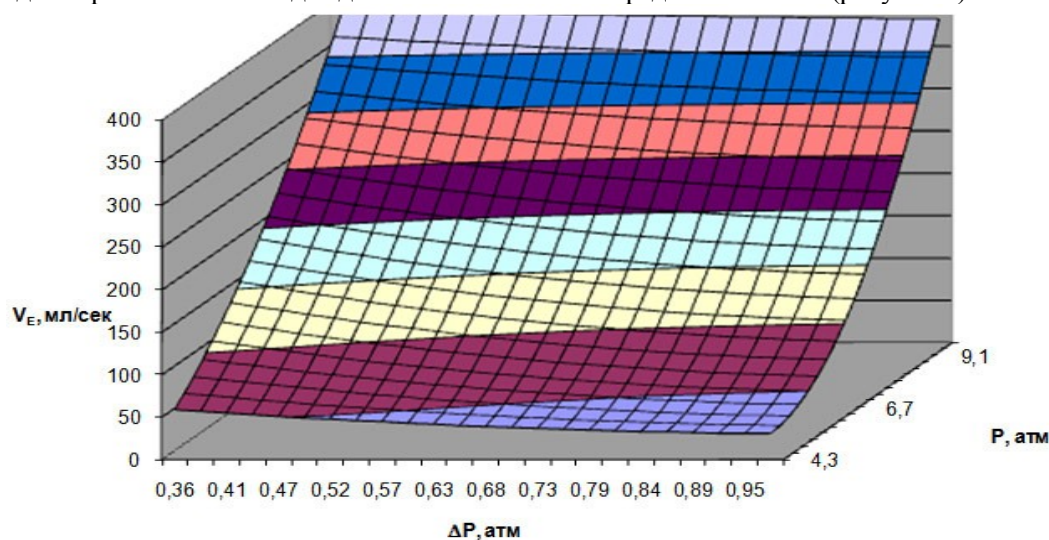


Рис. 3. Поверхность отклика для длины пяти фильтровальных элементов

Представленная поверхность отклика соответствует пяти фильтрующим элементам длиной 1,6 м. Для определения оптимального по длине числа элементов при такой длине картриджа были построены поверхности отклика при четырех, пяти, шести и семи фильтрующих элементах.

Максимальная производительность наблюдается при наличии пяти фильтрующих элементов. Для определения выявленной тенденции были промоделированы варианты картриджей с увеличением длины фильтрующих элементов.

Установлено, что с увеличением длины картриджа оптимальное число фильтрующих элементов изменяется с пяти до шести в картридже. Аналогичные данные получены для картриджа длиной 6,4 метра.

Таким образом, практический интерес представляет получение зависимости выхода целевого продукта в зависимости от длины и числа фильтрующих элементов, при максимальном давлении на входе в фильтрующий элемент и минимальном перепаде давлений на входе и выходе из фильтрующего элемента. Ниже представлены эти зависимости (рисунок 4), аппроксимированные параболическими зависимостями.

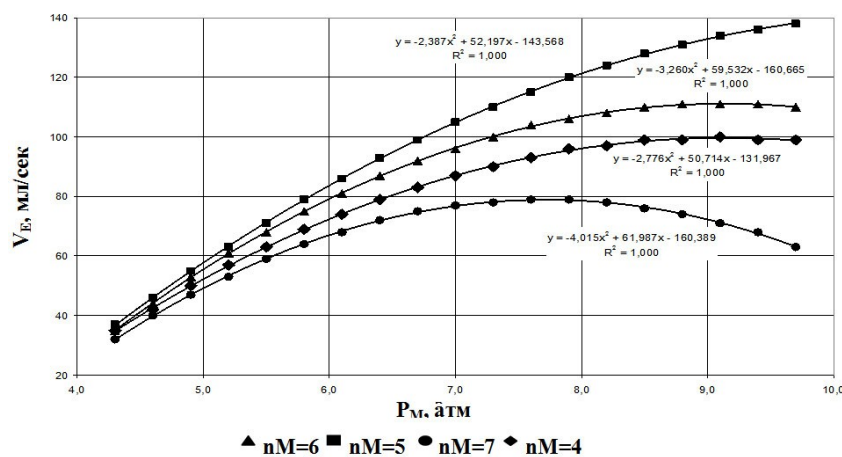
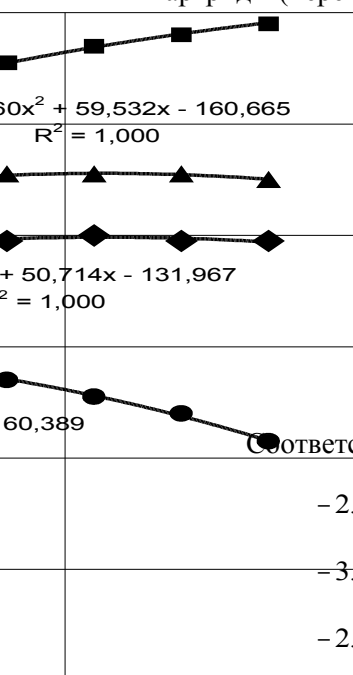


Рис. 4. Выход целевого продукта в зависимости от длины и числа фильтрующих элементов

Исследуя полученные данные на экстремальность, получили зависимость положения условного экстремума выхода целевого продукта от числа фильтрующих элементов и давления на входе в картридж (перепад давлений 0,36 атм.).



$$\frac{d}{dx}(-2.387 \cdot x^2 + 52.197 \cdot x - 143.568) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } x \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow 10.934$$

$$\frac{d}{dx}(-3.260 \cdot x^2 + 59.532 \cdot x - 160.665) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } x \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow 9.1307$$

$$\frac{d}{dx}(-2.776 \cdot x^2 + 50.714 \cdot x - 131.967) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } x \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow 9.1344$$

$$\frac{d}{dx}(-4.015 \cdot x^2 + 61.987 \cdot x - 160.389) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } x \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow 7.7194$$

Соответствующие значения выхода целевого продукта представлены ниже:

$$-2.387 \cdot x^2 + 52.197 \cdot x - 143.568 \text{ substitute, } x = 10.934 \rightarrow 141.782524228$$

$$-3.260 \cdot x^2 + 59.532 \cdot x - 160.665 \text{ substitute, } x = 9.1307 \rightarrow 111.11866748260$$

$$-2.776 \cdot x^2 + 50.714 \cdot x - 131.967 \text{ substitute, } x = 9.1344 \rightarrow 99.65311851264$$

$$-4.015 \cdot x^2 + 61.987 \cdot x - 160.389 \text{ substitute, } x = 7.7194 \rightarrow 78.86306531460$$

Увеличение длины картриджа приводит к исчезновению свойства экстремальности для исследуемых конструктивных параметров, поэтому в дальнейшем исследовали область близкую к условному экстремуму с учетом найденных особенностей. Данные, используемые для построения уравнения регрессии, представлены в таблице 1.

Уравнение регрессии, полученное по этим данным, представлено следующими значимыми параметрами, представленными в таблице коэффициентов уравнения регрессии (таблица 2), полученного в результате применения к данным численного моделирования (таблица 1) метода наименьших квадратов.

Учитывая условие целочисленности одного из параметров (число фильтрующих элементов) и ограничение конструктивной прочности элементов (не более 10 атм на входе в картридж) имеем следующие значения условного экстремума:  $L_M=6,9$  м и  $n_M=6$  шт, при этом выход целевого продукта составит 1,4 л/сек или 5 м<sup>3</sup>/ч, удельная производительность 9,68 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> ч). Если ограничиться длиной трубчатого элемента 0,8 м, то оптимальное число элементов в картридже - 5 штук при 10 атм на входе в картридж и производительность по целевому продукту составит 0,221 л/сек.

Таблица 1 - Данные для построения уравнения регрессии условного оптимума

L <sub>M</sub>	n <sub>M</sub>	P <sub>МОПТ</sub>	Линеаризованные факторы						V <sub>ЕОПТ</sub>
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>23</sub>	
0,8	4	7,72	3,2	6,18	30,88	0,64	16	59,59	79
0,8	5	9,13	4	7,31	45,67	0,64	25	83,44	100
0,8	6	9,13	4,8	7,30	54,78	0,64	36	83,37	111
0,8	7	10,93	5,6	8,75	76,54	0,64	49	119,55	141
1,6	4	9,7	6,4	15,52	38,8	2,56	16	94,09	236
1,6	5	9,7	8	15,52	48,5	2,56	25	94,09	395
1,6	6	9,7	9,6	15,52	58,2	2,56	36	94,09	383
1,6	7	9,7	11,2	15,52	67,9	2,56	49	94,09	256
4	4	9,7	16	38,8	38,8	16	16	94,09	578
4	5	9,7	20	38,8	48,5	16	25	94,09	1034
4	6	9,7	24	38,8	58,2	16	36	94,09	1061
4	7	9,7	28	38,8	67,9	16	49	94,09	735
6,4	4	9,7	25,6	62,08	38,8	40,96	16	94,09	737

6,4	5	9,7	32	62,08	48,5	40,96	25	94,09	1318
6,4	6	9,7	38,4	62,08	58,2	40,96	36	94,09	1356
6,4	7	9,7	44,8	62,08	67,9	40,96	49	94,09	944

Важным моментом численного моделирования является отображение данных. В этом случае рассматривалось влияние таких конструктивных параметров, как давление внутри канала на входе, перепад давлений на входе и выходе из фильтрационного канала, число фильтрующих элементов и длина картриджа. В качестве функции отклика использовался безразмерный критерий выхода продукта, представляющий собой отношение производительности моделируемой установки к производительности модуля такой же конфигурации, но при увеличении времени контакта фаз до бесконечности. При этом увеличение времени контакта фаз обеспечивалось за счет удлинения картриджа и фильтрующих элементов в нем. При этом остальные моделируемые параметры оставались такими же, как и в моделируемом картридже.

Таблица 2- Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициенты	Тип	
$B_{x0}$	4306,705	Линейный
$B_{x2}$	1637,963	Линейный
$B_{x3}$	-1911,96	Линейный
$B_{x1x2}$	14,27548	Парный
$B_{x13}$	35,14639	Парный
$B_{x2x3}$	16,99561	Парный
$B_{x1x1}$	-31,6485	Квадратичный
$B_{x2x2}$	-165,601	Квадратичный
$B_{x3x3}$	98,16602	Квадратичный

Из представленного рисунка 5 видно, что предельный выход  $VM(0)$  существенно зависит от начального давления (33.888 для  $P=4$  атм.; 74.957 для  $P=7$  атм.; 116.153 для  $P=10$  атм.).

В результате численного моделирования установили, что этот показатель не зависит от перепада давления ( $\Delta P$ ), что позволяет уменьшить число моделируемых параметров, оставив начальное давление и число фильтрующих элементов ( $nM$ ) в картридже (рисунок 6).

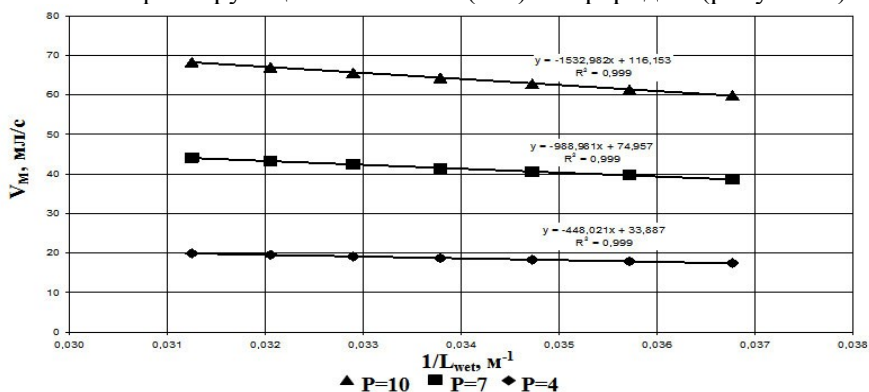


Рис. 5. Аппроксимация предельного выхода по обратной длине для одного керамического элемента в зависимости от начального давления

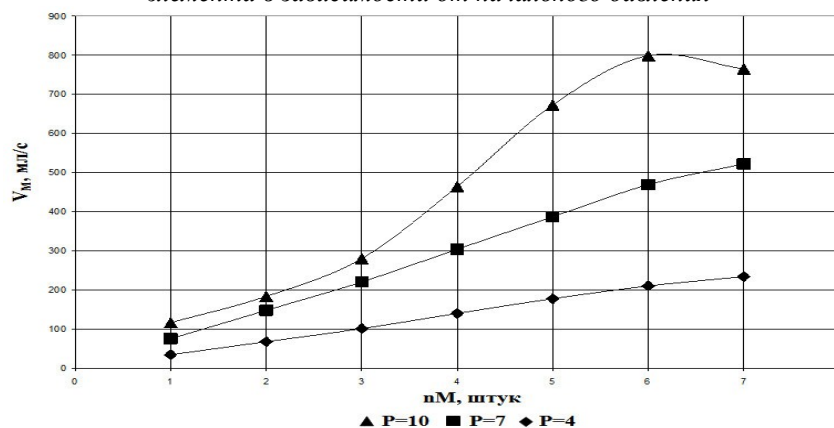


Рис. 6. Влияние числа фильтрующих элементов на предельную производительность

Как видно из представленного рисунка с ростом давления предельная производительность проходит через максимум, что связано с ростом гидродинамического сопротивления потока фильтрата в картридже при большом числе фильтрующих элементов. Для большей наглядности экстремальная область представлена в виде сплайна на рисунке 7.

Проведенные расчеты позволили создать многопараметрическую модель картриджа биодизеля[3] от набора критериев:

$$A_{VL} := 2 \cdot n \cdot \frac{R_L}{R^2} \cdot 800 \text{ mm} \cdot nL \quad \phi := \frac{n \cdot R_M^2}{R^2}$$

$$K_m := \frac{n \cdot \pi \cdot R_L^4 \cdot \frac{P_{HM} - P_{KM}}{L_{wet}}}{\left( Q_L(0, m, n, r_p, R_L, R_M, R, L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu_0(T_0, A_0, tC)) \right) \cdot (8 \cdot \mu_0(T_0, A_0, tC))}$$

$$K_f := \frac{\pi \cdot n \cdot R_L^4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot \left( \frac{P_{HM} + P_{KM}}{2} - \frac{P_{HF} + P_{KF}}{2} \right)}{\left( Q_S(L_{wet}, n, r_p, R_L, R_M, R, L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu(T, tC)) - Q_S(0, m, n, r_p, R_L, R_M, R, L, L_{wet}, P_{HM}, P_{KM}, P_{HF}, P_{KF}, \mu_0(T_0, A_0, tC)) \right) \cdot 2 \mu(T, tC)}$$

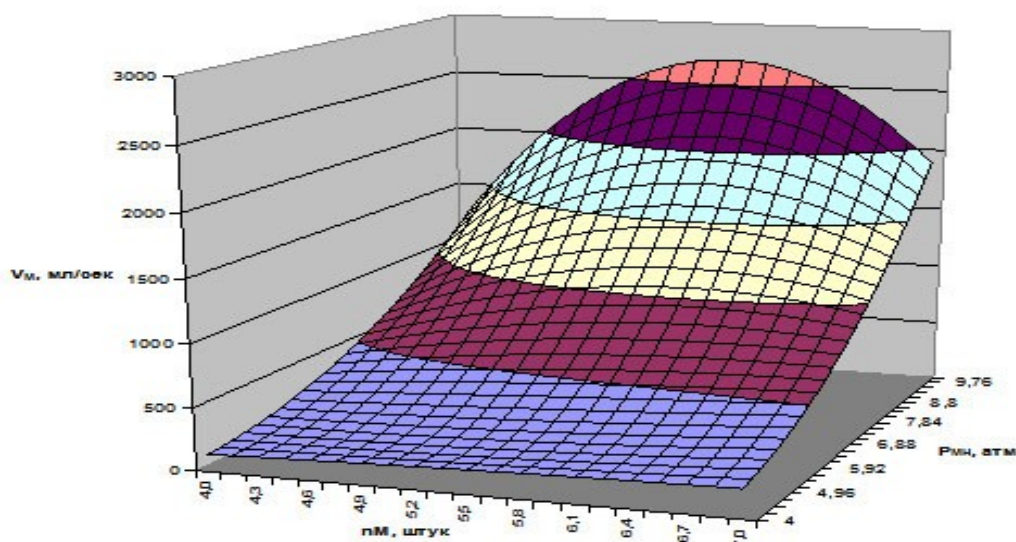


Рис. 7. Зависимость предельной производительности от числа фильтрующих элементов в картридже и давления на входе в фильтрующие элементы картриджа

В работе использовалась мультипликативная модель[3], связывающая эти критерии с относительным выходом целевого продукта:

$$\frac{V_E}{V_M} = b \cdot \phi(kM, xL)^{a_1} \cdot A_{\sqrt{}}(kM, xL)^{a_2} \cdot K_{m10\_9}(kM, xL)^{a_3} \cdot K_{f10\_9}(kM, xL)^{a_4}$$

В результате применения нелинейного метода наименьших квадратов были рассчитаны значения параметров входящих в это уравнение:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ b \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} -1.25380780484799930 \\ 0.95595513847831690 \\ -0.14280182108868930 \\ 0.07047258225083361 \\ 0.00065686886718394 \end{pmatrix}$$

Эти значения использовались для построения зависимости модели от относительного выхода продукта.

Данные, представленные на рисунке 8, показывают линейную зависимость между мультипликативной моделью и относительным выходом продукта, а, следовательно, набор предложенных критериев полностью характеризует этот показатель.

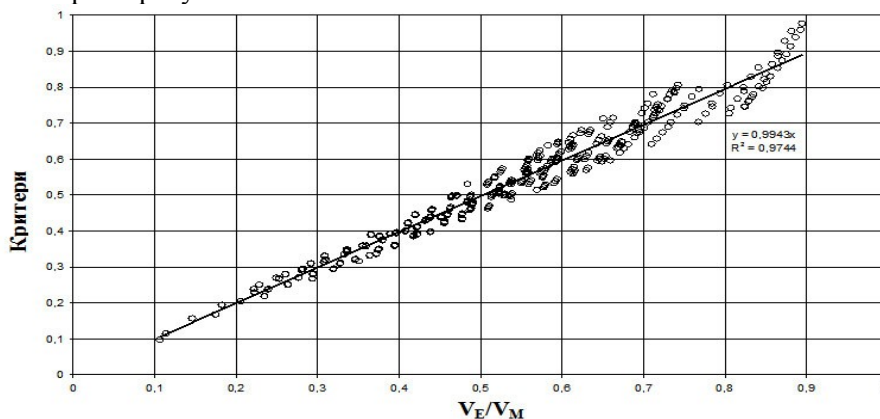


Рис. 8. Соответствие мультипликативного уравнения относительному выходу продукта

## ВЫВОД

Получены зависимости и данные по рациональным конструктивным параметрам мембранного реактора для производства биотоплива.

## Литература:

1. Схаляхов А.А. Математическая модель гидравлики мембранного реактора в линии производства биодизеля // Новые технологии. 2009. № 3.
2. Схаляхов А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Вязкость компонентов реакционной смеси при производстве биодизельного топлива из растительных масел // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2009. № 1. С. 113-115.
3. Схаляхов А.А., Блягоз Х.Р., Кошевой Е.П. Производство биотоплива из масел и жиров: монография / Федер. агентство по образованию, ГОУ ВПО «МГТУ». Майкоп: МГТУ, 2008. 132 с. Библиогр.: с. 110-131 (331 назв.).
4. Effect of Membrane Pore Size on the Performance of a Membrane Reactor for Biodiesel Production *Ind. Eng. Chem. Res.* 46, 2007, 52-58
5. Схаляхов А.А Математическое моделирование кинетики и свойств реакционной смеси при производстве биодизельного топлива из масел // Новые технологии. 2009. № 3.