Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-4-32-42 Обзорная статья/Review article
УДК 621.454 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Перспективы методов вычислительной гидродинамики при исследовании мембранных процессов

Андрей И. Ключников [1] kaivanov@mail.ru 0000-0002-5306-0328
Виталий Ю. Овсянников [1] eows2003@mail.ru 0000-0001-9388-6303
Дина В. Ключникова [1] dina.key@mail.ru
Артем М. Давыдов [2] davydov.am@rea.ru 0000-0001-5308-4752

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, пер. Стремянный, 36, г. Москва, 117997, Россия

Аннотация. При математическом моделировании мембранных процессов изучение структурных особенностей используемых мембран и существенная ограниченность информации при формальном описании их разделительных свойств привели к разработке физических моделей, учитывающих не только особенности строений реальных мембран, но и их особенностей функционирования. При составлении физических моделей мембранных процессов, невозможно объективно провести количественный учет большинства факторов из-за их большого многообразия и изменчивости, что далеко отдаляет математическую модель от реального процесса. Именно поэтому методы вычислительной гидродинамики надежно и эффективно выполняют расчеты для всех физических моделей и типов, включая стационарное или переходное течение, несжимаемое или сжимаемое течение (от малых дозвуковых до гиперзвуковых), моделирование ламинарных или турбулентных потоков, ньютоновских или неньютоновских жидкостей, идеального или реального газа. Была построена электронная геометрическая модель установки, осуществлен выбор геометрии сетки с различной плотностью для оптимизации времени расчетов и точности решения для конкретного случая, рассчитана кинетическая зависимость роста клеток, определены расходы подачи питательной среды во внутриволоконное и межволоконное пространства биореактора, проанализированы гидродинамические условия.

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, мембранный модуль, мембранный биореактор, концентрационная поляризация, культивирование.

Perspectives of computational fluid dynamics methods in the study of membrane processes

Andrey I. Klyuchnikov [1] kaivanov@mail.ru 0000-0002-5306-0328
Vitaly Yu. Ovsyannikov [1] eows2003@mail.ru 0000-0001-9388-6303
Dina V. Klyuchnikova [1] dina.key@mail.ru
Artem M. Davydov [2] davydov.am@rea.ru 0000-0001-5308-4752

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, 117997, Russia

Abstract. In mathematical modeling of membrane processes, the study of structural features of used membranes and the significant limitation of information in the formal description of their separation properties led to the development of physical models that take into account not only the features of structures of real membranes, but also their peculiarities of functioning. When compiling physical models of membrane processes, it is impossible to objectively quantify most of the factors due to their great diversity and variability, which distances the mathematical model from the real process. That is why methods of computational fluid dynamics reliably and efficiently perform calculations for all physical models and types, including stationary or transient flow, incompressible or compressible flow (from small subsonic to hypersonic), simulation of laminar or turbulent flows, Newtonian or non-Newtonian fluids, ideal or real gas. An electronic geometric model of the plant was built, a choice of mesh geometry with different densities was made to optimize the calculation time and solution accuracy for a particular case, the kinetic dependence of cell growth was calculated, the flow rates of feeding medium into the intra- and inter-fiber spaces of the bioreactor were determined, and the hydrodynamic conditions were analyzed.

Keywords: mathematical modeling, computational fluid dynamics, membrane module, membrane bioreactor, concentration polarization, cultivation.

Для цитирования
Ключников А.И., Овсянников В.Ю., Ключникова Д.В., Давыдов А.М. Перспективы методов вычислительной гидродинамики при исследовании мембранных процессов // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 4. С. 32–42. doi:10.20914/2310-1202-2022-4-32-42

For citation
Klyuchnikov A.I., Ovsyannikov V.Y., Klyuchnikova D.V., Davydov A.M. Perspectives of computational fluid dynamics methods in the study of membrane processes. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 32–42. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-4-32-42

© 2022, Ключников А.И. и др. / Klyuchnikov A.I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

При математическом моделировании мембранных процессов изучение структурных особенностей используемых мембран и существенная ограниченность информации при формальном описании их разделительных свойств привели к разработке физических моделей, учитывающих не только особенности строений реальных мембран, но и их особенностей функционирования.

Любая физическая модель мембранного процесса, ввиду его сложности, не отражает всех сторон явления (вследствие хотя бы чрезмерной громоздкости конечных аналитических выражений). Также, модель проверяют на реальных физико-химических объектах (мембрана и культуральная жидкость), возмущаемых налагаемой разностью химического потенциала (градиент давления и концентрации по обе стороны мембраны), т. е. система принципиально неравновесна и, в лучшем случае, стационарна.

Особенности реализации физических моделей на конкретных технологических жидкостях весьма разнообразны, что часто приводит к достаточно неожиданным результатам и, поэтому, они находятся в центре внимания многих исследователей.

При составлении физических моделей мембранных процессов, невозможно объективно провести количественный учет большинства факторов из-за их большого многообразия и изменчивости, что далеко отдаляет математическую модель от реального процесса.

Именно поэтому методы вычислительной гидродинамики надежно и эффективно выполняют расчеты для всех физических моделей и типов, включая стационарное или переходное течение, несжимаемое или сжимаемое течение (от малых дозвуковых до гиперзвуковых), моделирование ламинарных или турбулентных потоков, ньютоновских или неньютоновских жидкостей, идеального или реального газа.

На данный момент в мире существует ряд универсальных коммерческих программных продуктов для решения задач вычислительной гидродинамики. Среди ведущих зарубежных коммерческих пакетов можно выделить такие, как «ANSYS FLUENT» и «ANSYS CFX» корпорации ANSYS Inc, «STAR-CD/STAR-CCM+» компании CD-adapco Group, позволяющие проводить моделирование широкого класса физических процессов в научных и инженерных областях. Существуют и отечественные универсальные коммерческие пакеты: Flow Vision компании ТЕСИС, Gas Dynamics Tool компании GDT Software Group.

В основе данных методов находится комплекс программ, подходящих для проектирования, расчетов и решения проблем, связанных с описанием потоков жидкости внутри мембранного модуля.

Для полноценного изучения сложных физических явлений, в особенности одновременного протекания мембранного и биотехнологического процессов, необходимо проведение на практике большого количества дорогостоящих экспериментов, чего можно избежать благодаря моделированию с помощью методов CFD [1–6].

Известно, что образование на поверхности мембран гелевого слоя, в котором концентрация растворенного вещества больше, чем в основном объеме раствора, носит название концентрационной поляризации. Отрицательное воздействие данного явления на мембранные процессы разделения и концентрирования вызвано следующими аспектами:

- уменьшается перепад давлений над и под мембраной, т. к. растет осмотическое давление исходной жидкости, сопровождающееся уменьшением удельной проницаемости и избирательной задерживающей способностью мембран;
- сокращается эксплуатационный период использования мембран, определяющий, в конечном итоге, стоимость мембранного процесса.

Для оценки уровня концентрационной поляризации на поверхности мембран, выяснения характера и механизма гелеобразования также могут быть использованы методы CFD [7]. Кроме того, можно посчитать крутящие моменты, силу механического сдвига и влияние вязкости жидкости на гидродинамику потоков через мембрану. Например, в работе [8] с помощью методов CFD изучен эффект влияния геометрической формы микроопор мембран на гидродинамику потоков культуральной жидкости. В работе [9] методами CFD авторы исследуют области мембраны, которые наиболее склонны к гелеобразованию. В исследовании [10] авторы на основании полученной CFD-картины процессов и явлений прогнозируют механизм оседания частиц на мембранную поверхность мембраны.

Таким образом, CFD-моделирование является одним из перспективных инструментов исследования и оптимизации мембранных процессов, протекающих с участием жидких и газовых потоков в пищевом, химическом и биотехнологическом производствах [11].

Следует отметить, что, несмотря на очевидные преимущества CFD-программного комплекса, все же не стоит пренебрегать экспериментальной проверкой результатов моделирования для более точной оценки адекватности математической модели.

Методы

Рассмотрим основные принципы, заложенные в математическое моделирование с помощью методов CFD.

Решатель «ANSYS FLUENT» основан на методе конечных объемов, при этом: область течения разделяется на конечное множество контрольных объемов; в этом множестве контрольных объемов решаются уравнения сохранения массы, импульса, энергии и т. д.; уравнения в частных производных дискретизируется в систему алгебраических уравнений; затем производиться численное решение этих алгебраических уравнений в расчетной области.

Приведем конкретный пример, основанный на изучении работ [12–15].

Уравнения для расчёта гидродинамических условий внутри полых волокон мембранного биореактора. Основные уравнения, используемые для описания потоков, являются уравнение сохранения массы и импульса, которые для нестационарных условий имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho\frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho\frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho\frac{\partial v_z}{\partial z} = -J; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial \tau} + v_x\rho\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\rho\frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z\rho\frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right) + \rho g; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial \tau} + v_x\rho\frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y\rho\frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z\rho\frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}\right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial \tau} + v_x\rho\frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y\rho\frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z\rho\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right); \quad (4)$$

где ρ – плотность культуральной жидкости, кг/м^3; v_X, v_y, v_z – скорость кульуральной жидкости вдоль осей OX, OY и OZ соответственно, м/с; g – ускорение свободного падения м/с^2; J – поток культуральной среды, переходящий из внутриволоконного пространства в межволоконное через мембрану, кг/(м×с^2); P – давление, Па; μ – динамическая вязкость культуральной среды, Па×с; τ – продолжительность процесса; с; x, y, z – координаты, м.

В правой части уравнений (1)–(4) находятся параметры, описывающие изменение импульса за счёт градиента давления и за счёт сил вязкостного трения. Третий параметр в уравнении (2) описывает изменение импульса за счёт силы тяжести.

Поток культуральной жидкости, прошедший через мембрану, описывается уравнением Хагена-Пуазейля следующего вида:

$$J = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon r_n^2 S \rho \Delta P}{8\mu\delta T}; \\ 0, \text{при } x^1 x_{м1}, y^1 y_{м1}, z^1 z_{м1}. \end{cases} \quad (5)$$

где ε – количество пор на единицу поверхности мембраны, 1/м^2; r_n – средний радиус пор, м; S – площадь поверхности мембраны, м^2; δ – показатель кривизны пор; T – толщина мембраны, м.

Начальные и граничные условия для внутриволоконного пространства мембранного биореактора имеют вид:

$$\vec{v}\left(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm}\right) = 0; \quad (6)$$

$$\vec{v}\left(x_{вх}, y_{вх}, z_{вх}\right) = \vec{v}_{вх}; \quad (7)$$

$$P\left(x_{вх}, y_{вх}, z_{вх}\right) = P_{вх}; \quad (8)$$

$$\vec{v}\left(t = 0\right) = \vec{v}_{01}; \quad (9)$$

$$\rho\left(t = 0\right) = \overrightarrow{\rho_{01}}. \quad (10)$$

Граничное условие (6) определяет условие прилипания культуральной жидкости к непроницаемым стенкам биореактора, а условие (7) определяет скорость культуральной жидкости на входе во внутриволоконное пространство мембранного биореактора. Условие (8) задает давление культуральной жидкости на входе в мембранный биореактор.

Уравнения для расчета гидродинамических условий в межволоконном пространстве мембранного биореактора. Для межволоконной области основными уравнениями, по аналогии с (1)–(4), также являются уравнения сохранения массы и импульса, уравнения (11)–(14).

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial v_z}{\partial z} = I + J; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial \tau} + v_x \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \rho \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_z \rho \frac{\partial v_y}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \quad (13)$$

В правой части уравнения (11) находятся слагаемые, описывающие приток массы за счёт потока культуральной жидкости, перетекающей из внутриволоконного пространства в межволоконное, и убыль массы за счёт поглощения клетками питательных веществ, необходимых для их жизнедеятельности. Приток массы, перетекающей из внутриволоконного в межволоконное пространство, описывается выражением (5).

Количество массы, потребляемое клетками, рассчитывается:

$$I = \int_1^N q^c(t)\, dt \quad (15)$$

где N – число клеток; q_c – скорость потребления питательной среды одной клеткой.

Набор начальных и граничных условий для системы уравнений межволоконного пространства мембранного биореактора имеет следующий вид:

$$\vec{v}\left(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm}\right) = 0; \quad (16)$$

$$\vec{v}\left(x_{вх}, y_{вх}, z_{вх}\right) = \vec{v}_1; \quad (17)$$

$$P\left(x_{вх}, y_{вх}, z_{вх}\right) = P_a; \quad (18)$$

$$\vec{v}\left(t = 0\right) = \vec{v}_{02}; \quad (19)$$

$$\rho\left(t = 0\right) = \overrightarrow{\rho_{02}}. \quad (20)$$

Граничное условие (16) определяет условие прилипания культуральной жидкости к непроницаемым стенкам биореактора, а условие (17) определяет скорость среды на входе в межволоконное пространство биореактора. Выражение (18) задает давление среды на выходе из межволоконного пространства биореактора [12–15].

Результаты

В качестве мембранного биореактора для физического эксперимента авторами [12–15] использовался модуль на основе полых волокон C2008 FiberCell System. Технические характеристики биореактора указаны в таблице 1.

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial \tau} + v_x \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial \tau} + v_x \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \rho \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_z \rho \frac{\partial v_z}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \quad (14)$$

Таблица 1.
Техническая характеристика мембранного биореактора C2008 FiberCell System [12–14]

Table 1.
Technical characteristics of the membrane bioreactor C2008 FiberCell System [12–14]

Наименование параметра	Показатель
Количество полых волокон	60
Диаметр полого волокна, мкм	700
Диаметр полого волокна, мкм	1300
Толщина полого волокна, мкм	300
Длина полого волокна, мм	110
Диаметр корпуса, мм	220
Длина мембранного модуля, мм	130

Мембранный биореактор C2008 FiberCell System представлял собой картридж (рисунок 1), заполненный полыми волокнами. Волокна имели различные диаметры пор для диффузии молекул с молекулярной массой 5 кДа, 20 кДа и более.

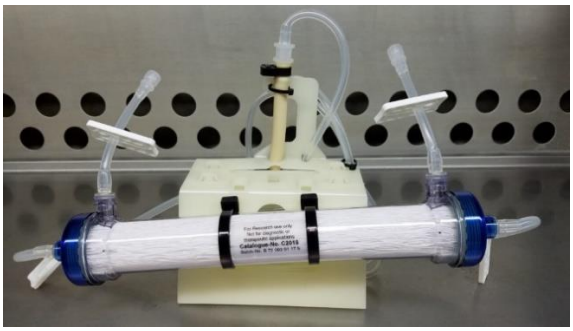


Рисунок 1. Мембранный биореактор C2008 FiberCell System

Figure 1. Membrane bioreactor Since 2008 FiberCell System

Культуральная среда прокачивалась через полые волокна и обеспечивала рост клеток в ограниченном пространстве на их поверхности. Полые волокна создавали полупроницаемый барьер с заданными свойствами между пространством, где культивировались клетки, и протекающей средой.

В процессе секретирования продукты концентрировались в малых объемах межволоконного пространства, где их концентрация могла достигать значений в 100 раз больших, чем при проведении аналогичного процесса в колбах или в роллерных бутылях.

Обсуждение

Авторами [12–14] было проведено CFD-моделирование гидродинамических условий в мембранном биореакторе на основе полых волокон при полном их заполнении клетками и с учетом рассчитанной величины коэффициента проницаемости мембраны.

На основании предложенного автором [12] ранее прямоточного режима подачи питательной среды в межволоконное пространство относительно внутриволоконного, входными являются патрубки *1* и *2* (рисунок 2), выходными *3* и *4*. Красным цветом указаны потоки питательной среды во внутриволоконном пространстве, синим цветом – потоки в межволоконном пространстве.

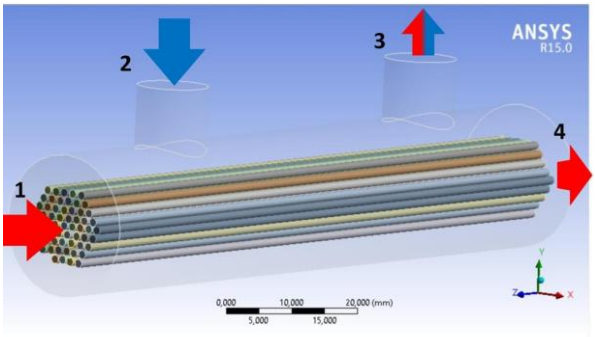


Рисунок 2. Схема движения потоков питательной среды в половолоконном мембранном биореакторе (по данным Сафарова Р. Р.) [12]

Figure 2. Scheme of the movement of nutrient medium flows in a hollow-fiber membrane bioreactor (according to R. R. Safarov) [12].

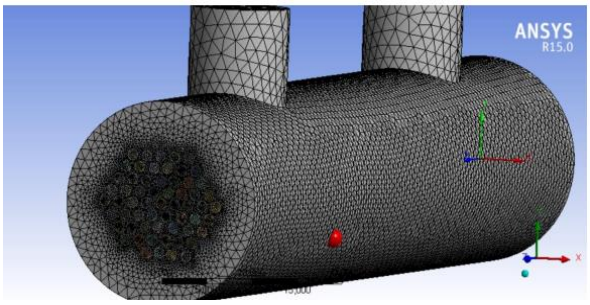


Рисунок 3. Сеточная модель половолоконного мембранного биореактора (по данным Сафарова Р. Р.) [12]

Figure 3. Grid model of a hollow-fiber membrane bioreactor (according to Safarov R. R.) [12]

Расчетная сетка биореактора с 60-ю волокнами содержала 12 млн ячеек с минимальным размером ячейки в зоне повышенной плотности сетки, равным 0,1 мм (см. рисунок 3).

В результате расчета автором [12] получено скоростное распределение движения потоков в межволоконном пространстве. Для 2-х дней культивирования гидродинамика потоков представлена на рисунке 4, анализируя который можно сделать вывод о равномерном распределении потока в большей части биореактора.

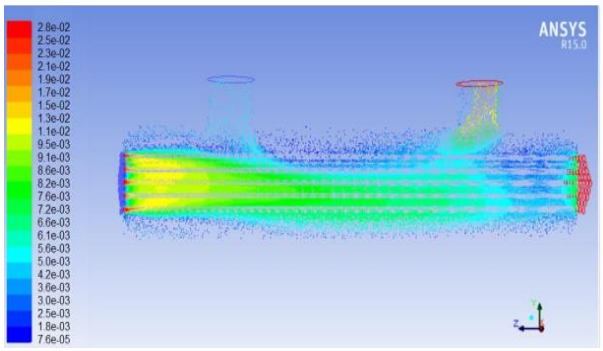


Рисунок 4. Схема распределения скоростей потоков в межволоконном пространстве половолоконного мембранного биореактора для 2-х дней культивирования (течение среды – слева направо (по данным Сафарова Р. Р.) [12]

Figure 4. Scheme of the distribution of flow rates in the interfiber space of a hollow fiber membrane bioreactor for 2 days of cultivation (the flow of the medium is from left to right (according to Safarov R. R.) [12]

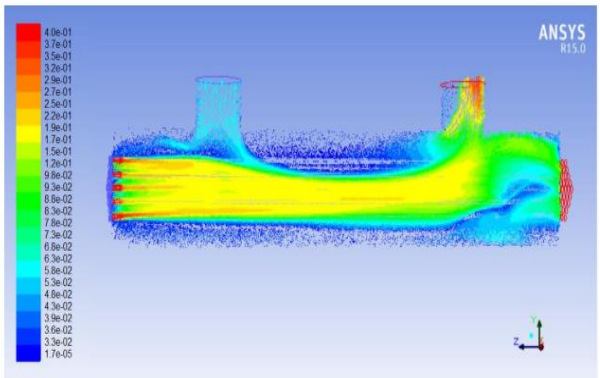


Рисунок 5. Схема распределения скоростей потоков в межволоконном пространстве половолоконного мембранного биореактора на 8-ой день культивирования направо (по данным Сафарова Р. Р.) [12]

Figure 5. Scheme of the distribution of flow rates in the interfiber space of the hollow fiber membrane bioreactor on the 8th day of cultivation to the right (according toSafarov R. R.) [12]

Визуализация гидродинамической картины для последнего этапа культивирования отражена на рисунке 5. В левой части мембранного биореактора, а также в центральной области между боковыми патрубками автором [12] наблюдались области низких скоростей. Однако, рассчитанная минимальная скорость потока в межволоконном пространстве меньше скоростей в рассматриваемых областях, поэтому автором [12] сделан вывод об отсутствии застойных зон на первых этапах культивирования.

Автором [12] отмечены области, в которых скорость имела максимальное значение (рисунок 5). Данные области относились к зоне входа питательной среды во внутриволоконное пространство биореактора, а также к зоне выхода питательной среды из межволоконного пространства (патрубок *3*, рисунок 2). По мнению Сафарова Р.Р., данные зоны не содержали поверхности с прикрепленными клетками, поэтому рассматриваемые скоростные пики не оказывали пагубного влияния на процесс [12–15].

Заключение

В рассмотренном выше примере, авторами [12–15] проведен наглядный анализ возможности использования вычислительной гидродинамики CFD для расчета гидродинамики потоков в мембранном биореакторе на основе полых волокон. Авторами [12–15], в частности, Сафаровым Р.Р. была построена электронная геометрическая модель установки, осуществлен выбор геометрии сетки с различной плотностью для оптимизации времени расчетов и точности решения для конкретного случая, рассчитана кинетическая зависимость роста клеток, определены расходы подачи питательной среды во внутриволоконное и межволоконное пространства биореактора, проанализированы гидродинамические условия.

Все вышесказанное подтверждает перспективы использования CFD-методов для моделирования мембранных процессов, осложненных культивированием клеток на поверхности мембран.

Литература

1 Dash S., Mohanty S. Separation of lanthanum and neodymium in a hollow fiber supported liquid membrane: CFD modelling and experimental validation // Minerals Engineering. V. 180. April 2022. DOI 10.1016 / j.mineng. 2022.107472.

2 Wang H. et al. CFD-DEM Study of Bridging Mechanism of Particles in Ceramic Membrane Pores under Surface Filtration Conditions // Processes Open Access. V. 10, Issue 3, March 2022. DOI 10.3390/pr 10030475.

3 Gu B. et al. Correlations for concentration polarization and pressure drop in spacer-filled RO membrane modules based on CFD simulations // Membranes Open Access. V. 11, Issue 5. May 2021. DOI 10.3390/membranes 11050338.

4 Al-Abbasi O., Bin Shams M. Dynamic CFD modelling of an industrial-scale dead-end ultrafiltration system: Full cycle and complete blockage // Journal of Water Process Engineering. V. 40. April 2021. DOI 10.1016/j.jwpe.2020.101887.

5 Zoubeik M., Salama A., Henni A. A novel antifouling technique for the crossflow filtration using porous membranes: Experimental and CFD investigations of the periodic feed pressure technique // Water Research. V. 146, P. 159–1761. December 2018. DOI 10.1016/j.watres.2018.09.027.

6 Banik A., Bandyopadhyay T.K., Biswal S.K. Computational fluid dynamics (CFD) simulation of cross-flow mode operation of membrane for downstream processing // Recent Patents on Biotechnology. V. 13, Issue 1. DOI 10.2174 / 1872208312666180924160017.

7 Yang X., Wang S., Hu B., Zhang K., He Y. Estimation of concentration polarization in a fluidized bed reactor with Pd-based membranes via CFD approach // Journal of Membrane Science. V. 581, P. 262–269. July 2019. DOI 10.1016 / j.memsci.2019.03.068.

8 Wang, Y. CFD simulation of membrane filtration zone in a submerged hollow fiber membrane bioreactor using a porous media approach / Y. Wang, Brannock Matthew, S. Cox // Jornal of membrane science. – 2010. – Vol. 363. – P. 57–66.

9 Madaeni, S.S. Investigation of cake deposition on various parts of the surface of microfiltration membrane due to fouling / SS. Madaeni, M. Rahimi, M. Abolhasani // Korean J Chem Eng. – 2010. – Vol. 27. – P. 206–213.

10 Rahimi, M. CFD and experimental studies of fouling of a microfiltration membrane / M. Rahimi, S.S. Madaenia, M. Abolhasania // Chem Eng Process. – 2009. – Vol. 48. – P. 1405–1413.

11 Платонов Д.В. и др. Сравнительный анализ CFD-пакетов SIGMAFLOW и ANSYS FLUENT на примере решения ламинарных тестовых задач // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 1(21) С. 84–94.

12 Сафаров Р.Р. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016. – 182 с. (специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»).

13 Гусева Е.В. и др. Подход к моделированию, масштабированию и оптимизации работы биореакторов на основании вычислительной гидродинамики [Текст] Е.В. Гусева, Р.Р. Сафаров, Н.В. Меньшутина // Программные продукты и системы. 2015. № 4 (112). С. 261–267.

14 Safarov R., et al. Application of CFD to model batch and membrane bioreactors // Proceedings of 21 st International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2014 Prague 17 th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction. Prague, Czech Republic, 23–27 August 2014.

15 Guseva E., Safarov R., Menshutina N. Modelling of hollow-fiber membrane bioreactor by CFD // Proceeding of 10 th European Congress of Chemical Engineering, 3 rd European Congress of Applied Biorechnology, 5 th European Process Intensification Conference. Nice, 2015. P. 1225.

References

1 Dash S., Mohanty S. Separation of lanthanum and neodymium in a hollow fiber supported liquid membrane: CFD modeling and experimental validation. Minerals Engineering. V. 180. April 2022. DOI 10.1016 / j.mineng. 2022.107472.

2 Wang H. et al. CFD-DEM Study of Bridging Mechanism of Particles in Ceramic Mem-brane Pores under Surface Filtration Conditions. Processes Open access. V. 10, Issue 3, March 2022. DOI 10.3390/pr 10030475.

3 Gu B. et al. Correlations for concentration polarization and pressure drop in spacer-filled RO mem-brane modules based on CFD simulations. Membranes Open Access. V. 11, Issue 5. May 2021. DOI 10.3390/membranes 11050338.

4 Al-Abbasi O., Bin Shams M. Dy-namic CFD modeling of an industrial-scale dead-end ultrafiltration system: Full cycle and complete blockage. Journal of Water Process Engineering. V. 40. April 2021. DOI 10.1016/j.jwpe.2020.101887.

5 Zoubeik M. et al. A novel antifouling technique for the cross-flow filtration using porous membranes: Experimental and CFD investigations of the periodic feed pressure technique. Water Research. V. 146, P. 159–1761. DOI 10.1016/j.watres.2018.09.027.

6 Banik A. et al. Computational fluid dynamics (CFD) simulation of cross-flow mode operation of membrane for downstream process-ing. Recent Patents on Biotechnology. V. 13, Issue 1. DOI 10.2174 / 1872083126661809241600 17.

7 Yang X. et al. Estimation of concentration polarization in a fluidized bed reactor with Pd-based membranes via CFD approach. Journal of Membrane Science. V. 581, P. 262–269. July 2019. DOI 10.1016 / j.memsci.2019.03.068.

8 Wang, Y. CFD simulation of mem-brane filtration zone in a submerged hollow fiber membrane bioreactor using a porous media approach / Y. Wang, Brannock Mat-thew, S. Cox. Journal of membrane science. – 2010. – Vol. 363. – P. 57–66.

9 Madaeni, S.S. Investigation of cake deposition on various parts of the surface of microfiltration membrane due to fouling / SS. Madaeni, M. Rahimi, M. Abolhasani. Korean J Chem Eng. – 2010. – Vol. 27. – P. 206–213.

10 Rahimi, M. CFD and experimental studies of fouling of a microfiltration mem-brane / M. Rahimi, S.S. Madaenia, M. Abolhasania. Chem Eng Process. – 2009. – Vol. 48. – P. 1405–1413.

11 Platonov D.V. et al. Comparative analysis of CFD packages SIGMAFLOW and ANSYS FLUENT on the example of solving laminar test problems. Bulletin of the Tomsk State University. – 2013. – No. 1 (21) P. 84–94.

12 Safarov R.R. Thesis for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2016. 182 p.

13 Guseva E.V. et al. An approach to modeling, scaling and optimizing the operation of bioreactors based on computational fluid dynamics. Software products and systems. 2015. No. 4 (112). P. 261–267.

14 Safarov R. et al. Application of CFD to model batch and membrane bioreactors. Proceedings of 21st International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2014 Prague 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction. Prague, Czech Republic, 23 – 27 August 2014.

15 Guseva E., Safarov R., Menshutina N. Modeling of hollow-fiber membrane bioreactor by CFD. Proceeding of 10th European Congress of Chemical Engineer-ing, 3rd European Congress of Applied Bio-rechnology, 5th European Process Intensification Conference. Nice, 2015. P. 1225.

Сведения об авторах

Андрей И. Ключников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaivanov@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-5306-0328

Виталий Ю. Овсянников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, eows2003@mail.ru

https://orcid.org/0000-0001-9388-6303

Дина В. Ключникова к.т.н., доцент, кафедра технологии переработки продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, dina.key@mail.ru

Артем М. Давыдов к.т.н., доцент, кафедра ресторанного бизнеса, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, пер. Стремянный, 36, г. Москва, 117997, Россия , davydov.am@rea.ru

https://orcid.org/0000-0001-5308-4752

Information about authors

Andrey I. Klyuchnikov Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Machines and Apparatuses of Food Production, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaivanov@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-5306-0328

Vitaly Yu. Ovsyannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Machines and Apparatuses of Food Production, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, eows2003@mail.ru

https://orcid.org/0000-0001-9388-6303

Dina V. Klyuchnikova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Processing Technology of Animal Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, dina.key@mail.ru

Artem M. Davydov Cand. Sci. (Engin.), assistant, Department of Restaurant Business, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, 117997, Moscow, Russia , davydov.am@rea.ru

https://orcid.org/0000-0001-5308-4752

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/06/2022	**После редакции** 12/07/2022	**Принята в печать** 22/07/2022

Received 20/06/2022	**Accepted in revised** 12/07/2022	**Accepted** 22/07/2022