

УДК 628.168:66.081.63:519.6

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280519.47.435

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ

НЕЧИТАЙЛО Н. П.¹, канд. техн. наук, доц.,
НАГОРНАЯ Е. К.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
НЕСТЕРОВА Е. В.³, канд. техн. наук, доц.,
ШАРКОВ В. В.⁴, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: nicknechitaylo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

^{2*} Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: ek_n@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

³ Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

⁴ Кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: Shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

Аннотация. *Постановка проблемы.* Загрязнённость поверхностных источников водоснабжения органическими веществами приводит к необходимости поиска новых технологий и решений в сфере очистки воды. Для очистки воды из пресных источников водоснабжения, загрязнённых органическими веществами, наибольшее предпочтение отдается ультрафильтрации. Ультрафильтрация надёжно снижает концентрацию органических загрязнений и препятствует проникновению микробиологических загрязнений в очищенную воду на физическом уровне. Одним из главных вопросов, возникающих при подборе аппаратов, является определение активной площади мембраны для обеспечения необходимого количества очищенной воды. Этот параметр выбирается из условия загрязнения поверхности мембраны и изменения ее проницаемости. *Цель статьи* - научное обоснование и разработка математической модели грязеемкости полволоконного модуля для прогнозирования процессов очистки природных вод. *Результаты.* Приведены исследования по отражающей способности и грязеемкости полволоконных мембранных модулей. В процессе исследования предложена математическая модель, позволяющая производить расчёт эксплуатационных характеристик мембранных аппаратов. *Научная новизна.* Дано научное обоснование и разработана математическая модель грязеемкости полволоконного ультрафильтрационного модуля для прогнозирования процессов очистки природных вод. При помощи модели можно определить длительность фильтроцикла, а соответственно рассчитывать себестоимость 1 м³ очищенной воды. *Практическое значение.* Результаты проведенных исследований могут быть положены в основу прикладной программы для проведения расчетов при проектировании и эксплуатации сооружений для подготовки воды различного качества.

Ключевые слова: ультрафильтрация; очистка природных вод; грязеемкость мембраны; математическое моделирование

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ ДЛЯ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ

НЕЧИТАЙЛО М. П.¹, канд. техн. наук, доц.,
НАГОРНА О. К.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
НЕСТЕРОВА О. В.³, канд. техн. наук, доц.,
ШАРКОВ В. В.⁴, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, +38 (056) 756-34-74, e-mail: nicknechitaylo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

^{2*} Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, +38 (056) 756-34-74, e-mail: ek_n@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

³ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

⁴ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, +38 (056) 756-34-74, e-mail: Shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

Анотація. Постановка проблеми. Забрудненість поверхневих джерел водопостачання органічними речовинами викликає необхідність пошуку нових технологій і рішень у сфері очищення води. Для очищення води з прісних джерел водопостачання, забруднених органічними речовинами, найбільша перевага віддається ультрафільтрації. Ультрафільтрація надійно знижує концентрацію органічних забруднень і перешкоджає проникненню мікробіологічних забруднень в очищену воду на фізичному рівні. Одне із головних питань, що виникають під час вибору апаратів, - визначення активної площі мембрани для забезпечення необхідної кількості очищеної води. Цей параметр вибирається з умови забруднення поверхні мембрани і зміни її проникності. **Мета статті** - наукове обґрунтування і розроблення математичної моделі брудоемності пологоволоконного модуля для прогнозування процесів очищення природних вод. **Результати.** Наведено дослідження щодо відбивної здатності та брудоемності пологоволоконних мембранних модулів. У процесі дослідження запропоновано математичну модель, що дозволяє здійснювати розрахунок експлуатаційних характеристик мембранних апаратів. **Наукова новизна.** Дано наукове обґрунтування і розроблено математичну модель брудоемності пологоволоконного ультрафільтраційного модуля для прогнозування процесів очищення природних вод. За допомогою моделі можна визначити тривалість фільтроциклу, а відповідно розраховувати собівартість 1 м³ очищеної води. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень можуть бути покладені в основу прикладної програми для проведення розрахунків під час проектування та експлуатації споруд для підготовки води різної якості.

Ключові слова: ультрафільтрація; очищення природних вод; брудоемність мембрани; математичне моделювання

MATHEMATICAL MODELLING OF MASS TRANSFER PROCESSES UNDER WATER ULTRAFILTRATION

NECHYTAILO M.P.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
NAHORNA O.K.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
NESTEROVA O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
SHARKOV V.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

¹ Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: nicknechitaylo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

^{2*} Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: ek_n@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

³ Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

⁴ Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: Shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

Abstract. Problem statement. Contamination of surface sources of water supply with organic substances leads to the need to find new technologies and solutions in the field of water purification. For purification of water from fresh sources of water supply polluted with organic substances, ultrafiltration is mostly preferred. Ultrafiltration reliably reduces the concentration of organic pollutants and prevents the penetration of microbiological contaminants into the purified water at the physical level. One of the main issues arising in the selection of devices is the determination of the active area of the membrane to provide the required amount of purified water. This parameter is selected from the condition of contamination of the membrane surface and changes in its permeability. **Purpose.** Scientific substantiation and development of a mathematical model of dirt-holding capacity of a hollow fiber module for predicting natural water treatment processes. **Results.** Studies on the reflectivity and dirt-holding capacity of hollow fiber membrane modules are presented. In the process of research, a mathematical model was proposed, which allows to calculate the performance characteristics of membrane units. **Scientific novelty.** A scientific substantiation is given and a mathematical model of the dirt-holding capacity of a hollow fiber ultrafiltration module has been developed to predict natural water purification processes. Using the model, you can determine the duration of filter cycle, and accordingly calculate the cost of 1 m³ of purified water. **Practical relevance.** The results of the research can be used as the basis for an application program for calculations in the design and operation of facilities for the preparation of water of different quality.

Keywords: ultrafiltration; purification of natural waters; dirt-holding capacity of membrane; mathematical modelling

Постановка проблеми. Обработка вод поверхностных источников водоснабжения для получения питьевой воды и воды технологического назначения приобретает все более актуальный характер. Сегодня вода уже перестала быть легкодоступным ресурсом, а водная промышленность представляет собой огромный по объему рынок, для удовлетворения потребностей которого и подготовки воды из различных источников водоснабжения требуются современные технологии с низкой ресурсоемкостью и высокой надежностью.

В настоящее время все более широкое распространение получают методы мембранной подготовки воды. Благодаря свойствам полупроницаемости, мембраны проницаемы для одних веществ и не проницаемы для других, что обуславливает высокую надежность метода обработки воды по сравнению с традиционными технологическими схемами [1]. Мембранные процессы обработки воды весьма требовательны к качеству входящего продукта, и есть ряд ограничений, касающихся их применения, ввиду блокировки порового пространства [2].

Механизмы, позволяющие определять изменение морфологии поверхности мембраны, актуальны как в процессе проектирования мембранных аппаратов, так и при получении химического волокна. Возможность расчета загрязнения полуволоконного мембранного аппарата и моделирования процесса осадкообразования внутри канала являются актуальными задачами.

Анализ публикаций. При ультрафильтрации воды на осаждение примесей оказывают влияние скорость движения, физические размеры мембранного канала и осаждаемой частицы, концентрации, давление, температура, вязкость, дозировка реагента, пористость среды, шероховатость и т. д. [3].

Совершенствование метода ультрафильтрации может быть достигнуто не только путем изменения конструкций, но и путем придания мембранному полотну новых свойств, а также изменения поверхностных свойств или изменения формирования пористости [4]. Для определения фактических фильтрующих характеристик при на-

несении динамического слоя на поверхность мембраны выполняют экспериментальные исследования по закупориванию пор мембран и полуволоконных каналов [5].

Вопросы математического моделирования ультрафильтрационных процессов освещены в работах [6–12].

Важным вопросом при нанесении динамического слоя и закупорки неэффективных пор является внутриволокнистая кальмотация. Наиболее полно он рассмотрен в работах [6; 13]. Однако представленные модели не учитывают сложную геометрическую структуру поры. Кроме того, важным свойством мембраны является ее грязеемкость – это тот фактор, который позволит оценить возможность применения мембран в зависимости от загрязненности источника водоснабжения.

Схематическое изображение процесса постепенного закупоривания поры ультра- и микрофильтрационных мембран приведено на рисунке 1 [6].

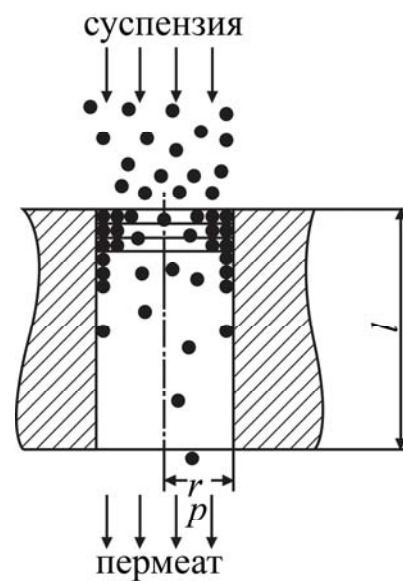


Рис. 1. Модель закупорки пор по Полякову Ю.С. [6] / Fig. 1. Pore blockage model according to Polyakov Yu.S. [6]

Осаждение частиц внутри поры может быть описано с помощью классической модели объемного фильтрования

$$\frac{\partial(\varepsilon_p c)}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial z} = -s_p \frac{\partial \Gamma}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \beta \cdot F(r) \cdot c, \quad (2)$$

где ϵ_p – пористость мембраны; c – концентрация коллоидных частиц; u – линейная скорость (объемная скорость течения суспензии через пору на единичную площадь

мембраны); $S_p = \frac{2\epsilon_{p0}}{r_p}$ – удельная поверхность пор на единицу объема мембраны;

Γ – удельная массовая концентрация осажденных частиц, отнесенная к начальной внутренней поверхности поры; β – коэффициент осаждения частиц; r_p – начальный радиус поры; ϵ_{p0} – исходная пористость мембраны.

Экспериментальная оценка длительности фильтроцикла проведена в работе [12]. Массоперенос, перепад давления и критический поток определялись на специально изготовленных плоских ультрафильтрационных мембранах. Установка работала на отделение из водной среды сывороточного бычьего альбумина. Были получены рекомендации по турбулизирующим вставкам, увеличивающие эффективность фильтрации.

В работе [14] разработана гибридная модель, объединяющая закон Дарси и нейронную сеть. Используемые экспериментальные данные взяты из очистки сточных вод нефтехимического процесса. В гибридной модели рассматриваются две стратегии физической очистки – обратный удар и обратная промывка. Кроме того, модель может предсказать поведение процесса ультрафильтрации без очистки.

Авторами [15] проведено теоретическое исследование процесса ультрафильтрации с использованием четырех теорий блокировки порового пространства – от частичной до полной. Предложена модель, сочетающая частичную блокировку поры и уплотнение осадка в примембранном слое, проверенная экспериментальным способом. На основании этого исследования предложена физическая интерпретация порогового эффекта, – ниже которого накопление осадка незначительно и выше которого фильтрация осадка

становится доминирующим механизмом обрастания.

В работе [13] ультрафильтрация применяется для удаления растворенных и коллоидных веществ из сточных вод бумажной фабрики, прошедших осветление на локальных очистных сооружениях. Исследовалось и моделировалось снижение потока пермеата в результате загрязнения мембраны. Сравнение результатов эксперимента с моделью Hermia показало достаточную сходимость.

Основные модели, использующиеся в настоящее время, – это одномерные модели, которые не учитывают геометрические параметры канала, что снижает точность расчетов. Кроме того, в существующих моделях не учитывается показатель грязеемкости половолоконного канала, что при проектировании и эксплуатации оборудования водоподготовки является важным параметром, позволяющим оценить в полной мере длительность фильтроцикла.

Цель статьи - научное обоснование и разработка математической модели грязеемкости половолоконного модуля для прогнозирования процессов очистки природных вод.

Изложение основного материала. Расчет грязеемкости ультрафильтрационной мембраны. Одним из важных прогнозных расчетов является расчет грязеемкости мембраны. Он позволяет рассчитать длительность фильтроцикла в зависимости от массы загрязнений, задерживаемых на поверхности полотна [16; 17].

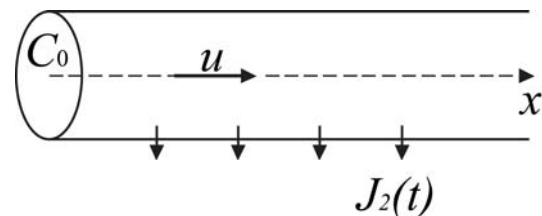


Рис. 2. Расчетная схема для определения грязеемкости ультрафильтрационной мембраны / Fig. 2. Calculation scheme for determining the soil capacity of the ultrafiltration membrane

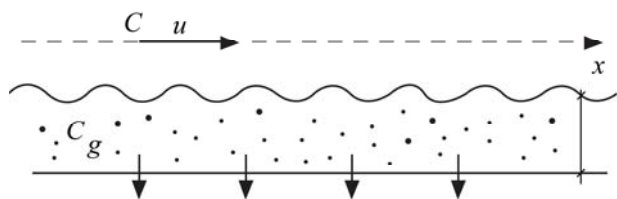


Рис. 3. Формирование подслоя геля у стенок ультрафильтрационной мембраны /

Fig. 3. The formation of the gel underlayer at the walls of the ultra-filtration membrane

Расчетная схема для определения грязеемкости ультрафильтрационной мембраны представлена на рисунке 2.

На рисунке 3 представлен процесс формирования подслоя геля у стенок ультрафильтрационной мембраны.

Порядок расчета грязеемкости ультрафильтрационной мембраны состоит в следующем:

1. Рассчитывается масса примеси, прошедшей внутрь подслоя геля за время из основного потока в трубчатой мембране [16; 17]:

$$Q_{\Phi} = J_2 \cdot dt \cdot c, \quad (3)$$

где c – концентрация примеси в трубчатой мембране (изменяется с течением времени); J_2 – величина фильтрационной скорости.

2. Рассчитывается масса примеси, прошедшей через стенку мембраны:

$$Q_E = J_2 \cdot dt \cdot c_g. \quad (4)$$

3. Определяется масса примеси, накопившаяся в слое геля:

$$m = m^n + dm, \quad (5)$$

$$dm = Q_{\Phi} - Q_E = J_2 \cdot dt \cdot (c - c_g), \quad (6)$$

где m^n – масса геля на предыдущем временном слое; dm – приращение массы за счет уменьшения фильтрации через стенки.

4. Рассчитывается новая толщина слоя геля:

$$\delta = \frac{m}{\rho_g \cdot S}, \quad (7)$$

где S – единичная площадь мембраны.

5. Рассчитывается концентрация геля на новом временном слое:

$$c_g = \frac{m}{\delta \cdot S}. \quad (8)$$

Рассчитывается новая площадь фильтрации F , которая изменяется в соответствии с зависимостью [16]. Для расчета используется метод Эйлера:

$$\frac{dF}{dt} = -a \cdot J_2 \cdot c_g \cdot F, \quad (9)$$

где F – суммарная площадь сечения свободных пор мембраны в расчете на единицу мембранной поверхности; J_2 – величина фильтрационной скорости; a – константа блокирования; c_g – концентрация гелеобразования.

6. Рассчитывается новая скорость фильтрации в соответствии с зависимостью:

$$J_2 = C \cdot F_2, \quad (10)$$

где $C = \frac{J_0}{F_0}$, J_0 – начальная скорость фильтрации; F_0 – начальная площадь фильтрации.

7. Численно решается конвективно-диффузионное уравнение переноса примеси в трубчатой мембране:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - Q_{\Phi}, \quad (11)$$

где C – концентрация примеси в потоке; u – скорость потока; μ – коэффициент диффузии; Q_{Φ} – масса примеси, профильтрованная через стенки мембраны.

8. Расчет выполняется снова, если в расчетных ячейках возле стенки мембраны масса адсорбированного загрязнителя соответствует той его массе, которую можно «разместить» в разностной ячейке заданного размера. В этом случае такая ячейка принимается в качестве элемента «новой» стенки, которая уже не фильтрует воду. Если это происходит, изменяется форма расчетной области, т. е. форма области, занятой потоком внутри ультрафильтрационной мембраны, поскольку на ее стенках образуются накопления, не пропускающие воду. И расчет повторяется с учетом новой геометрической формы расчетной области.

Моделирование процесса закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны. Построена математическая модель процесса закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны, расчетная схема которой представлена на рисунке 4.

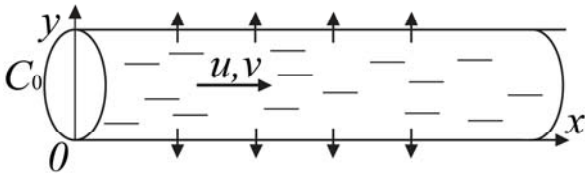


Рис. 4. Расчетная схема процесса закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны / Fig. 4. The design scheme of the capillary clogging process of the ultrafiltration membrane

Для моделирования применена двухмерная модель массопереноса и гидродинамики, позволяющая учитывать изменения внутренних геометрических параметров мембраны, поскольку в процессе ее эксплуатации на поверхности будет происходить отложение загрязнений, приводящее к кальмотации пор.

Ультрафильтрационная мембрана рассматривается как единое «тело», т. е. при расчетах используется усредненное значение скорости потока внутри ультрафильтрационной мембраны. При построении модели будет учитываться, что через боковые стенки осуществляется движение воды (это показано на рисунке 4 стрелками). Моделирующими уравнениями являются уравнения (3) и (4). При моделировании учитывается, что на боковых стенках мембраны происходит процесс сорбции примеси по зависимости (12).

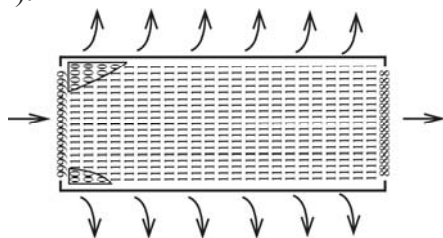


Рис. 5. Зона закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны для момента времени $t = 3,5$ мин / Fig. 5. Capillary blocking zone of the ultrafiltration membrane for a point in time $t = 3,5$ min

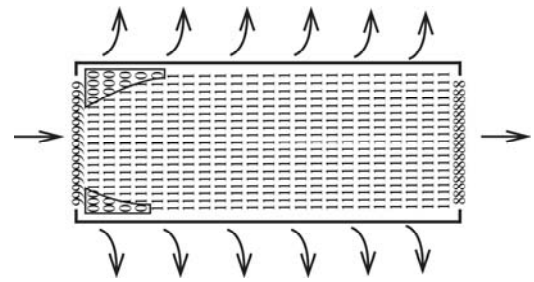


Рис. 6. Зона закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны для момента времени $t = 8,4$ мин / Fig. 6. Capillary blocking zone of the ultrafiltration membrane for a point in time $t = 8,4$ min

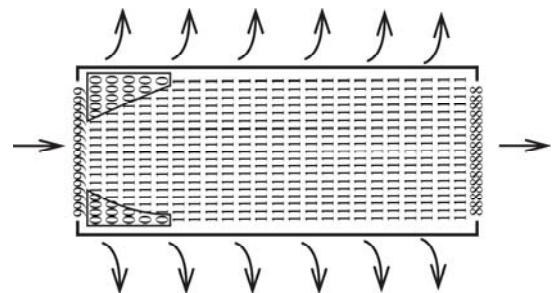


Рис. 7. Зона закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны для момента времени $t = 14,2$ мин / Fig. 7. Capillary blocking zone of the ultrafiltration membrane for a point in time $t = 14,2$ min

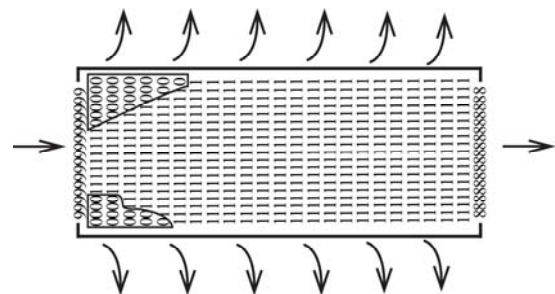


Рис. 8. Зона закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны для момента времени $t = 16,5$ мин / Fig. 8. Capillary blocking zone of the ultrafiltration membrane for a point in time $t = 16,5$ min

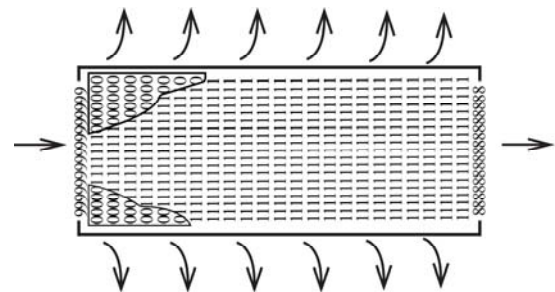


Рис. 9. Зона закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны для момента времени $t = 23$ мин / Fig. 9. Capillary blocking zone of the ultrafiltration membrane for a point in time $t = 23$ min

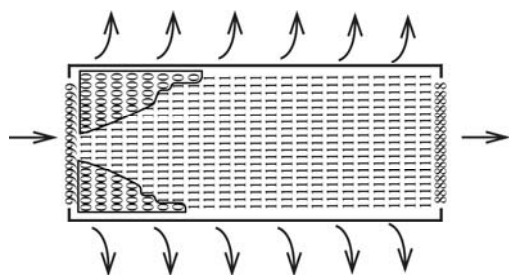


Рис. 10. Зона закупоривання капилляра ультра-фільтраційної мембрани для моменту часу $t = 28$ мин / Fig. 10. Capillary blocking zone of the ultra-filtration membrane for a point in time $t = 28$ min

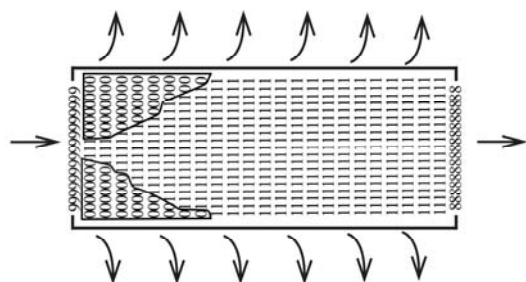


Рис. 11. Зона закупоривання капилляра ультра-фільтраційної мембрани для моменту часу $t = 31$ мин / Fig. 11. Capillary blocking zone of the ultra-filtration membrane for a point in time $t = 31$ min

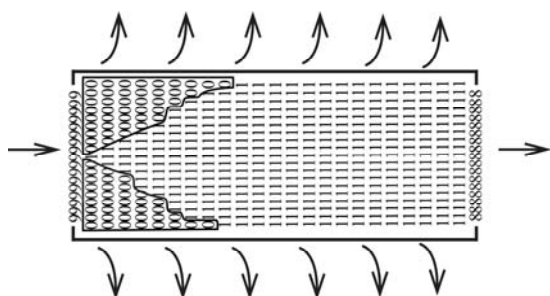


Рис. 12. Зона закупоривання капилляра ультра-фільтраційної мембрани для моменту часу $t = 33$ мин / Fig. 12. Capillary blocking zone of the ultra-filtration membrane for a point in time $t = 33$ min

Результаты моделирования процесса закупоривания ультрафильтрационной мембраны. На рисунках 5–12 представлены результаты моделирования процесса закупоривания ультрафильтрационной мембраны. Расчет выполнялся в безразмерном виде, но время на рисунках указано в размерном виде для лучшего понимания физики процесса.

Для создания геометрической формы капилляра ультрафильтрационной мембраны в численной модели выбран метод маркирования расчетной области [18]. Процесс

осаждения примеси на стенках капилляра ультрафильтрационной мембраны моделируется появлением дополнительных «0», т. е. накопление цифры «0» показывает увеличение осадка на стенках мембраны.

На рисунках 5–12 процесс закупоривания капилляра ультрафильтрационной мембраны показан во времени на протяжении фильтроцикла. Из приведенных расчетов видно, что за 33 минуты работы ультрафильтрационной мембраны происходит полная ее кальмотация и остановка процесса очистки.

Выводы. Разработанная 2-D модель закупоривания канала ультрафильтрационной мембраны позволяет оценить длительность фильтроцикла и изменение удельного расхода воды, проходящей через мембрану в течение фильтроцикла. Математическая модель прогнозирует работу ультрафильтрационной установки при реальной работе на объектах систем водоснабжения с подачей воды из поверхностных источников, имеющих высокую цветность и мутность.

Проведенные исследования позволили обосновать и оценить применимость ультрафильтрационной технологии для очистки природных вод с высокой степенью загрязненности.

Дано научное обоснование и разработана 2-D математическая модель грязеемкости половолоконного ультрафильтрационного модуля, для прогнозирования процессов очистки природных вод. При помощи модели можно определить длительность фильтроцикла, а соответственно рассчитывать себестоимость 1 м^3 очищенной воды. Данная модель позволяет определить необходимость предочистки перед ультрафильтрационными установками – проведение грубой фильтрации или отстаивания, что оказывает непосредственное влияние на стоимость очистки. Таким образом, полученная модель имеет не только научное, но и практическое значение, и может служить инструментом предварительного моделирования при проектировании и эксплуатации станций водоподготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Futselaar H. Ultrafiltration technology for potable, process and waste water treatment / H. Futselaar, H. Schonewille and van H. Dalfsen // Lecture presented at the conference PERMEA 2003. – Tatranské Matliare, Slovakia. – September 7–11, 2003. – Pp. 15–20.
2. Van Den Berg G.B. Flux Decline in Ultrafiltration Processes / G.B. Van Den Berg, C. A. Smolders // Desalination. – 1990. – Vol. 77. – Pp. 101–133.
3. Беляев Н. Н. Численное моделирование закупоривания поры мембраны при ультрафильтрации. / Н. Н. Беляев, Н. П. Нечитайло // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : матер. 73 межд. наук.-практ. конф. (Днепропетровск, 23–24 мая 2013 г.). – Днепропетровск, 2013. – С. 220–221.
4. Нечитайло Н. П. Теоретическое обоснование применения динамических ультрафильтрационных мембран для целей обработки вод из поверхностных источников водоснабжения / Н. П. Нечитайло // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2014. – Вып. 76. – С. 192 – 196.
5. Agbangla G. C. Experimental investigation of pore clogging by microparticles: Evidence for a critical flux density of particle yielding arches and deposits / G. C. Agbangla, É. Climent, P. Bacchin // Separation and Purification Technology. – 13 November, 2012. – Vol. 101. – Pp. 42–48.
6. Неравномерное осаждение частиц на внешней и внутренней поверхности полупроницаемой мембраны : дис. док. физ.-мат. наук : 05.17.08 / Поляков Ю. С. – Моск. гос. унив. инж. экологии. – Москва, 2007. – 206 с.
7. Поляков Ю. С. Неравномерное осаждение частиц внутри пор полупроницаемой мембраны / Ю. С. Поляков // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Том 42, № 1. – С. 80–87.
8. Поляков Ю. С. Оценка влияния эксплуатационных параметров и мембранных характеристик на динамику проницаемости и селективности ультра- и микрофильтрационных мембран с помощью объемно-фильтрационной модели / Ю. С. Поляков // Теоретические основы химической технологии. – 2009. – Том 43, № 6. – С. 685–694.
9. Bowen W. R. Theoretical descriptions of membrane filtration of colloids and fine particles: an assessment and review / W. R. Bowen, F. Jenner // Advances in Colloid and Interface Science. – 1995. – Vol. 56. – Pp. 141–200. – Режим доступа : [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(94\)00232-2](https://doi.org/10.1016/0001-8686(94)00232-2)
10. Delgado S. Modelling hollow-fibre ultrafiltration of biologically treated wastewater with and without gas sparging / S. Delgado, F. Diaz, L. Vera, R. Diaz, S. Elmaleh // Journal of Membrane Science. – 2004. – Vol. 228, № 1. – Pp. 55–63. – Available to: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.09.011>
11. Song L. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modeling of membrane fouling / L. Song // Journal of Membrane Science. – 1998. – Vol. 139. – Pp. 183–200. – Available to: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(97\)00263-9](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(97)00263-9)
12. Sreedhar N. Mass transfer analysis of ultrafiltration using spacers based on triply periodic minimal surfaces: Effects of spacer design, directionality and voidage / N. Sreedhar, N. Thomas, O. Al-Ketan, R. Rowshan, H.A. Arafat // Journal of Membrane Science. – September 2018. – Vol. 561. – Pp. 89–98. – Available to: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.028>
13. Sousa M. R. S. Modelling approach to an ultrafiltration process for the removal of dissolved and colloidal substances from treated wastewater for reuse in recycled paper manufacturing / M. R. S. Sousa, J. Lora-Garcia, M.-F. López-Pérez // Journal of Water Process Engineering. – 21 February 2018. – Vol. 21. – Pp. 96–106. – Available to: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.017>
14. Díaz V. H. G. Dynamic hybrid model for ultrafiltration membrane processes / V. H. G. Díaz, O. A. Prado-Rubio, M. J. Willis, M. V. Stosch // Computer Aided Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 40. – Pp. 193–198. – Available to: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50034-9>
15. Kirschner A. Y. Fouling mechanisms in constant flux crossflow ultrafiltration / A. Y. Kirschner, Y. H. Cheng, D. R. Paul, R. W. Field, B. D. Freeman // Journal of Membrane Science. – 15 March 2019. – Vol. 574. – Pp. 65–75. – Available to: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.001>
16. Семенов А. Г. Математическое описание процесса ультрафильтрации с учетом гелеобразования на поверхности мембраны / А. Г. Семенов, Б. А. Лобасенко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 8. – С. 15–17.
17. Семенов А. Г. Численный анализ модели процесса гелеобразования при ультрафильтрации на плоской мембране / А. Г. Семенов, Ю. Н. Захаров, Р. Б. Лобасенко // Технология и техника пищевых производств. – Кемерово, 2003. – С. 164–167.
18. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде : монография [М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев]. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.

REFERENCES

1. Futselaar H., Schonewille H. and van Dalfsen H. Ultrafiltration technology for potable, process and waste water treatment. Lecture presented at the conference PERMEA, Tatranské Matliare, Slovakia, 2003, September 7–11.

2. Van Den Berg G. B. and Smolders C. A. Flux Decline in Ultrafiltration Processes. *Desalination*, 1990, vol. 77, pp. 101–133.
3. Belyaev N.N. and Nechitaylo N.P. *Chislennoe modelirovanie zakuporivaniya poriy membranyi pri ultrafiltratsii*. [Numerical simulation of membrane pore clogging with ultrafiltration]. *Problemy i perspektivy razvitiya zhelezodorozhnogo transporta : 73 mezhd. nauk.-prakt. konf., 23.05-24.05.2013 g.*: [Problems and prospects of development of railway transport : materials 73 between. science.-practical. conf. 23.05-24.05.2013]. Dnepropetrovsk, 2013, pp. 220–221. (in Russian).
4. Nechitaylo N.P. *Teoreticheskoe obosnovanie primeneniya dinamicheskikh ultrafiltratsionnykh membrann dlya tseley obrabotki vod iz poverhnostnykh istochnikov vodosnabzheniya*. [Theoretical substantiation of the use of dynamic ultrafiltration membranes for the treatment of water from surface water sources]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, engineering]. Dnepropetrovsk, 2014. vol. 76, pp. 192–196. (in Russian).
5. Agbangla G.C., Climent É. and Bacchin P. Experimental investigation of pore clogging by microparticles: Evidence for a critical flux density of particle yielding arches and deposits. *Separation and Purification Technology*, 2012, 13 November, vol. 101, pp. 42–48.
6. Polyakov Yu.S. *Neravnomernoe osazhdenie chastits na vneshney i vnutrenney poverhnosti polupronitsaemoy membranyi: diss. dok. fiz.-mat. nauk: 05.17.08* [Uneven deposition of particles on the outer and inner surface of the semipermeable membrane: dis. doc physical mat Sciences: 05.17.08]. Moscow, 2007, 206 p. (in Russian).
7. Polyakov Yu.S. *Neravnomernoe osazhdenie chastits vnutri por polupronitsaemoy membrany. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii* [Uneven sedimentation of particles inside the pores of a semipermeable membrane. Theoretical foundations of chemical technology]. 2008, iss. 42, vol. 1, pp. 80–87. (in Russian).
8. Polyakov Yu.S. *Otsenka vliyaniya ekspluatatsionnykh parametrov i membrannykh karakteristik na dinamiku pronitsaemosti i selektivnosti ultra- i mikrofiltratsionnykh membran s pomoschyu ob'emno-filtratsionnoy modeli* [Evaluation of the influence of operational parameters and membrane characteristics on the dynamics of permeability and selectivity of ultra- and microfiltration membranes using a volume filtration model]. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology]. 2009, iss. 43, vol. 6, pp. 685–694. (in Russian).
9. Bowen W.R. and Jenner F. Theoretical descriptions of membrane filtration of colloids and fine particles: an assessment and review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 1995, vol. 56, pp. 141–200.
10. Delgado S., Diaz F., Vera L., Diaz R. and Elmaleh S. Modelling hollow-fibre ltrafiltration of biologically treated wastewater with and without gas sparging. *Journal of Membrane Science*. 2004, iss. 228, vol. 1, pp. 55–63.
11. Song L. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modeling of membrane fouling. *Journal of Membrane Science*. 1998, vol. 139, pp. 183–200.
12. Sreedhar N., Thomas N., Al-Ketan O., Rowshan R. and Arafat H.A. Mass transfer analysis of ultrafiltration using spacers based on triply periodic minimal surfaces: Effects of spacer design, directionality and voidage. *Journal of Membrane Science*. September, 2018, vol. 561, pp. 89–98.
13. Sousa M.R.S., Lora-Garcia J. and López-Pérez M.-F. Modelling approach to an ultrafiltration process for the removal of dissolved and colloidal substances from treated wastewater for reuse in recycled paper manufacturing. *Journal of Water Process Engineering*. 21 February, 2018, vol. 21, pp. 96–106.
14. Díaz V.H.G., Prado-Rubio O.A., Willis M.J. and Stosch M. Dynamic hybrid model for ultrafiltration membrane processes. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2017, vol. 40, pp. 193–198.
15. Kirschner A.Y., Cheng Y.H., Paul D.R., Field R.W. and Freeman B.D. Fouling mechanisms in constant flux crossflow ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*. 15 March, 2019, vol. 574, pp. 65–75.
16. Semenov A.G. and Lobasenko B.A. *Matematicheskoe opisaniye protsessa ultrafiltratsii s uchetom geleobrazovaniya na poverhnosti membranyi*. [Mathematical description of the ultrafiltration process with regard to gelation on the membrane surface]. *Hranenie i pererabotka sel'hozsiyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials]. 2001, vol. 8, pp. 15–17. (in Russian).
17. Semenov A.G., Zaharov Yu.N. and Lobasenko R.B. *Chislennyiy analiz modeli protsessa geleobrazovaniya pri ultrafiltratsii na ploskoy membrane* [Numerical analysis of the model of the process of gelation during ultrafiltration on a flat membrane]. *Tekhnologiya i tekhnika pischevykh proizvodstv* [Technology and technology of food production]. Kemerovo, 2003, pp. 164–167. (in Russian).
18. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Hrusch V.K. and Belyaev N.N. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka, 1997, 368 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 22.03.2019 р.