

## Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Terziev S.G.<sup>2</sup>, Mordynskiy V.P.<sup>1</sup>, Sirotiyuk I.V.<sup>1</sup>, Fateeva Ya.A.<sup>1</sup>,  
Molchanov M.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

<sup>2</sup>PRJSC "ENNI FOODS", Odessa, Ukraine

**Abstract.** This work is devoted to the fresh water deficit analysis. The importance of the research concerning water treatment is emphasized. A comparative analysis of water demineralization traditional methods is given and prospects for low-temperature desalination methods are shown. The increase in the world interest to the research of the block freezing innovative technologies was established, the priority in which belongs to the authors of this work. The aim of the work is to improve the block freezing devices during their transferring to a continuous operation mode. Achievement of this aim lies in a proposed universal design of the apparatus, in which the processes of crystallization, separation and melting of ice are sequentially implemented. A module for a continuous seawater desalination facility was developed. The energy and operational advantages of the proposed method were described. The system modeling of this equipment was carried out. The target function of the modeling determined the key parameters of the process of the ice block gravitational separation — energy and salinity. It was proposed to correct the traditional calculation principles for the outflow in channels by the "capillary drag" coefficient, which takes into account the relief surface of the ice capillaries. A technique for the engineering calculation of ice block salinity during separation was offered. The most significant result of the work lied in the fact of possibility to transfer the block freezing facilities to the continuous mode of sea water desalination with guaranteed salinity indicators. The significance of the work was that an energy-efficient freezing facility with ice recycling for the sea water demineralization in the flow was created.

**Keywords:** heat and mass transfer, block freezing, separation, desalination, energy efficiency.

**DOI:** <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.02>

**UDC:** 628.165:551.463:66.045.5:66.021.3/.4

### Elaborarea unei instalații de tip bloc pentru demineralizarea apei de mare la temperaturi joase

Burdo O.G.<sup>1</sup>, Terziev S.G.<sup>2</sup>, Mordânsky V.P.<sup>1</sup>, Sirotiuk I.V.<sup>1</sup>, Fateeva Ia.A.<sup>1</sup>, Molcianov M.Iu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Academia Națională de Tehnologii Alimentare din Odessa, Odessa, Ucraina

<sup>2</sup>SA «Enni Foods», Odessa, Ucraina

**Rezumat.** Scopul lucrării este de a îmbunătăți aparatura de congelare de tip bloc la trecerea acesteia în regim continuu de funcționare. Pentru a atinge acest obiectiv, se propune un design universal al aparatului, în care procesele de cristalizare, separare și topire a gheții sunt desfășurate în mod consecutiv. Este elaborat un modul de instalație de desalinizare continuă a apei de mare. Timpul procesului de formare a blocurilor de gheață este argumentat din considerente de minimizare a cheltuielilor de energie. Parametrii-cheie ai procesului de separare gravitațională a blocurilor de gheață, și anume energia și conținutul de sare, au fost determinați prin funcția-țintă de modelare. Se iau în considerare aspectele statice (balanța energetică și a balanța materială) și cele cinetice (balanța forței capilare și viteza de scurgere) ale separării. Se propune corectarea principiilor tradiționale de calculare a debitului în canale cu ajutorul coeficientului de "frânare capilară", care ia în considerare suprafața de relief a capilarelor de gheață. Valoarea acestui coeficient a fost stabilită în mod experimental. Se propune o metodă de calcul tehnic al conținutului de sare din blocul de gheață în timpul separării. Cel mai important rezultat al lucrării este că s-a dovedit posibilitatea de a transfera unitatea de congelare în bloc la modul de desalinizare continuă a apei de mare cu indici garantați ai conținutului de sare. Semnificația lucrării constă în faptul, că a fost creată o instalație de congelare eficientă din punct de vedere energetic, cu reciclare a gheții pentru demineralizarea apei de mare în flux.

**Cuvinte-cheie:** schimb de căldură și masă, congelare în bloc, separare, desalinizare, eficiență energetică.

©Бурдо О.Г., Терзиев С.Г.,  
Мордынский В.П., Сиротюк И.В.,  
Фатеева Я.А., Молчанов М.Ю.

**Разработка низкотемпературной установки блочного типа для деминерализации морской воды**  
**Бурдо О.Г.<sup>1</sup>, Терзиев С.Г.<sup>2</sup>, Мордынский В.П.<sup>1</sup>, Сиротюк И.В.<sup>1</sup>, Фатеева Я.А.<sup>1</sup>, Молчанов М.Ю.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина

<sup>2</sup>ЧАО «Энни Фудз», Одесса, Украина

**Аннотация.** Проведен анализ дефицита пресной воды. Подчеркнута актуальность исследований в направлении водоподготовки. Показано, что основной запас воды на Земле сосредоточен в морях. Даны сравнительный анализ традиционных методов деминерализации воды и приведены перспективы низкотемпературных методов опреснения. Установлен рост интереса в мире к исследованиям инновационных технологий блочного вымораживания, приоритет в которых принадлежит авторам. Целью работы является совершенствование аппаратов блочного вымораживания при переводе их в непрерывный режим работы. Для достижения поставленной цели предложена универсальная конструкция аппарата, в которой последовательно реализуются процессы кристаллизации, сепарирования и плавления льда. Разработан модуль установки непрерывного опреснения морской воды. Из условий минимизации энергетических затрат обосновано время процесса формирования блока льда. Установлено число сепараторов — 3. В пятой емкости осуществляется процесс плавления блока льда и получения пресной воды. Система управления периодически переключает электромагнитные клапана на линиях холодильного агента и продукта, что обеспечивает последовательность и синхронность работы аппаратов. Показаны энергетические и эксплуатационные преимущества предложенного способа. Проведено системное моделирование такого оборудования. Целевой функцией моделирования определены ключевые параметры процесса гравитационного сепарирования блока льда — энергетика и солесодержание. Рассмотрены статика (энергетический и материальный балансы) и кинетика (баланс сил в капилляре и скорость истечения) сепарирования. Предложено традиционные принципы расчета истечения в каналах скорректировать коэффициентом «капиллярного торможения», который учитывает рельефную поверхность капилляров льда. Значение этого коэффициента установлено экспериментально. Предложена методика инженерного расчета солесодержания в блоке льда при сепарировании. Наиболее существенным результатом работы является то, что доказана возможность перевода установки блочного вымораживания в режим непрерывного опреснения морской воды с гарантированными показателями солесодержания. Значимость работы заключается в том, что создана энергоэффективная вымораживающая установка с рециклингом льда для деминерализации морской воды в потоке.

**Ключевые слова:** теплообмен, блочное вымораживание, сепарирование, опреснение, энергоэффективность.

## ВВЕДЕНИЕ

Дефицит воды в мире растет. Если потребление воды и загрязнение водных ресурсов нашей планеты будет идти такими же темпами, как и сейчас, человечество рискует уже к 2025 году столкнуться с серьезной нехваткой воды. Такие актуальные проблемы как демографический рост, интенсификация хозяйственной деятельности и быстрое развитие промышленного производства, глобальное изменение климата, урбанизация и прочее приводят к истощению водных ресурсов нашей планеты. Экономическое и социальное развитие в большей мере оказывают влияние на уровень потребления воды населением и сферами народного хозяйства. Сегодня в мире один человек потребляет в среднем в два раза больше воды, чем в 1900 году, и эта тенденция продолжится в связи с изменением привычного потребления в странах с развивающейся экономикой. Известны три способа удовлетворения нужд экономики при сохранении природных ресурсов: это уменьшение расхода ресурсов, поиск замены

невозобновляемых ресурсов, а также развитие системы переработки и повторного использования материалов. Дефицит энергетических ресурсов и увеличение их стоимости оказывают значительное влияние на производство воды, использование и очистку, включая перспективу опреснения и повторного использования. В то же время, истощающиеся водные ресурсы необходимы для растущих потребностей при генерации энергии. Необходимо согласовать водную и энергетическую стратегии в сотрудничестве с инициативами сообществ и соответствующими технологиями.

Сложившаяся ситуация стимулирует бурное развитие как самостоятельного научно-технического направления — водоподготовки.

## АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И ГИПОТЕЗ

Нормами на питьевую воду предусмотрено, что их солесодержание должно быть менее 1 г/л, и лишь по специальному решению разрешается

использовать воду с солесодержанием до 1,5 г/л. Однако в ряде регионов поверхностные и подземные воды содержат больше солей. Морская вода, составляющая основной запас воды на Земле, содержит от 10 до 40 г/л солей. Для использования таких вод для питьевых целей ее подвергают опреснению термическими методами, обратным осмосом, электродиализом и комбинированными способами.

Старейшим методом получения обессоленной воды (дистиллята) является термический метод — перегонка, дистилляция, выпарка [1-3]. Теоретические основы термических методов, конструктивное оформление глубоко отработаны. В [4] представлен метод опреснения в выпарной установке с падающей пленкой, в качестве теплопередающей поверхности которой выступает пучок горизонтально расположенных труб. Учеными Шанхайского и Дальнянского морского университетов (Китай) предложен метод солнечного межфазного опреснения [5]. В Университете Сиань Цзяотонга (Китай) рассмотрена распылительная выпарная установка многоэффективной дистилляционной опреснительной системы [6].

Извлечение растворенных веществ из воды может производиться мембранными методами. Уровень обессоливания определяется селективностью мембран [7]. Методом нанофильтрации можно достигнуть частичного обессоливания, удалив соли жесткости вместе с двухзарядными анионами и частично — однозарядные катионы натрия и калия и анионы хлора [8, 9].

Более глубокое обессоливание обеспечивает низконапорный обратный осмос. Обратный осмос характеризуется использованием мембран с минимальным размером пор, соизмеримым с размером одиночных ионов, поэтому извлекаются все растворенные ионы и органические молекулы [10]. Рабочее давление от 7 до 70 атм. Однако, использование обратного осмоса имеет ряд ограничений. Вода, подаваемая на мембраны, не должна содержать железа, грубых механических примесей, должна быть умягченной и т.п. Это необходимо для предотвращения отложения малорастворимых солей на поверхности мембран и их разрушения [11-13].

В таб. 1 приведено оценочное сравнение методов обессоливания по трем уровням: минимальный (Min), максимальный (Max) и средний (Mid).

Таблица 1 / Table 1.

Сравнение методов деминерализации / Comparison of demineralization methods.

Параметр / Parameter	Ионный обмен / Ionic exchange	Обратный осмос / Reverse osmosis	Электродиализ / Electrodialysis	Выпарка / Evaporation
Надежность / Reliability	Max	Mid	Min	Max
Степень обессоливания / Desalination level	Max	Mid	Min	Mid
Удаление органики / Organics removal	Min	Max	Min	Mid
Удаление микрофлоры / Microflora removal	Min	Max	Mid	Max
Удаление взвесей / Mist removal	Min	Max	Min	Max
Удаление растворенных газов / Dissolved gases removal	Min	Min	Min	Max
Требования к подготовке / Preparation requirements	Min	Max	Max	Mid
Расход реагентов / Reagent consumption	Max	Min	Min	Min
Расход питающей воды / Feeding water flow	Min	Max	Max	Min
Объем отходов / Waste volume	Min	Max	Mid	Min
Возможность переработки отхо- дов / Recyclability	Max	Min	Min	Max
Возможность сброса отходов / Waste discharge capability	Min	Max	Mid	Min

Однако, пока сохраняется ориентация на использование простых и технологически отработанных дистилляционных систем. Вместе с тем растет интерес к холодильным технологиям опреснения. Так, учеными Университета Халифа (ОАЭ) представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих актуальность и перспективность технологии опреснения вымораживанием [14]. В Университете Ньюкасла (Австралия) предложен метод опреснения посредством частичной заморозки капель солевых растворов [15]. Совместными усилиями ученых Китая, США, Франции и Великобритании представлена технология опреснения морской воды путем распылительного вымораживания [16].

Помимо того, существуют и комбинированные системы опреснения с применением процесса вымораживания. Например, в Пекинском университете гражданского строительства и архитектуры [17, 18] рассмотрены методы опреснения в системах: «вымораживание — смачивание — центрифугирование», «вымораживание — сепарирование — центрифугирование», «вымораживание — СВЧ обработка — центрифугирование», «вымораживание — СВЧ обработка — сепарирование — центрифугирование».

Ученые Мексики и Франции провели целый комплекс экспериментальных исследований, направленных на изучение проблематики процесса опреснения вымораживанием, в частности попадание кристаллов соли в лед при его формировании [19].

Процесс опреснения соленой воды вымораживанием основан на селективных свойствах кристаллической решетки льда, которая не допускает замены атомов  $H^+$  или  $O^-$  атомами других солей. В процессе медленного охлаждения раствора подвижность молекул воды и солей уменьшается, а упорядоченность увеличивается, приближаясь к строению элементарной кристаллической решетки льда. Благодаря разным значениям свободных энергий у молекул воды в решетке льда и молекул солей в их решетках, происходит отделение от льда ионов солей, которые оттесняются от поверхности кристалла льда. Для успешного опреснения воды вымораживанием необходимо на практике

поддерживать такие режимы кристаллизации, когда образуются крупные и пресные блоки кристаллов льда [20].

Достоинством таких установок являются: простота конструкции, надежность, отсутствие системных потерь холода. Проведенный анализ показывает, что термические методы опреснения даже в случаях утилизации низкопотенциальной теплоты производственных процессов либо в составе многоцелевых энергетических комплексов выдвигают достаточно сложную проблему — предотвращение образования накипи на теплообменных поверхностях опреснителей. Методы опреснения вымораживанием не имеют такой проблемы, но они пока либо трудоемки, либо энергоемки, либо требуют сложного оборудования. В добавок к этому всему, отсутствие режима непрерывной работы значительно усложняет применение данной технологии в условиях тоннажного производства, что является критическим недостатком в задачах опреснения. В данной работе поставлена задача доказать возможность перевода установки блочного вымораживания в режим непрерывного опреснения морской воды с гарантированными показателями соленосодержания.

#### **Классификация низкотемпературных систем водоподготовки и формулировка рабочей гипотезы.**

Способы водоподготовки существенно отличаются по энергетическим затратам при их реализации. Наименьшие затраты энергии имеют мембранные методы, поскольку они не требуют затраты работы в системе на фазовые преобразования. Наибольшие затраты энергии требуют термические методы, поскольку в результате процесса образуется менее организованная структура воды — пар. А это связано со значительными энергетическими затратами. Холодильные способы обладают меньшей коррозией, меньшими капитальными затратами, более высокой термодинамической эффективностью. У них отсутствует накипеобразование. По сравнению с мембранными опреснителями, холодильные характеризуются большей степенью извлечения пресной воды, они нечувствительны к составу и концентрации примесей, не требуют тщательной

предварительной очистки воды. Физические принципы, которые лежат в основе деминерализации соленой воды вымораживанием, обуславливают ряд его неоспоримых преимуществ. Во-первых, количество энергии, которое необходимо для получения 1 кг пресной воды при вымораживании в 7 раз меньше, чем при термических методах (дистилляции, либо выпарки). Во-вторых, деминерализация вымораживанием нечувствительна к минеральному составу исходной воды. В-третьих, показатель качества пресной воды по сухому остатку (меньше 1 кг солей на 1 м<sup>3</sup> воды) может быть достигнут во всех случаях. При обосновании выбора метода опреснения воды в конечном итоге решающее значение имеют экономические показатели. На топливную составляющую падает (45—68)% стоимости опреснения воды дистилляцией и (30—43)% — вымораживанием. Представляется, что определенный импульс к развитию техники опреснения дадут технологии блочного вымораживания. Перспективы применения такой техники высветлены учеными университетов Колумбии, Испании, Марокко, Малайзии [21, 22].

Впервые технология блочного вымораживания была предложена авторами этой статьи (Бурдо О.Г. и др., *патент Украины № UA 35222*). Основные этапы метода следующие: погружение низкотемпературных поверхностей в раствор — намораживание на поверхностях блока льда — сьем блока льда — гравитационное сепарирование блока от раствора. Вымораживающие установки блочного типа оказались эффективными при концентрировании дорогих соков, виноматериалов и экстрактов. Собственно, именно для таких задач они и развивались. Достижения авторов в этих направлениях изложены в монографии (Бурдо О.Г., Мордынский В.П. и др., *Техника блочного вымораживания*, 2011).

Адаптация технологии к опреснению морской воды требует решения ряда вопросов. Во-первых, это производительность установки. Во-вторых, непрерывность в работе. В-третьих, полная автоматизация процессов. При переходе к тоннажному производству оригинальная конструкция пластинчатых испарителей не предполагает масштабирования. С ростом

производительности, а, следовательно, площади пластинчатых испарителей, возникают серьезные сложности с обеспечением регламентаций по параллельности и плоскостности их поверхностей. Операции съема блока льда и сепарирования сложны для автоматизации. Представляется, что решение этих проблем связано с ликвидацией самой операции съема блока льда.

В работе сформулирована научно-техническая гипотеза: «перевод установок блочного вымораживания на непрерывный режим работы при повышении их производительности возможно при исключении традиционной операции съема блока льда и осуществлении процесса гравитационного сепарирования непосредственно на поверхностях кристаллизации». В результате:

- устраняется необходимость в механизмах съема блока и его транспортировки;
- исключаются расходы энергии на расплав адгезионного слоя между блоком и поверхностью;
- упрощается схема автоматического управления процессами в установке.

Все низкотемпературные технологии включают три основных процесса: льдообразование, отделение льда от рассола и плавление льда. Оптимизация технологии требует системного подхода при совершенствовании режимов организации каждого из этих этапов.

#### **Постановка задачи системного моделирования основных процессов.**

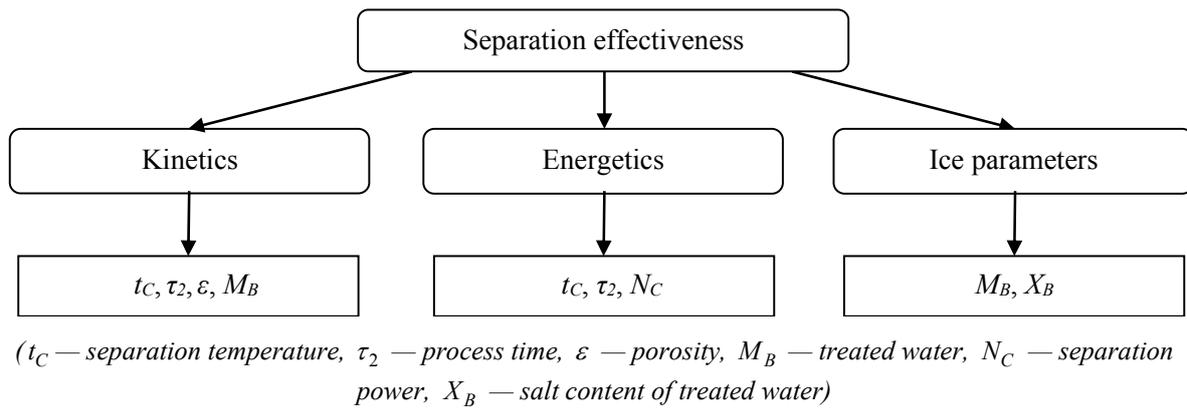
Основными процессами предлагаемой технологии деминерализации воды являются кристаллизация и гравитационное сепарирование. На первом этапе моделирования важно определить технологический параметр, который имеет существенное значение и на кинетику, и на энергетику процессов и кристаллизации, и сепарирования. Таким связывающим параметром, который позволит «сшивать» математические модели этих двух стадий технологии, предлагается принять температуру поверхности кристаллизации ( $t_0$ ). Первый этап технологии (процесс кристаллизации) изложен в работе авторов (Бурдо О.Г. и др., *Проблемы региональной энергетики*, 2022). Цель настоящих

исследований установить зависимость между энергетическими, экономическими и качественными показателями процесса сепарирования, разработать инженерную методику и конструкцию установки для деминерализации воды методом блочного вымораживания. Параметрическая модель процесса гравитационного сепарирования имеет вид (рис. 1).

От температуры  $t_0$  зависит время процесса кристаллизации  $\tau_1$  и массовый расход льда в блоке  $M_B$  и его пористость  $\varepsilon$ . Эти же

параметры влияют и на содержание солей в очищенной воде  $X_B$ .

Важное значение на эффективность сепарирования, на значение производительности по очищенной воде  $M_B$  оказывает температура  $t_C$ , при которой организуется процесс сепарирования. Мощность  $N_C$ , которая необходима для процесса гравитационного сепарирования определяет энергетику и время процесса  $\tau_2$ .



**Рис. 1. Взаимосвязь технологических параметров при гравитационном сепарировании.**  
**Fig. 1. Interrelation of technological parameters during gravitational separation.**

Рассмотрим тепловой и материальный балансы процесса сепарирования. Опыты по процессам гравитационного сепарирования проводились в исследованиях криоконцентрирования различных экстрактов, виноматериалов, соков, и пр. Целью этих исследований было установить технологически целесообразный режим сепарирования, при котором потери целевых компонентов со льдом окажутся приемлемыми. Работы по исследованию механизмов гравитационного сепарирования, установления количественных зависимостей процесса не обнаружено. Вместе с тем, анализ работ по процессам криоконцентрирования в установках блочного вымораживания показал, что просматривается общая закономерность кинетики сепарирования (рис. 2).

Анализ экспериментальных зависимостей, полученных при сепарировании гранатового сока (рис. 2), и их сравнение с подобными опытами позволяет предложить следующий

механизм процесса. В 1 периоде происходит эвакуация раствора из пограничного слоя. В опытах рост концентрации ( $X$ ) на разных растворах составляет 2-8%, а период длится 15-40 мин. Очевидно, это соответствует градиенту концентраций в пограничном слое. Во 2 периоде идет эвакуация раствора из капилляров льда. Период характеризуется примерным постоянством расходов удаляемого раствора и его концентрации. В 3 периоде наблюдается монотонное снижение  $X$ . Угол наклона в 3 периоде в исследованиях серьезно отличался. Период длился часами, путей управления процессом не предлагалось.

Представляется, что характер периода 3 (снижение  $X$ ) объясняется подтайкой льда, смешивания концентрата с водой. Организация процесса сепарирования при низких температурах позволит сохранить структуру льда, стабилизировать расход и концентрацию раствора (пунктирная линия, рис. 2).

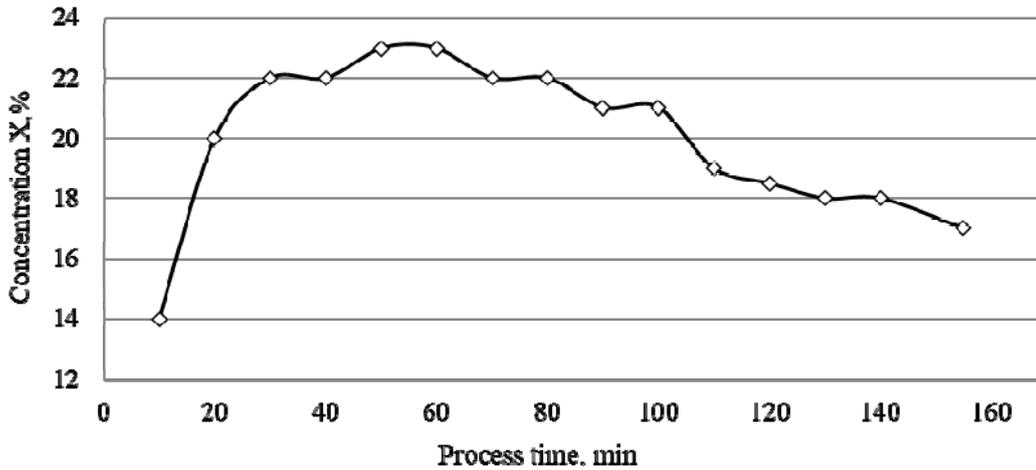


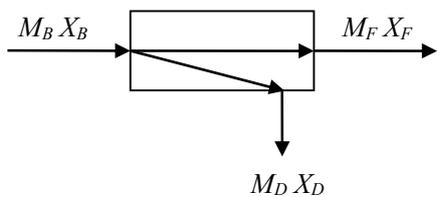
Рис. 2. Кинетика сепарирования. / Fig. 2. Separation kinetics.

Тепловое состояние блока льда определяется его взаимодействием с окружающей средой. От окружающей среды теплота ( $Q_E$ ) передается конвекцией к поверхности блока и расходуется частично на нагрев льда ( $Q_H$ ) до температуры плавления и частично на плавление ( $Q_M$ ):

$$Q_E = Q_B = \alpha F(t_E - t_L) \quad (1)$$

При этом, нагревается и изменяется агрегатное состояние блока льда:

$$Q_B = Q_H + Q_M = M_B c_{pB}(t_M - t_B) + M_B \Omega \quad (2)$$



$M_B$  – начальный массовый поток льда с концентрацией  $X_B$  / initial mass flow of ice with concentration  $X_B$ ;  
 $M_F$  – конечный массовый поток льда с концентрацией  $X_F$  / final mass flow of ice with concentration  $X_F$ ;  
 $M_D$  – массовый поток стоков с концентрацией  $X_D$  / mass flow of drains with concentration  $X_D$ .

Рис. 3. Балансовая модель материальных потоков при сепарировании. / Fig. 3. Balance model of material flows during separation.

Разделение потоков выражается соотношением полного материального баланса и баланса по сухим веществам:

$$\left. \begin{aligned} M_B - M_F &= M_D \\ M_B x_B - M_F x_F &= M_D x_D \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из системы (3) определяются неизвестные составляющие материального баланса процесса сепарирования.

В соотношении (1-2) принято:  $M_B$  — массовый расход льда,  $c_{pB}$  — удельная теплоемкость льда,  $\Omega$  — удельная теплота плавления льда.

Таким образом, из капилляра на первом и втором этапах эвакуируется только раствор ( $M_S$ ), а на 3 этапе — смесь раствора и расплава (воды,  $M_W$ ).

Статическая балансовая модель материальных потоков при сепарировании (рис. 3) устанавливает связь между ними.

**Кинетическая модель процесса сепарирования.**

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим капилляр блока льда, заполненный водным раствором. В процессе кристаллизации разность плотностей жидкости внутри капилляра и разделяемого раствора практически близка к нулю. Если блок льда не находится в контакте с разделяемым раствором, что характерно для процесса сепарирования, то возникает движущая сила (разность плотностей раствора в капиллярах и воздуха). Это приводит к эвакуации

раствора из капилляра. Динамика такого процесса определяется соотношением сил, действующих на раствор (рис. 4).

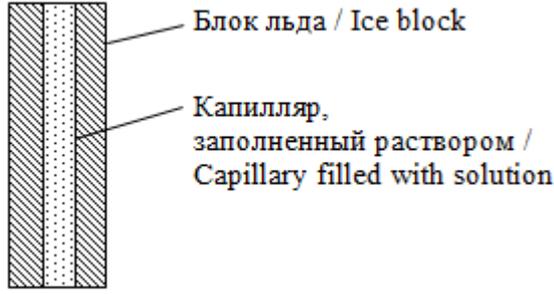


Рис. 4. Схема представительной ячейки.  
Fig. 4. Scheme of representable cell.

## 2. Баланс сил в капилляре.

На жидкость внутри капилляра действует комплекс сил, которые определяют режим движения. Движущей силой является разность давлений внутри капилляра и окружающей блок льда среды (атмосферное давление). Масса жидкости, плотность которой  $\rho$ , создает гидростатическое давление, которое пропорционально высоте капилляра  $l$ :

$$P_{HS} = \rho \cdot g \cdot l_i \quad (4)$$

Гидростатический потенциал (4) должен обеспечить преодоление сил вязкостного трения при движении жидкости со скоростью  $w$ . Общий баланс сил запишется:

$$\Delta P = \rho g l - \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[ \frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] - \frac{\sigma}{d_i} \quad (5)$$

В соотношении (5) приняты обозначения:  $\lambda$  — коэффициент трения;  $\xi$  — коэффициенты местных гидравлических сопротивлений;  $d$  — диаметр капилляра.

В рассматриваемой задаче  $[\sum \xi] = 1,5$  [23]. Кроме рассмотренных сил, на характер движения будут оказывать силы поверхностного натяжения, вклад которых обратно пропорционален диаметру капилляра.

Таким образом, из капилляра на первом этапе эвакуируется только раствор ( $M_S$ ), а на следующем этапе — смесь раствора и расплава (воды,  $M_W$ ).

Кинетическое уравнение процесса сепарирования запишется:

первый этап —  $0 < \tau < \tau_p$

$$\frac{dM_B}{\rho d\tau} = \frac{\Delta P}{R_H} \quad (6)$$

второй этап —  $\tau > \tau_p$

$$\frac{dM_B}{\rho d\tau} + \frac{dM_W}{\rho_W d\tau} = \frac{\Delta P}{R_H} \quad (7)$$

Второй этап начинается в момент ( $\tau_p$ ), когда стал плавиться лед.

Сила, которая действует в направлении поля гравитации, определяется по соотношению:

$$G = \frac{\pi d^2}{4} l (\rho - \rho_W) g \quad (8)$$

Аналитическое решение приведенной модели связано с определением компонент скорости по уравнению Навье-Стокса. Для условий рассматриваемой задачи корректно пренебречь полем давлений в капилляре и перейти к одномерной записи, полагая, что основные изменения происходят в осевой координате. Тогда:

$$\rho w \frac{dw}{dl} = \rho g + \mu \frac{d^2 w}{dl^2} \quad (9)$$

Но, даже при таких упрощениях решение задачи аналитическими методами проблематично.

3. Применение методов теории подобия для моделирования процесса гравитационного сепарирования.

Практика решения задач фильтрования основана полностью на эмпирическом подходе, установлении констант фильтрования. На базе этого опыта и принципов расчета задач истечения составим упрощенную модель сепарирования блока льда. При сепарировании идеальной жидкости справедливо уравнение Бернулли:

$$P_0 + \rho w_0^2 + 2gH_0 \rho = P_1 + \rho w_1^2 + 2H_1 \rho g \quad (10)$$

Откуда:

$$w_1 = \sqrt{2g\Delta H + \frac{P_0 - P_1}{\rho}} \quad (11)$$

Поскольку в рассматриваемом случае  $P_0 = P_{atm} = P_1$ , то приходим к формуле Торричелли:

$$w_1 = \sqrt{2gH} \quad (12)$$

Формула (12) отражает максимально возможную скорость движения жидкости в капилляре. Действительная скорость корректируется коэффициентом расхода  $\mu_1$ .

Принято коэффициент расхода определять по соотношению

$$\mu_1 = a + \frac{B}{\sqrt{Re}} \quad (13)$$

Константы  $a$  и  $B$  в соотношении (13) зависят от значения числа Рейнольдса:

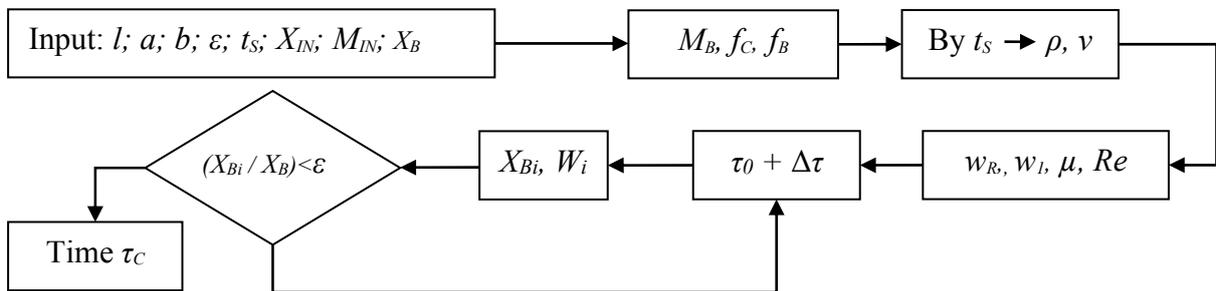
$$Re = \frac{d\sqrt{2gH}}{\nu} \quad (14)$$

Для значения числа Рейнольдса истечения  $Re \approx 105$ ,  $a = 0,58$ , а  $B = 0,89$ . Для других значений чисел Рейнольдса эти константы

определяются экспериментальным путем. Число Рейнольдса в комплексе характеризует свойства раствора и геометрические параметры канала. Естественно, исключительно для конкретной системы, для гладких каналов. Однако, каналы блока льда специфичны. Это система микропор и разветвленных микроканалов. Предлагается учесть эти факторы поправочным коэффициентом  $\mu_2$ . Это коэффициент «поверхностного торможения», значение которого установлено экспериментально. Для морской воды при температуре кристаллизации  $-10^\circ\text{C}$  его величина в конструкции блочного вымораживателя равна 0,032. В результате действительная скорость истечения равна:

$$w_R = \mu_1\mu_2\sqrt{2gH} \quad (15)$$

Схема инженерного расчета кинетики процесса гравитационного сепарирования будет иметь вид (рис. 5).



( $l, a, b$  — height, thickness and width of ice block,  $\tau_2$  — process time,  $t_s$  — solution temperature,  $X_{IN}$  — initial salt content of sea water,  $M_{IN}$  — initial mass of sea water,  $X_B$  — salt content of ice block,  $M_B$  — mass of ice block,  $f_C$  — total cross-section of channel,  $f_B$  — ice block cross-section,  $\rho$  — density of sea water,  $\nu$  — kinematic coefficient of the sea water viscosity,  $w_1$  — theoretical draining speed,  $w_R$  — real draining speed,  $\mu_1$  and  $\mu_2$  — coefficients,  $Re$  — Reynolds number,  $X_{Bi}$  — current salt content of treated water,  $W_i$  — current quantity of separated solution from the ice block,  $\tau_C$  — separation time)

Рис. 5. Схема расчета процесса сепарирования. Fig. 5. Calculation scheme of separation process.

Практическая реализация схемы (рис. 5) предусматривает наличие данных по блоку льда: его высоты  $l$ , толщины  $a$  и ширины  $b$ , пористости  $\varepsilon$ . По этим характеристикам рассчитываются: объем блока и его масса  $M_B$  и, через пористость, объем в нем раствора и его масса  $M_S$ . В зависимости от типа раствора находятся его теплофизические свойства, число Рейнольдса и коэффициенты

$\mu_1$  и  $\mu_2$ . Далее рассчитываются теоретическая  $w_1$  и действительная  $w_R$ , скорости истечения, сечение блока льда  $f_B$  и суммарное сечение каналов  $f_C$ . Произведение сечения каналов на действительную скорость определяет объемный расход раствора из каналов. Произведение объемного расхода и времени сепарирования дает количество отведенного

из блока раствора  $W_i$ . Далее устанавливается степень концентрирования раствора и текущее значение концентрации сухих веществ в блоке льда:

$$X_{Bi} = \frac{M_S - W_i}{M_B} \left( \frac{M_{IN}}{M_B} \right) X_{IN} \quad (16)$$

В соотношении предполагается, что блок заполнен раствором, который имеет концентрацию такую же, как и остаток, а в

процессе сепарирования плавления льда не происходит.

При сравнении текущих значений  $X_{Bi}$  с заданными (нормативными) значениями на пресную питьевую воду  $X_{BD}$ , устанавливается искомое время процесса сепарирования.

Проведено сравнение расчета по схеме (рис. 5) с данными экспериментов (рис. 6).

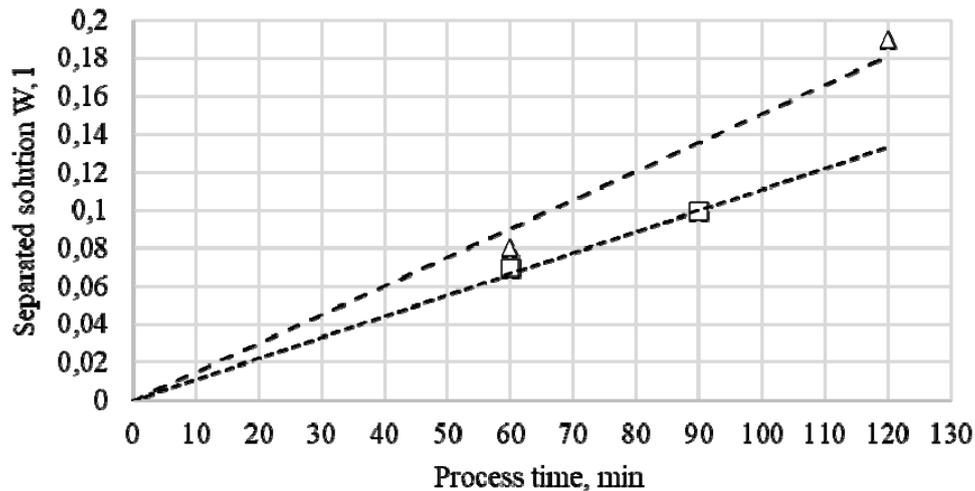


Рис. 6 Сравнение расчетных и опытных данных.  
Fig. 6. Comparison of calculation and experimental data.

Эксперименты проведены на воде Черного моря (рис. 6, нижняя линия) и гранатовом соке (рис. 6, верхняя линия). Видно, что расчетные линии удовлетворительно согласуются с результатами опытов. Это является основанием для разработки экспериментального образца опреснителя блочного типа.

Техническая идея разработки в том, что установка — модульного типа. Производительность линии определяется количеством модулей. Каждый модуль

содержит ряд однотипных аппаратов, в которых протекают поочередно процессы кристаллизации, сепарирования и плавления льда. Поскольку время гравитационного сепарирования больше времени вымораживания, то в модуле должно быть несколько аппаратов, в которых происходит сепарирование. Количество таких аппаратов установлено расчетом по схеме (рис. 5). В таблицах (2—4) приведены исходные данные и результаты расчетов.

Таблица 2 / Table 2.

Исходные данные / Input data

$M_{IN}$ , kg	$t$ , °C	$X_{BD}$ , g/l	$\varepsilon$	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$X_{IN}$ , g/l	Размеры блока, м / Block sizes, m		
						$l$	$a$	$b$
60	-5	0,5	0,012	1013,4	17	1	0,6	0,05

Таблица 3 / Table 3.

Результаты первого этапа расчета / Results of the first stage of calculation

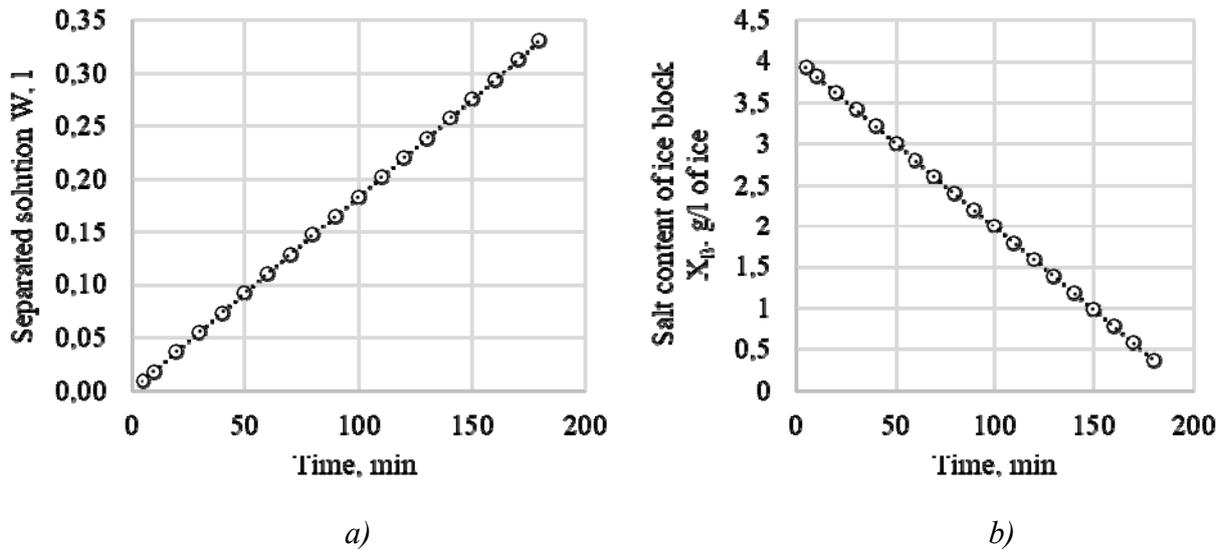
Re	$d$ , m	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s	A	B	$\mu_1$	$w_1$ , m/s	$M_B$ , kg	$M_{WS}$ , kg
157260	0,092	0,0000026	0,58	0,89	0,58	4,43	30,4	29,6

Таблица 4 / Table 4.

Результаты второго этапа расчета / Results of the second stage of calculation

$\tau$ , min	$f_B$ , m <sup>2</sup>	$V_B$ , m <sup>3</sup>	$V_S$ , m <sup>3</sup>	$M_S$ , kg	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s	$w_R$ , m/s	$f_C$	$\mu_2$	$W$ , l	$X_B$ , g/l
60	0,03	0,03	0,00036	0,364824	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$85,1 \cdot 10^{-6}$	0,00036	$33 \cdot 10^{-6}$	0,11	2,8
120	0,03	0,03	0,00036	0,364824	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$85,1 \cdot 10^{-6}$	0,00036	$33 \cdot 10^{-6}$	0,22	1,59

Итоговые результаты по кинетике сепарирования представлены на рис. 7.



a) объем раствора / solution volume;  
 b) концентрация солей в блоке льда / salts concentration in the ice block

Рис. 7. Кинетика сепарирования. Fig. 7. Separation kinetics.

Видно (рис. 7b), что верхняя граница нормативного значения ( $X_B = 1 \text{ г/кг}$ ) достигается при  $\tau = 2,5$  часа, а значение ( $X_B = 0,5 \text{ г/кг}$ ) требует  $\tau = 3,5$  часа.

Следующим этапом проектирования является согласование режимов работы кристаллизатора и сепараторов. Основными параметрами, влияющими как на энергетические затраты, так и на кинетику процесса кристаллизации являются уровень температур при отводе теплоты кристаллизации и начальная концентрация раствора. Исследованы зависимости удельных энергозатрат  $J$  от температуры кипения холодильного агента для различных начальных концентраций раствора. Анализ показал, что для каждой начальной концентрации раствора существует свой ярко выраженный минимум. Установлено, что для всех температур окружающей среды графики  $J = f(\tau)$  имеют локальный минимум при значении  $\tau = 2$  ч. Причем, для  $\tau$  больше двух

часов  $J$  растет быстрее, чем при  $\tau$  меньше двух часов. Следовательно, принимаем время цикла вымораживания — 2 часа. Время сепарирования должно быть кратным этому времени. Исходя из результатов расчета (рис. 7b) рациональное число сепараторов в установке должно быть 3.

Таким образом, предлагаемая установка для непрерывного опреснения морской воды содержит 5 одинаковых аппаратов. Если в 1 происходит вымораживание, то во 2, 3 и в 4 осуществляется сепарирование, а в 5 — идет плавление льда. Каждые 2 часа автоматически переключаются электромагнитные клапана на линиях холодильного агента и продукта, что обеспечивает последовательность и синхронность работы аппаратов.

### ВЫВОДЫ

За последние 20 лет в мире суммарная производительность опреснительных установок выросла более чем в 50 раз.

Наблюдается тенденция создания как крупных опреснительных систем производительностью до 500000 м<sup>3</sup>/сутки, так и средних, и малых установок для разнообразных нужд.

Предложенный принцип низкотемпературной деминерализации морской воды в установках блочного вымораживания имеет перспективы в конструкциях разной производительности.

Роль опреснения на современном этапе не ограничивается только проблемой ликвидации дефицита воды в ряде маловодных и безводных регионов мира. Принцип опреснения все шире сопровождается концентрированием растворов с целью получения из них товарных минеральных продуктов. В связи с этим на мировом рынке возрастает спрос на опреснительные установки, обладающие высокими экономическими показателями.

Представляется, что следует ожидать бурного развития принципиально нового для настоящего времени научно-технического направления — технология воды направленного лечебно-профилактического назначения. Предлагаемые аппараты блочного вымораживания являются удобными конструкциями для производства талой воды, насыщенной необходимыми целебными компонентами.

#### Литература (References)

- [1] Alkhalidi A., Kiwan S., Al-Hayajneh A. Experimental Investigation of Water Desalination Using Freezing Technology. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, vol. 28, pp. 1-10. doi: 10.1016/j.csite.2021.101685
- [2] Micale G., Cipollina A., Rizzuti L. *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*, Springer, 2009. 306p. doi: 10.1007/978-3-642-01150-4
- [3] Ryabchikov B.E. *Sovremennye Metody Podgotovki Vody* [Modern Methods of Water Treatment]. Minsk, 2005. 328p. (In Russian).
- [4] Raju A., Mani A. Heat Transfer Characteristics in Horizontal Tube Bundles for Falling Film Evaporation in Multi-Effect Desalination System. *Desalination*, 2015, no. 375, pp. 129-137. doi: 10.1016/j.desal.2015.06.018
- [5] Xu J., Wang Z., Chang C., Fu B., Tao P., Song C., Shang W., Deng T. Solar-Driven Interfacial Desalination for Simultaneous Freshwater and Salt Generation. *Desalination*, 2020, no. 484. doi: 10.1016/j.desal.2020.114423
- [6] Guo P., Li T., Wang Y., Li J. Energy and Exergy Analysis of a Spray-Evaporation Multi-Effect Distillation Desalination System. *Desalination*, 2021, no. 500. doi: 10.1016/j.desal.2020.114890
- [7] Hwang S.-T., Kammermeyer K. *Membranes in Separations*. New York: John Wiley & Sons, 1975. 559p.
- [8] Mustafa I., Kilbay A., Alhseinat E., Almarzooqi F. Enhanced Membrane Distillation Water Flux through Electromagnetism. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2021, no. 169. doi: 10.1016/j.ccep.2021.108597
- [9] Ray S.S., Chen S.-S., Chang H.-M., Thanh C.N.D., Le Q.H., Nguyen N.C. Enhanced Desalination Using a Three-Layer OTMS Based Superhydrophobic Membrane for a Membrane Distillation Process. *RSC Advances*, 2018, vol. 18, no. 8, pp. 9640-9650. doi: 10.1039/C8RA01043A
- [10] Dytneriskii Yu.I. *Obratnyi Osmos i Ul'trafil'tratsiya* [Reverse Osmosis and Ultrafiltration]. Moscow: Khimiya, 1978. 352p. (In Russian).
- [11] Ray S.S., Chen S.-S., Sangeetha D., Chang H.-M., Thanh C.N.D., Le Q.H., Ku H.-M. Developments in Forward Osmosis and Membrane Distillation for Desalination of Waters. *Environmental Chemistry Letters*, 2018. doi: 10.1007/s10311-018-0750-7
- [12] Sanna A., Buchspies B., Ernst M., Kaltschmitt M. Decentralized Brackish Water Reverse Osmosis Desalination Plant Based on PV and Pumped Storage — Technical Analysis. *Desalination*, 2021, no. 516. doi: 10.1016/j.desal.2021.115232
- [13] Byrne P., Fournaison L., Delahaye A., Oumeziane Ya. A., Serres L., Loulergue P., Szymczyk A., Mugnier D., Malaval J.-L., Bourdais R., Gueguen H., Sow O., Orfi J., Mare T. A Review on the Coupling of Cooling, Desalination and Solar Photovoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015 vol. 47, pp. 703-717. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.083
- [14] Zhang H., Janajreh I., Hassan Ali M. I., Askar K. Freezing Desalination: Heat and Mass Validated Modeling and Experimental Parametric Analyses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, no. 26. doi: 10.1016/j.csite.2021.101189
- [15] Barma M. C., Peng Z., Moghtaderi B., Doroodchi E. Freeze Desalination of Drops of Saline Solutions. *Desalination*, 2021, no. 517. doi: 10.1016/j.desal.2021.115265
- [16] Liu Ya., Ming T., Wu Yo., de Richter R., Fang Yu., Zhou N. Desalination of Seawater by Spray Freezing in a Natural Draft Tower. *Desalination*, 2020, no. 496. doi: 10.1016/j.desal.2020.114700
- [17] Yang H., Fu M., Zhan Z., Wang R., Jiang Yu. Study on Combined Freezing-Based Desalination Processes with Microwave Treatment. *Desalination*, 2020, no. 475. doi: 10.1016/j.desal.2019.114201
- [18] Yang H., Sun Z., Zhan Z., Zhang H., Yao Yu. Effects of Watering Parameters in a Combined

- Seawater Desalination Process. *Desalination*, 2018, no. 425, pp. 77-85.  
doi: 10.1016/j.desal.2017.10.014
- [19] Castillo-Tellez B., Figueroa P.I. Castillo-Tellez M., Marzoug R., Allaf K. Experimental Analysis of Saline Diffusion During Saltwater Freezing for Desalination Purposes. *Water and Environment Journal*, 2020, vol. 34, pp. 929-936.  
doi: 10.1111/wej.12603
- [20] Kucera J. *Desalination (Water from Water)*, Scrivener Publishing, 2019. 768p.  
doi: 10.1002/9781119407874
- [21] Zambrano A., Ruiz Y., Hernández E., Raventós M., Moreno F.L. Freeze Desalination by the Integration of Falling Film and Block Freeze-Concentration Techniques. *Desalination*, 2018, no. 436, pp. 56-62.  
doi: 10.1016/j.desal.2018.02.015
- [22] Hernández E., Santos A., Pazmiño N., Raventós M., Blanco M., Moreno F.L., Ruiz Y., Rich A., Samsuri S. Two Strategies for Freeze Desalination of Seawater by Progressive and Block Techniques. *Desalination and Water Treatment*, 2021, vol. 215, pp. 1-9.  
doi: 10.5004/dwt.2021.26798
- [23] Spalding D.B., Taborek J. *Heat Exchanger Design Handbook (Heat Exchanger Theory)*. New York, Hemisphere Publ. Corp., 1983. 2080p. (Russ. ed.: Petuhov B.S., Shykov V.K. *Spravochnik po Teploobmennikam: V 2 t. T. 1*. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 560p.).

**Сведения об авторах.**



**Бурдо Олег Григорьевич**, д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, нанотехнологии в пищевой промышленности, энергоэффективность г. Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)



**Терзиев Сергей Георгиевич**, д.т.н. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экоиндустрия в АПК, экстрагирование г. Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)



**Мордынский Всеволод Петрович**, к.т.н., доцент. Сфера научных интересов: технологии криоконцентрирования и опреснения г. Одесса, Украина  
E-mail: [poem.onaft@gmail.com](mailto:poem.onaft@gmail.com)



**Сиротюк Илья Вадимович**, ассистент. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экстрагирование, обезвоживание пищевых продуктов, энергоэффективность г. Одесса, Украина  
E-mail: [ilyxin09@gmail.com](mailto:ilyxin09@gmail.com)



**Фатеева Яна Александровна**, аспирант. Сфера научных интересов: технологии криоконцентрирования и опреснения г. Одесса, Украина  
E-mail: [yana.maselska@gmail.com](mailto:yana.maselska@gmail.com)



**Молчанов Михаил Юрьевич**, студент. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экстрагирование г. Одесса, Украина  
E-mail: [Mihatapok3@gmail.com](mailto:Mihatapok3@gmail.com)