

## Management of Energy Flows in Low-temperature Separation Units

Trishyn F.A., Trach O. R., Orlovskaya Yu. V.

Odessa national academy of food technologies

Odessa, Ukraine

**Abstract.** The aim of this work is to study the effect of medium and low power ultrasound on the crystallization and separation processes. A thesis about the importance of using thermal energy converters in separation units has been suggested. The prospects of desalination freezing units and ways of their improvement have been justified. Based on the system analysis, the energy flows in an ice recycling facility have been considered. For the first time, the overall energy efficiency estimation technique based on the hypothesis of direct and reverse energy flows has been proposed. The new results on the effect of ultrasonic fields on the separation and crystallization process have been obtained. It has been proved that the use of ultrasonic field is effective in controlling the energy flows during block freezing. It has been established that the salt content in the ice block is reduced by 2-3 times. The relationship between the ice block separation kinetics and the power and frequency has been determined. The similarity theory methods have been used to summarize the experimental data obtained. The criterion models have been presented to calculate the block porosity and the filtration rate. It has been established that the Euler wavenumber modified by the authors successfully generalizes the databases of the experimental findings. Using the numerical simulation methods, the thermal field in the block which depends on its porosity has been established. The results of the simulation have been presented in the form of a nomogram.

**Keywords:** modeling, crystallization, porosity, concentration, temperature, heat transfer.

**DOI:** 10.5281/zenodo.1217274

### Gestionarea fluxurilor de energie în sistemele de separare la temperaturi scăzute

Trișin F. A., Traci A. R., Orlovskaya Yu. V.

Academia Națională de Tehnologii Alimentare din Odessa,

Odessa, Ucraina

**Rezumat.** Scopul lucrării este de a fundamenta utilizarea convertizoarelor de energie termică în unitățile de separare, precum și de a studia efectul ultrasunetelor de medie și joasă putere asupra proceselor de transfer de căldură și masă în unitățile de înghețare a blocurilor. Sunt determinate dezavantajele celor mai utilizate metode termice. Sunt argumentate perspectivele instalațiilor de desalinizare în baza înghețării și modalitățile de îmbunătățire a acestora. Pe baza analizei sistemice sunt luate în considerare debitele de energie într-o instalație de reciclare a gheții. Pentru prima dată, a fost propusă o metodologie de estimare a eficienței energetice globale pe baza ipotezei fluxurilor energetice directe și "inverse". S-a demonstrat că intensitatea energetică a producției unui 1 kg de gheață poate fi redusă de la 1,1 MJ (ceea ce este tipic pentru instalațiile de congelare tradiționale) până la 0,055 MJ, iar utilizarea unui câmp ultrasonic este un mijloc eficient de control al fluxurilor de energie în timpul înghețării în bloc. Procesul de cristalizare la frecvențe de 20-60 kHz conduce la o scădere a porozității blocului de gheață de 3 până la 3,5 ori. Se constată că conținutul de sare din blocul de gheață sub influența ultrasunetelor este redus de 2-3 ori. Se determină dependența cinetică de separare a blocului de gheață de puterea și frecvența ultrasunetelor. Metodele numerice de simulare stabilesc câmpul de temperatură din bloc, în funcție de porozitatea acestuia. Rezultatele simulării sunt prezentate sub forma unei nomograme, care permite determinarea distribuției temperaturii peste înălțimea blocului de gheață, în funcție de porozitatea blocului.

**Cuvinte-cheie:** modelarea, cristalizarea, porozitatea, concentrația, temperatura, transferul de căldură.

### Управление потоками энергии в низкотемпературных разделительных установках

Тришин Ф.А., Трач А.Р., Орловская Ю.В.

Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина

**Аннотация.** Целью работы является обоснование применения преобразователей тепловой энергии в установках сепарирования, а также изучение воздействия ультразвука средней и малой мощности на процессы тепло- и массообмена в установках блочного вымораживания. Исследованы традиционные методы дистилляции. Определены недостатки наиболее распространенных термических методов. Показана их высокая энергоемкость. Обоснованы перспективы опреснительных вымораживающих установок и пути их совершенствования. На основе системного анализа рассмотрены потоки энергии в установке с рециклингом льда. Впервые предложена методика оценки общей энергетической эффективности на основе гипотезы прямых и «реверсных» потоков энергии. Показано, что

энергоёмкость производства 1 кг льда можно снизить с 1,1 МДж (что характерно для традиционных вымораживающих установок) до 0,055 МДж. Доказано, что эффективным средством управления потоками энергии при блочном вымораживании является применения ультразвукового поля. Процесс кристаллизации при частотах 20 – 60 кГц приводит к снижению пористости блока льда в 3 – 3,5 раза. Установлено, что содержание солей в блоке льда под воздействием ультразвука снижается в 2 – 3 раза. Определена зависимость кинетики сепарирования блока льда от мощности и частоты ультразвука. Методами теории подобия проведено обобщение полученных экспериментальных данных. Процесс сепарирования был рассмотрен как разновидность процесса фильтрования и применен эмпирический подход для расчета константы фильтрования, получены формулы описывающие зависимость коэффициента фильтрации от числа Эйлера и зависимость пористости от числа Эйлера, что позволяет проводить конструкторский расчет блочных вымораживающих установок. Установлено, что модифицированное авторами волновое число Эйлера удачно обобщает базы экспериментальных данных. Методами численного моделирования установлено поле температур в блоке в зависимости от его пористости. Результаты моделирования представлены в виде номограммы, которая позволяет определить распределение температур по высоте блока льда в зависимости от величины пористости блока.

**Ключевые слова:** моделирование, кристаллизация, пористость, концентрация, температура, теплопередача.

## Введение

Современная пищевая индустрия является чрезвычайно энергоёмкой отраслью во всех индустриально развитых странах. В борьбе за мировые рынки продуктов конкуренцию выигрывают фирмы, которые на производство затрачивают меньше энергии. Особенно сложно производителям на территории постсоветского пространства, где удельные затраты энергии в разы выше, чем у ведущих фирм.

Серьезным резервом снижения удельных расходов энергии может стать энергетический мониторинг пищевых производств, выявление проблемных звеньев пищевых энерготехнологий. На основе такого мониторинга возможна постановка и решение задачи эксплуатации оборудования при максимальных энергетических КПД.

Никогда не оспаривался тот факт, что действенным средством в оптимизации режимов эксплуатации являются системы автоматического регулирования. Вместе с тем, известные принципы регулирования до сих пор не рассматривались как многоуровневые и иерархические. Распространенные принципы оптимального, гарантированного, адаптированного и пр. регулирования ограничиваются рамками наиболее ответственного узла технологической линии. Как правило, задачей современных схем автоматического регулирования является стабилизация на необходимом уровне одного либо нескольких физических параметров отдельного объекта. Проблемы системного плана ставились в задачах логистики, рецептуры и пр., где

анализ не сталкивался с взаимодействием большого количества физических факторов и с энергетическими потоками.

Второй глобальной проблемой ближайшего будущего человечества является экологическая безопасность, и, в первую очередь, обеспечение пресной водой.

## I. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ежегодно в мире тратится 5000 км<sup>3</sup> пресной воды, или 11% годового стока всех рек мира. В густонаселенных областях относительно немного крупных рек и их воды интенсивно используются. Все это усложняет водоснабжения человечества, на текущий момент примерно одна треть населения Земли испытывает дефицит пресной воды [1,2,3].

К 2025 году в связи с ростом численности населения, ситуация существенно ухудшится. Такие перспективы значительно повышают важность получения очищенной воды. До сих пор основным методом очистки воды остается ее дистилляция, однако энергетическая эффективность такого метода не слишком высока. В связи с этим широко распространяются альтернативные способы очистки воды.

Как показывает анализ литературных данных [4,5,6,21] проблема повышения энергоэффективности очистки воды пока не решена в полной мере. Среди альтернативных опреснительных систем планомерно повышается интерес к низкотемпературным технологиям

водоподготовки. Это связано с их высокой энергоэффективностью, поскольку для преобразования воды в пар требуется подвести 2252 кДж/кг, а для преобразования воды в лед (вымораживание) необходимо отвести 335 кДж/кг. То есть затраты энергии на образование льда в 6,7 раза меньше затрат энергии на испарение. Наиболее привлекательными выглядят кристаллизаторы непрерывного действия, что связано с наличием отработанных методов проектирования и промышленного процесса. Однако высокая механическая сложность, большие системные потери холода и высокие капитальные затраты, делают установки непрерывной кристаллизации слишком дорогими для систем очистки воды. В такой ситуации можно использовать установки, построенные на принципе блочного вымораживания [7]. Для установок этого типа характерны простота конструкции, компактность и энергетическая эффективность. Принцип блочного вымораживания устраняет системные потери холода, характерные для традиционных установок криоконцентрирования.

В последние годы повышается интерес к технологиям интенсификации процессов с помощью ультразвукового излучения, в первую очередь, имея в виду мощный ультразвук. Мощный ультразвук характеризуется мощностью от 10 Вт/см<sup>2</sup> и до 1000 Вт/см<sup>2</sup>, в зависимости от области применения [8,9].

При этом частоты могут быть чрезвычайно низкими, порядка тысяч герц. Типичные рабочие частоты для большинства систем на основе мощного ультразвука составляют от 20 до 100 КГц, хотя в некоторых случаях применяются и частоты до 10 КГц и выше 500 КГц.

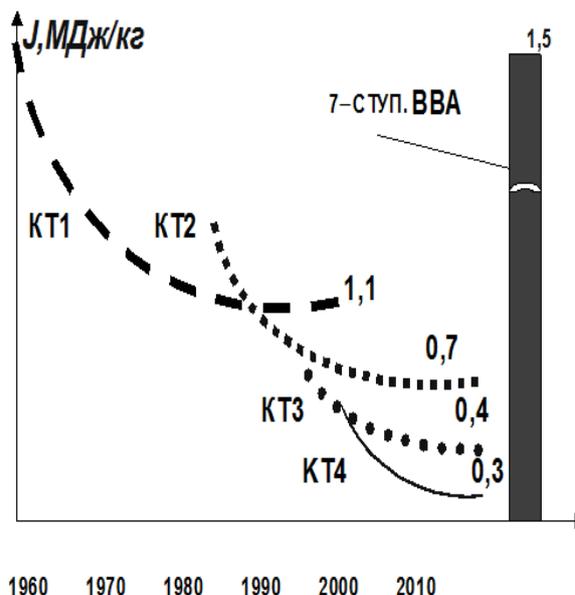


Рис.1. Эволюция технологий криоконцентрирования. Энергетический аспект.

В некоторых системах очистки или сонохимии можно видеть даже мегагерцовый диапазон. Применение мощного ультразвука к жидким средам вызывает в них ряд широко известных эффектов: акустическую кавитацию [10,22], ультразвуковой капиллярный эффект [24,25,26], сонолюминисценцию [25], вихревые эффекты в виде микро- и макропотоков, ускорение процессов диффузии [11], а также ряд химических эффектов [23]. Установлено, что ультразвуковое воздействие оказывает положительный эффект на процесс выращивания кристаллов из раствора [12,13], улучшает процесс очистки воды от загрязнений [14], повышает эффективность разнообразных процессов обработки продуктов в пищевой промышленности [15,16,17,18,19], а также оказывает положительное влияние на процессы тепло- и массопереноса [20].

Несмотря на такой широкий спектр работ все еще недостаточно изучено применение ультразвука средней и малой мощности, а также применение ультразвукового излучения к процессам кристаллизации и сепарации воды.

В данной работе выдвигается научное положение о важности применения преобразователей тепловой энергии на прямых и реверсных потоках и ставится задача изучить влияния ультразвука средней и малой

мощности на процессы кристаллизации и сепарации.

## II. СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ

В работе формулируется гипотеза, что для управления сложными, многоуровневыми и отличными по физической природе потоками энергии требуется новая, адаптированная к специфике энерготехнологий пищевых производств, схема управления. Такой принцип назван «системное управление потоками энергии».

Рассмотрим структуру сложной многоуровневой энерготехнологической схемы пищевого производства. Представляется, что можно ограничиться 4 уровнями иерархии: мега (уровень предприятия в целом), макро (уровень отдельного модуля, цеха), мезо (уровень технологической линии) и микро (уровень отдельной машины, аппарата). На каждом уровне принимаются характерные показатели и соответствующие методы исследования.

Логично предприятие разбить (рис.2) на два блока (модуля).

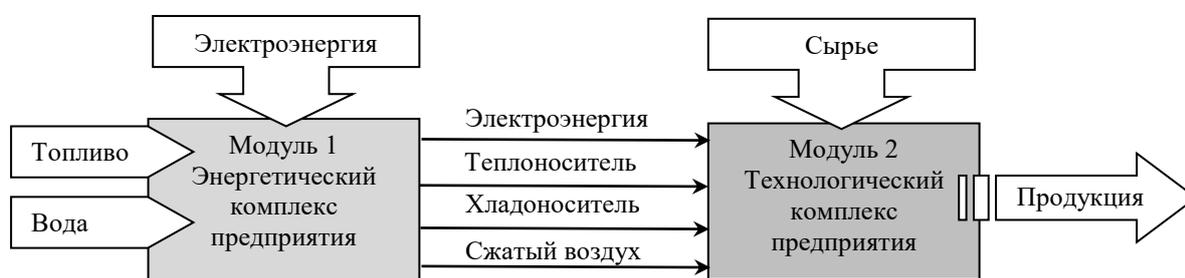


Рис.2. Операторная модель верхнего уровня пищевого предприятия.

На основе операторной модели можно составить параметрическую модель объекта при системном управлении потоками энергии (рис.3).

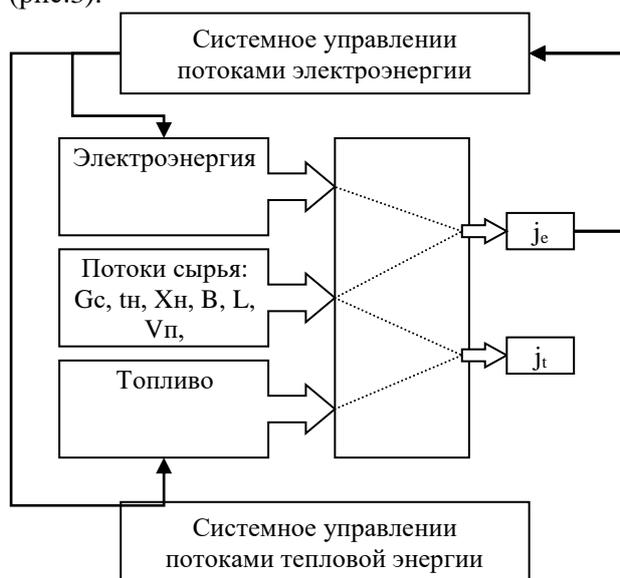


Рис.3. Параметрическая модель верхнего уровня.

Ключевыми факторами, описывающими верхний уровень модели, являются удельные затраты энергии.

$$j_T = \frac{\text{затраты тепловой энергии}}{\text{объем выпущенной продукции}} \frac{Дж}{кг} \quad (1)$$

Параметр  $j_e$  записывается аналогично, только в числителе будут расходы электроэнергии.

На мезомасштабном уровне методы, использованные при выводе предыдущих моделей, следует развивать. Предлагается делать это на основе следующего научного положения. **«Повышение числа преобразователей тепловой энергии на прямом потоке энергии приводит к снижению энергетической эффективности схемы, а на потоках выбросов тепловой энергии, на «реверсных потоках» – к повышению энергетического КПД».**

Однако традиционные методы энергетического мониторинга не дают рекомендаций по количественной оценке влияния реверсных потоков. Поэтому, требуется развитие теоретических основ энергомониторинга, разработка метода иерархической оценки эффективности

использования энергии в теплотехнологической схеме.

Значения энергетических КПД отдельных элементов системы определяется отношением величины энергии на выходе ( $E_i$ ) из  $i$ -го анализируемого элемента и значения на входе ( $E_{i-1}$ ). Разница этих потоков определяет потери энергии ( $Q_i$ ) в  $i$ -м элементе.

$$\eta_i = \frac{E_i}{E_{i-1}} = \frac{E_{i-1} - Q_i}{E_{i-1}} \quad (2)$$

Общий КПД теплотехнологической системы равен отношению энергии продукта ( $E_{pr}$ ) к энергии топлива ( $E_f$ ), или произведению всех КПД:

$$\eta = \frac{E_{pr}}{E_f} = \prod_{n=1}^n \eta_i \quad (3)$$

По такой схеме последовательного анализа можно выявить наиболее энергозатратные элементы схемы. Имея такую карту затрат и потерь энергии можно наглядно решать задачу использования низкопотенциальной теплоты одного уровня для подогрева, например, топлива и дутьевого воздуха другого уровня, т.е. добиться энергетической эффективности на каждом уровне иерархии теплотехнологии. В случае «реверсных» потоков энергии, потоков по пути отработавшего теплоносителя, рассчитываются КПД реверсных элементов

$$\eta_{pi} = \frac{Q_{pi}}{E_f} \quad (4)$$

С учетом реверсных потоков итоговый тепловой показатель системы определяется:

$$\eta = \frac{E_{pr} + \sum_i Q_{pi}}{E_f} = \prod_{n=1}^n \eta_i + \frac{\sum_i Q_{pi}}{E_f} \quad (5)$$

Более наглядным может быть определение суммарных потерь энергии на прямых потоках и возврат – на реверсных потоках. Это позволит сравнивать энерготехнологии по показателю  $jm$ .

Низкотемпературные технологии разделения пищевых жидкостей начали развиваться после 1950г. К 1990г удельные затраты энергии криотехнологий (КТ1) на выделение 1 кг льда из раствора достигли 1,1 МДж. А это ощутимо меньше, чем даже у 7- ступенчатых вакуум-выпарных установок. Вместе с тем, с 1985г появились разработки ОНАПТ вымораживающих установок блочного типа (КТ2), у которых параметр  $j$  достигал 0,7 МДж на 1кг льда (рис. 1).

Поскольку на выходе вымораживающей установки есть лед, который необходимо расплавить, то целесообразно это осуществить с помощью жидкого холодильного агента после его конденсации. На рис. 4 представлено сравнение двух холодильных циклов: 1-2-3-4 (традиционный) и 1-2-3-4-5-6 (с рециклингом льда). Процесс плавления льда можно проводить за счет охлаждения конденсата в процессе 3-5. В результате эффективность холодильного цикла можно значительно повысить за счет внутренней регенерации энергии.

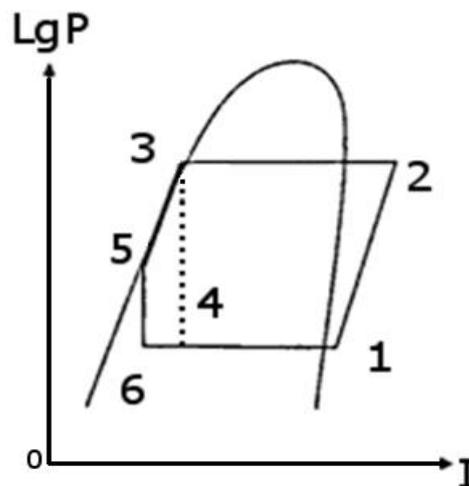


Рис. 4. Холодильный цикл вымораживающей установки с рециклингом льда.

Для практической реализации этой идеи в конструкции установки необходимо предусмотреть специальный аппарат – плавитель (рис. 5). Согласно сформулированной выше гипотезе использование «реверсных» потоков энергии приводит к росту энергетической эффективности установки. В качестве такого «реверсного» потока энергии используется энергия льда.

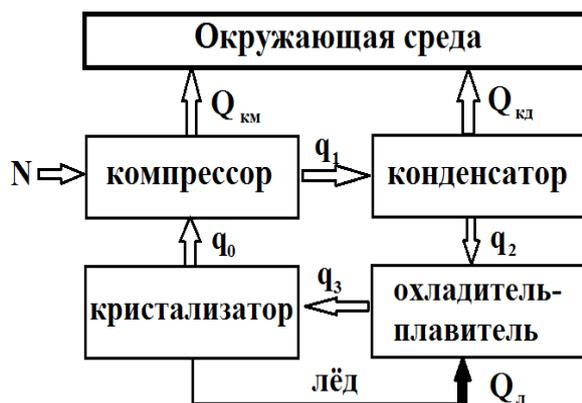


Рис. 5. Потoki энергии в инновационной установке с рециклингом льда.

Дальнейшее совершенствование установок блочного вымораживания основывалось на технической идее – использовать энергию полученного льда. Один из вариантов – вернуть ее в холодильный цикл.

Если холодильный агент после конденсатора (рис. 4) в процессе 3-5 переохладить перед дросселированием, то удельная холодопроизводительность в цикле увеличится на величину  $\Delta q$ .

$$\Delta q_0 = (i_1 - i_6) - (i_1 - i_4) \quad (6)$$

Как известно, качество процесса напрямую зависит от качества управления им, вследствие этого важность получает решение проблемы качественного управления процессами теплопередачи при направленной кристаллизации. Исходя из вышесказанного, исследования методик управления процессом

теплопередачи при направленной кристаллизации представляет большое научное и практическое значение для решения проблем обеспечения чистой водой [8,9].

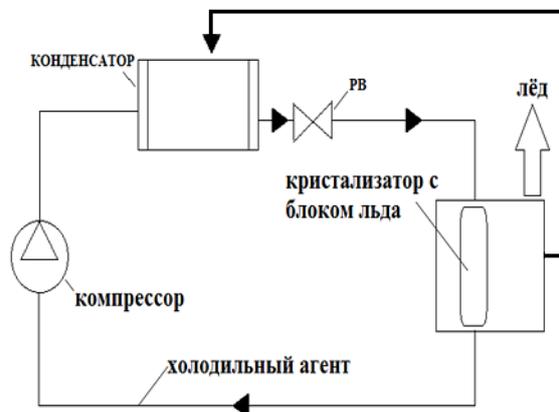


Рис.6. Схема вымораживающей установки с рециклингом льда.

С учетом плавителя первый закон термодинамики для схемы (рис. 5) определится следующим образом

$$N - Q_{км} = Q_{кд} - Q_o - Q_l \quad (7)$$

На основе соотношений (1-7) проведем анализ энергетической эффективности базовой схемы блочного вымораживания и инновационной (рис. 6). Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение элементов вымораживающих установок

| № | Элемент                            | Поток  | Потери энергии, % | Тепловой КПД |
|---|------------------------------------|--|-------------------|--------------|
| 1 | Компрессор                         | прямой   | 1                 | 0,99         |
| 2 | Конденсатор                        | прямой   | -                 | 2            |
| 3 | Кристаллизатор                     | прямой   | 5                 | 0,95         |
| 4 | Дроссель                           | прямой   | 4                 | 0,96         |
| 5 | Плавитель                          | реверсный  | 15                | 0,85         |
|   | Энергетические параметры установки | Потери энергии в прямых потоках – 10%<br>Возврат энергии реверсным потоком – 85% |                   |              |

Таблица сравнение энергоёмкости технологий

|                              | Цикл          |              |         |               |
|------------------------------|---------------|--------------|---------|---------------|
|                              | Теоретический | Традиционный | Блочный | Инновационный |
| Энергоёмкость<br>МДж/кг льда | 0,33          | 1,1          | 0,37    | 0,055         |

Точные значения определяются на основе материальных и тепловых балансов.

Интерес представляют соотношения материального баланса процессов кристаллизации и сепарирования, уравнения теплового баланса и термодинамические условия фазового равновесия в системе «раствор – лед». Рассмотрим балансовые модели процесса блочного вымораживания. На вход в кристаллизатор поступает раствор с концентрацией  $X_s$  в количестве  $G_s$  (рис. 7).

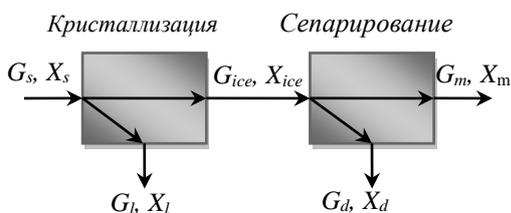


Рис.7. Схема материальных потоков.

Из концентратора выходит раствор с концентрацией  $X_l$  в количестве  $G_l$  и лед, масса которого  $G_{ice}$ . В порах льда содержится жидкость, концентрация которой в блоке льда –  $X_{ice}$ . После сепарирования отделяются стоки в количестве  $G_d$  с концентрацией  $X_d$ . Расплавленный лед, масса которого  $G_m$ , имеет концентрацию  $X_m$ . Практически легко измеряются параметры:  $G_s, X_s, G_l, X_l, G_d, X_d$ . Для расчета остальных параметров составим системы уравнений.

Для процесса кристаллизации:

$$\left. \begin{aligned} G_l + G_{ice} &= G_s \\ G_l X_l + G_{ice} X_{ice} &= G_s X_s \end{aligned} \right\} (8)$$

Из первого соотношения в (8) находится  $G_{ice}$ , которое подставляется во второе уравнение и, после несложных преобразований, определяется содержание сухих веществ в блоке льда:

$$X_{ice} = \frac{G_s X_s - G_l X_l}{G_s - G_l} (9)$$

Для процесса сепарирования:

$$\left. \begin{aligned} G_d + G_m &= G_{ice} \\ G_d X_d + G_m X_m &= G_{ice} X_{ice} \end{aligned} \right\} (10)$$

Значения  $G_{ice}$  и  $X_{ice}$  получены из расчета кристаллизатора. Аналогично (9) находятся концентрации солей в расплаве льда:

$$X_m = \frac{G_{ice} X_{ice} - G_d X_d}{G_{ice} - G_d} (11)$$

Рассмотрим схему энергетических потоков в установке блочного вымораживания для деминерализации воды.

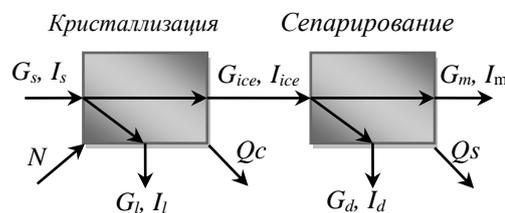


Рис.8. Схема энергетических потоков.

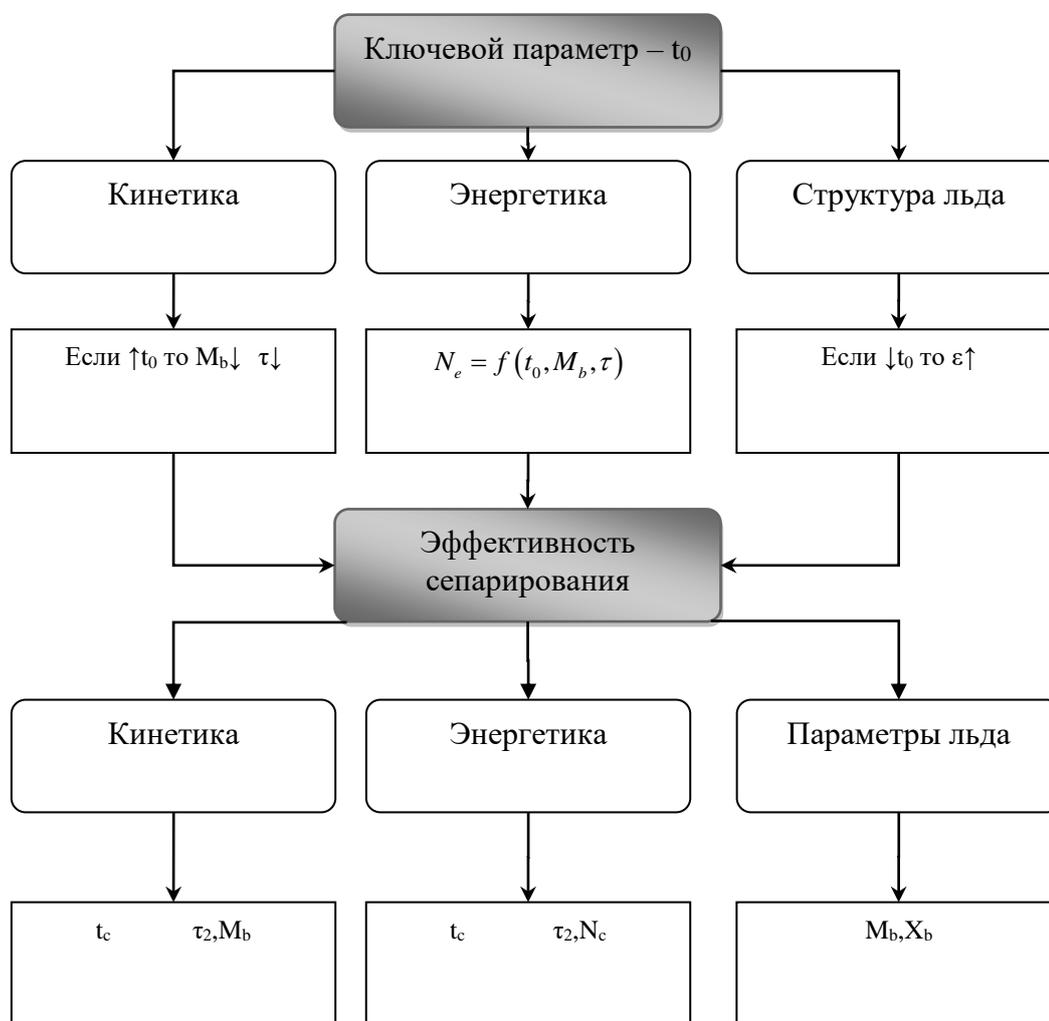
Согласно рис. 8 в технологическую линию извне поступает 2 потока энергии: с исходным сырьем ( $Q_m = G_s I_s$ ) и электрическая ( $N$ ). В общем случае энергия может расходоваться на работу компрессора, систему термостатирования при сепарировании блока льда и на работу внешних интенсификаторов процесса кристаллизации и сепарирования. Энергия  $N$  расходуется на охлаждение раствора от начальной температуры до температуры кристаллизации ( $Q_r$ ) и непосредственно на процесс льдообразования ( $Q_c = G_{ice} \Omega$ ).

**III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
СИСТЕМНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА  
МЕЗОУРОВНЕ**

Согласно принятой классификации технологическая линия по деминерализации воды относится к мезоуровню. На первом этапе моделирования важно определить технологический параметр, который имеет существенное значение и на кинетику, и на энергетику процессов кристаллизации и сепарирования. Таким связывающим параметром, который позволит «сшивать» математические модели этих двух стадий технологии, предлагается принять

температуру поверхности кристаллизации ( $t_0$ ). Тогда параметрическая модель мезоуровня примет вид (рис.9).

Именно температура  $t_0$  определяющим образом влияет на кинетику формирования твердой фазы (льда), на его структуру и на энергетические характеристики процесса кристаллизации. Температура  $t_0$  определяет время процесса  $\tau$  и массовый расход льда в блоке  $M_b$ . Структура блока льда (его пористость  $\epsilon$ ) также является функцией температуры  $t_0$ . В свою очередь, потребляемая установкой мощность, зависит от этих же параметров.



**Рис.9. Системный анализ взаимосвязи технологических параметров мезоуровня.**

Сочетание рассмотренных параметров первой стадии влияют на значение производительности по очищенной воде  $M_l$ , и на содержание солей в этой воде  $X_l$ . Важное значение на эффективность сепарирования оказывает температура  $t_c$ , при

которой организуется процесс сепарирования. Энергетические характеристики процесса сепарирования (необходимая для процесса мощность  $N_c$ ) зависят от времени процесса  $\tau_2$ .

На основе анализа (рис.9) формируется соответствующая параметрическая модель.

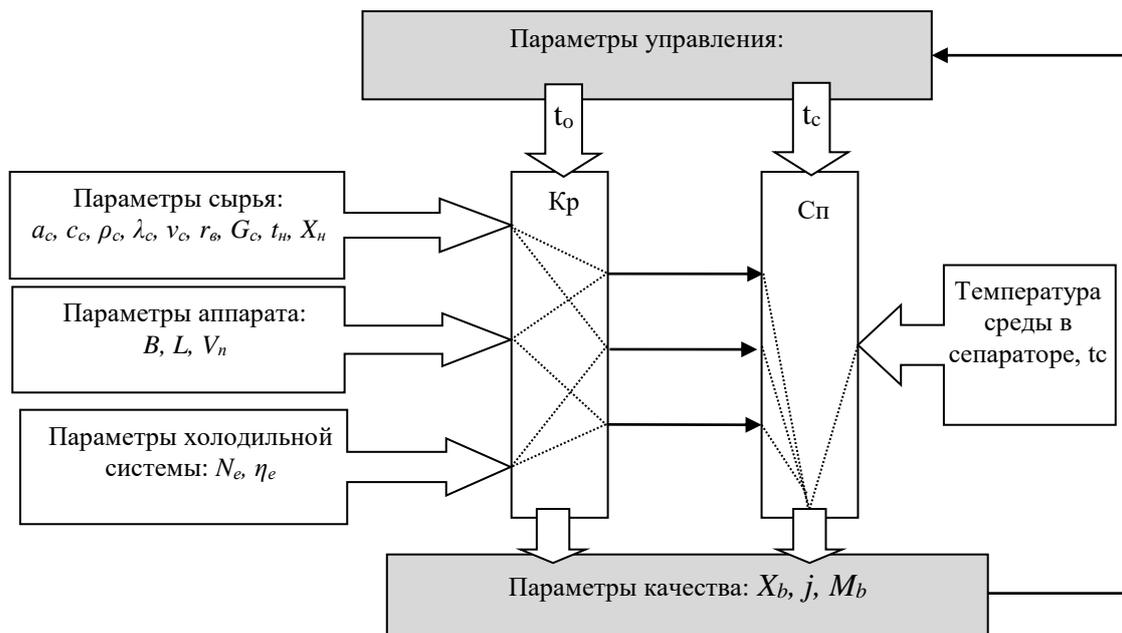


Рис.10. Параметрическая модель мезоуровня инновационной технологии низкотемпературного разделения при деминерализации воды.

Следующим этапом моделирования является составление математических моделей на микроуровне – уровне технологических аппаратов: блочного вымораживателя и сепаратора. Модель этих объектов необходима для синтеза системы управления потоками энергии на уровне технологической линии деминерализации воды.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ НА МИКРОУРОВНЕ

Аппаратурно-процессовая схема работы системы представлена на рис. 11. Из раствора на кристаллизаторах формируется блок кристаллов льда, после чего, оставшийся раствор, удаляется с концентратора. Сформированный блок льда отделяется от кристаллизатора и проходит этап гравитационного сепарирования. Непродолжительный процесс оттаивания сопровождается плавлением тонкого поверхностного слоя блока, вода, образовавшаяся в результате этого процесса, смывает раствор соли с поверхности блока и капиллярных объемов. После этого

проводится расплавление льда и получается очищенная вода. Исследование методик управления процессом теплопередачи при направленной кристаллизации и достижения максимальной энергоэффективности этого процесса имеет большое научное и практическое значение для решения проблем обеспечения чистой водой.

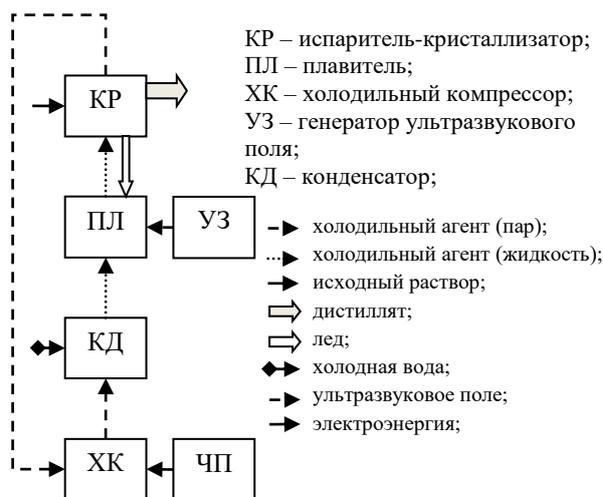


Рис.11. Аппаратурно-технологическая схема установки блочного вымораживания.

С помощью блочной вымораживающей установки с ультразвуковым генератором был проведен ряд опытов по изучению влияния ультразвукового излучателя на физические параметры процесса сепарирования (рис. 12,13).

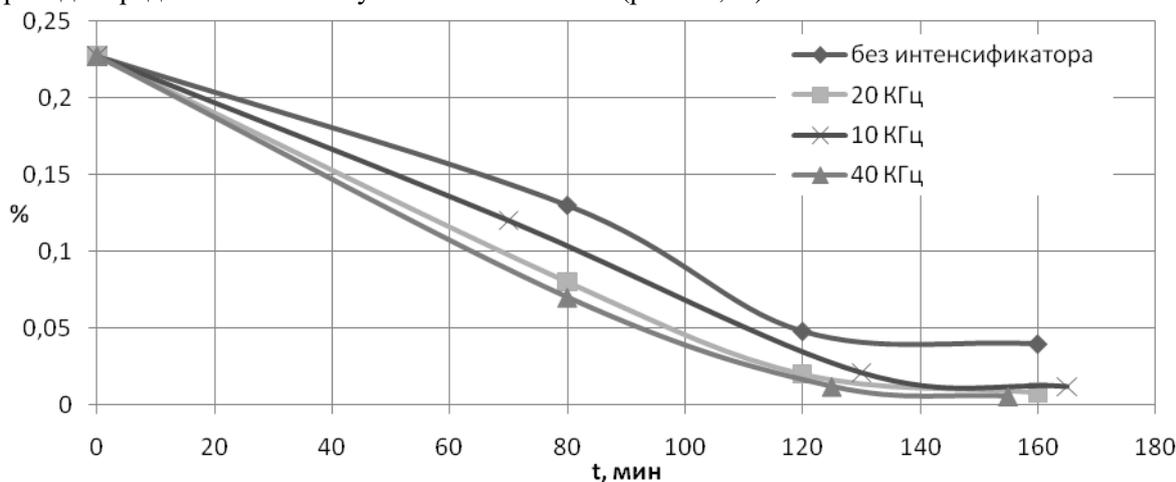


Рис.12. Влияние ультразвука на солесодержание в стоках.

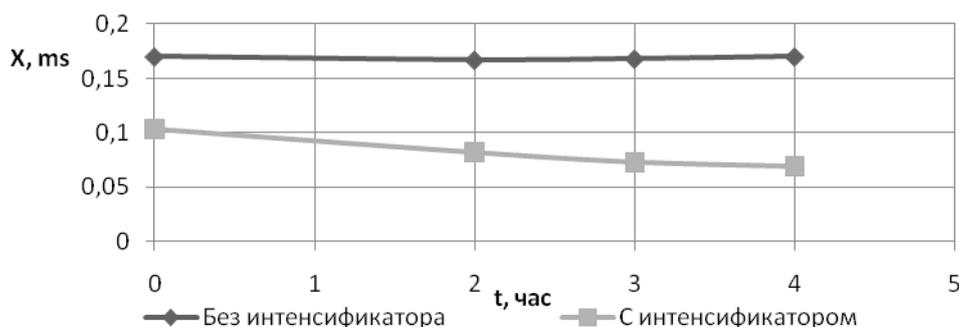


Рис.13. Влияние ультразвукового интенсификатора на изменение концентрации соли в блоке льда с течением времени.

Полученные графики (рис. 12) свидетельствуют, что применение ультразвука снижает концентрацию солей в блоке льда, а, следовательно, и его

пористость. Дополнительно была рассчитана зависимость средней пористости полученного блока льда от частоты ультразвука (рис. 14).

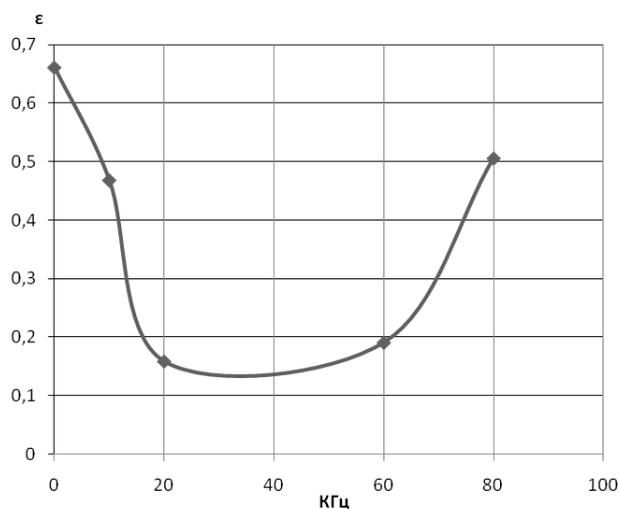


Рис.14. Зависимость средней пористости блока льда от частоты ультразвука.

Процесс сепарирования можно упрощенно рассматривать как разновидность процесса фильтрации, следовательно, можно применить эмпирический подход и установить константы фильтрования. На базе принципов расчета задач истечения составим упрощенную модель сепарирования блока льда. Примем допущение, что сепарируется идеальная жидкость. Тогда справедливо уравнение Бернулли:

$$P_0 + \rho w_0^2 + 2gH_0\rho = P_1 + \rho w_1^2 + 2gH_1\rho \quad (12)$$

Откуда:

$$w_1 = \sqrt{2g\Delta H + \frac{P_0 - P_1}{\rho}} \quad (13)$$

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

$$w_1 = \sqrt{2gH} \quad (14)$$

Формула (14) отражает максимально возможную скорость движения жидкости в капилляре. Действительная скорость рассчитывается по соотношению:

$$w_1 = k\sqrt{2gH} \quad (15),$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации.

Коэффициент фильтрации определяется экспериментальным путем. Он в комплексе характеризует свойства раствора и геометрические параметры канала. Естественно, он может использоваться исключительно для конкретной системы.

По результатам опытов масса фильтруемого раствора ( $G$ ) переводится в объем. Отношение этого объема к суммарному сечению каналов ( $f_k$ ) и расчетному времени ( $\tau$ ) даст действительную скорость сепарирования:

$$w_\delta = \frac{G_p\rho}{f_k\tau} \quad (16)$$

Соотношение максимальной и действительной скоростей течения даст искомый коэффициент фильтрации

$$k = \frac{w_1}{w_\delta} = \frac{\sqrt{2gH}}{G_p\rho} f_k\tau \quad (17)$$

В ходе экспериментов определяются расход и высота блока льда. Логично считать, что длина капилляра равна  $H$ . Суммарное значение сечения капилляров можно рассчитать через пористость ( $\epsilon$ ) блока и площадь поверхности испарителя ( $F_u$ ):

$$k = \frac{w_1}{w_\delta} = \frac{\sqrt{2gH}}{G_p\rho} F_u\epsilon\tau \quad (18)$$

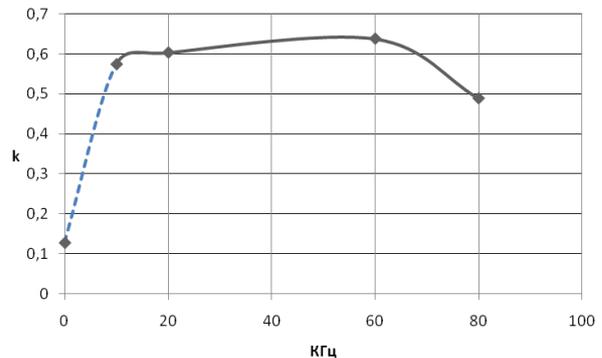
Внешнее воздействие на процесс УЗ полем учитывается:

$$k = AEu^n \quad (19),$$

а модифицированное число Эйлера ( $Eu$ ) рассчитывается в соответствии с мощностью УЗ излучателя ( $N$ ), его диаметра ( $d$ ) и частотой ( $f$ ).

$$Eu = \frac{N}{\rho d^5 f^3} \quad (20)$$

Приведем зависимость числа Эйлера и коэффициента фильтрации от частоты ультразвука.



**Рис.15. Зависимость коэффициента фильтрации от частоты ультразвука.**

Опираясь на полученные экспериментальные данные (рис. 15), а также формулу (20) был разработан метод решения и проведена идентификация итоговых коэффициентов, что позволило получить формулу описывающую зависимость коэффициента фильтрации от числа Эйлера. Определено, что в диапазоне частот от 20000 до 60000 Гц коэффициент фильтрации может определяться по формуле:

$$k = 0,35Eu^{-0,012} \quad (21)$$

Представим зависимость средней пористости блока льда от числа Эйлера в виде:

$$\varepsilon = BEu^m \quad (22)$$

Опираясь на полученные экспериментальные данные (рис. 15), а также формулу (22) был разработан метод решения и проведена идентификация итоговых коэффициентов, что позволило получить формулу описывающую зависимость средней пористости блока льда от числа Эйлера. В диапазоне частот от 20000 до 60000 Гц, зависимость пористости от числа Эйлера может быть представлена в виде:

$$\varepsilon = 4,39Eu^{0,0615} \quad (23)$$

Проведено сопоставление имеющихся экспериментальных данных с полученными теоретическими моделями, показавшее удовлетворительный результат (средняя погрешность 1,8%).

## V. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ

Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, поскольку процессы, возникающие при вымораживании, являются сложными и нестационарными. Поэтому важными становятся теоретический анализ и построение моделей. В данной работе рассмотрим некоторые подходы к изучению и моделированию процесса вымораживания, возможные принципы влияния пористости на этот процесс и влияние ультразвукового поля на повышение энергоэффективности процесса.

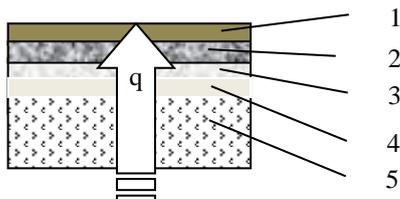


Рис.16. Физическая модель процесса вымораживания.

При направленной кристаллизации (рис. 16) на горизонтальной поверхности 1, температура которой ниже криоскопической температуры, формируется подложка в виде твердой фазы 2. Ниже растет двухфазный слой 3, состоящий из льда и раствора. Поверхность двухфазной зоны и раствор 5 разделяет пограничный слой 4. Управление процессом направленной кристаллизации основано на обеспечении необходимых условий формирования двухфазного слоя. Разность температур раствора и поверхности 1 определяют плотность теплового потока  $q$  и массовый поток льда  $M_l$ . Сложность моделирования процессов обусловлена не только фазовыми переходами, но и изменением по высоте слоя структуры двухфазного слоя. Нельзя игнорировать градиенты температур, концентраций и пористости по высоте слоя. Более того, эпюры этих параметров имеют нелинейный характер. От величины температуры в точке зависит концентрация раствора и пористость, а эти параметры определяют термическое сопротивление, т.е. производительность по росту льда и распределение температур в слое. Таким образом, задача является нелинейной, нестационарной и осложненной фазовыми переходами [5].

В идеальном теплофизическом представлении, процесс направленной кристаллизации должен приводить к появлению двухфазной зоны с нулевой пористостью. Такой консервативный способ управления процессом должен протекать при минимальной разнице температур, практически при криоскопической температуре. Теоретически, это позволит обеспечить нулевая пористость, однако скорость формирования блока льда будет бесконечно низкой. Использование любых методов интенсификации приводит к росту скорости намораживания, и происходит это ценой получения пористой структуры. Следует заметить, что с увеличением глубины слоя при всех прочих неизменных параметрах пористость возрастает. Соответственно возрастает термическое сопротивление двухфазного слоя, снижается интенсивность формирования блока льда, ухудшается качество разделения раствора.

Поскольку аналитическая модель процесса кристаллизации является достаточно сложной [5], логичным кажется провести численное моделирование процесса кристаллизации, а

также представить температурное поля в твердой фазе двухфазного слоя. В процессе кристаллизации температура ( $t_p$ ), концентрация ( $X_p$ ) и пористость ( $\varepsilon$ ) каждого среза слоя меняются, в зависимости от толщины слоя ( $h$ ), поэтому:

$$\lambda_e(h) = \varepsilon(h) \cdot \lambda_p(t, X_p) + (1 - \varepsilon(h)) \cdot \lambda_n(t) \quad (24)$$

Используя формулу (24) и учитывая, что значение  $\varepsilon$  изменяется по линейному закону, получим семейство графиков, представленное на рисунке.

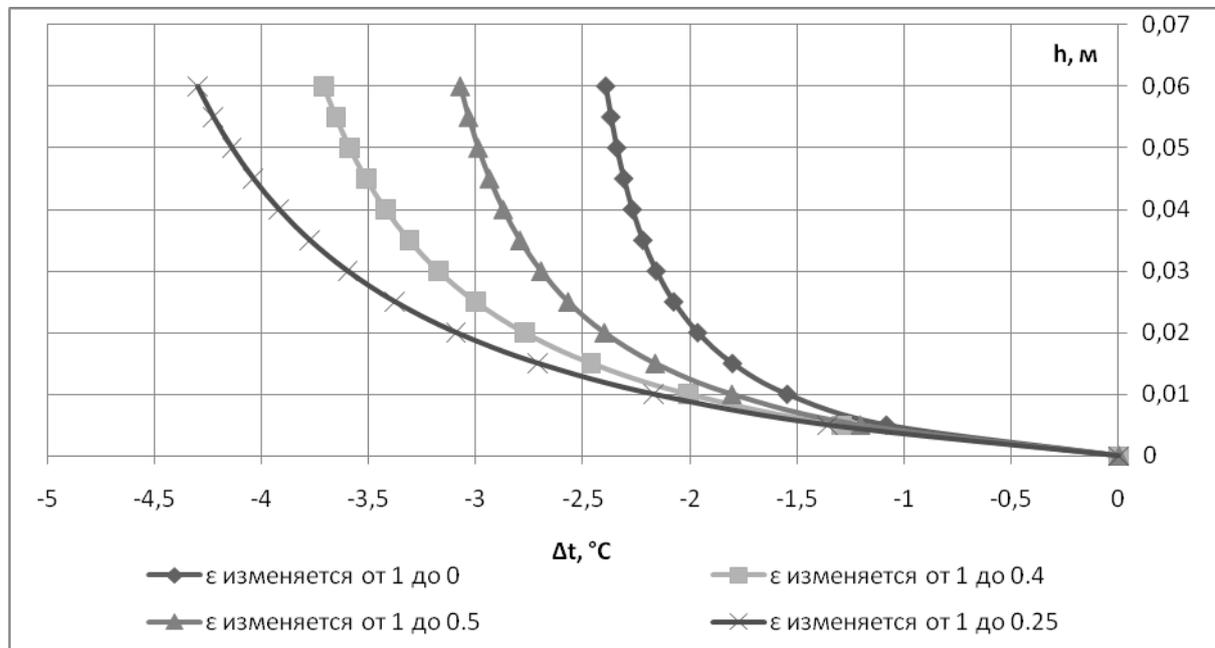


Рис.17. Номограмма зависимости  $\Delta t(h)$ ,  $\Delta t = f(\Delta h, \varepsilon)$ .

Как показывает численное моделирование, пористость значительно влияет на тепло- и массообмен в процессах кристаллизации и сепарирования. Исходя из экспериментальных данных, организация вышеупомянутых процессов в условиях воздействия ультразвукового поля будет способствовать более плотной упаковке кристаллов льда в блоке, а, следовательно, приведет к уменьшению пористости, что, в свою очередь, приводит к более качественному разделению раствора и повышению энергетической эффективности очистки воды.

## VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате экспериментального и математического моделирования установлено, что пористость структуры льда значительно влияет на процессы тепло- и массообмена. В рамках работы исследовано влияние ультразвука на процесс кристаллизации и сепарирования блока льда. Выявлено, что применение генераторов

ультразвукового поля позволяет обеспечить меньшую концентрацию солей в стоках и твердой фазе, что объясняется меньшим значением пористости и более плотной упаковкой кристаллов. При этом следует заметить, что низкотемпературное разделение под влиянием ультразвуковых полей характеризуется затратами энергии значительно ниже по сравнению с традиционной дистилляцией.

Процесс сепарирования был рассмотрен как разновидность процесса фильтрования и применен эмпирический подход для расчета константы фильтрования, получены формулы описывающие зависимость коэффициента фильтрации от числа Эйлера и зависимость пористости от числа Эйлера, что позволяет проводить конструкторский расчет блочных вымораживающих установок.

## VII. ВЫВОДЫ

Предложен инструмент количественной оценки эффективности прямых и «реверсных» потоков энергии, и их влияние на тепловой КПД системы. В качестве

«реверсного» потока в работе предложено использовать энергию льда. Методика применена для исследования низкотемпературных систем блочного вымораживания в технологиях деминерализации воды. Показано, что использование энергии льда в «реверсном» потоке позволяет до 85% потерянной в прямых потоках энергии вернуть в холодильный цикл, что снижает энергоёмкость технологии в 6 раз.

Впервые установлено влияние ультразвукового поля на кинетику процесса сепарирования при блочном вымораживании. Получены частные зависимости эффективности разделения при сепарировании блока льда от параметров ультразвукового поля. Установлены изменения пористости и соледержания в блоке льда во времени при разных частотах УЗ поля. В диапазоне частот 20-60 кГц плотность упаковки кристаллов льда растёт, а пористость снижается по сравнению с процессом кристаллизации без УЗ поля в 2.5 раза. В результате пропорционально растёт степень очистки воды, что в технологиях водоподготовки важно. Базы экспериментальных данных обобщены и рекомендована инженерная методика расчёта коэффициента скорости истечения при сепарировании, и пористости в зависимости от модифицированного авторами волнового числа Эйлера.

Методами численного моделирования показана возможность управления процессом формирования структуры блока льда и теплопередачей при кристаллизации. Результаты моделирования представлены в виде номограммы, которая позволяет определить распределение температур по высоте блока льда в зависимости от величины пористости блока.

#### ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Four billion people facing severe water scarcity. Science Advances. Available at: <http://advances.sciencemag.org/content/2/2/e1500323.full>.1 (accessed 10 November 2017).
- [2] Midorenko D. A., Krasnov V. S. (2009) *Monitoring vodnykh resursov: Uchebnoe posobie* [Monitoring of water resources. Tutorial]. Tver: Tver. gos. un-t. (in Russian).
- [3] Khvesyuk M. A. Vodni resursy – investytsiia sohodennia i perspektyva maibutnoho [Water resources - investment of present and future prospects]. Investytsii: praktyka ta dosvid – Investments: practice and experience, 2009, no. 1, pp. 2-8. (In Ukrainian).
- [4] Antipov S. T., Dobromirov V. E., Ovsyannikov V. Yu. *Teplo- i massoobmen pri kontsentririvanii zhidkih sred vyimorazhivaniem* [Heat and mass transfer at the concentration of liquids by freezing]. Voronezh, 2004. 208p. (in Russian).
- [5] Burdo O. G., Trishin F. A., Trach A. Modelirovanie protsessa kristallizatsii vodyi v ultrazvukovom pole. [Modeling the process of water crystallization in an ultrasonic field]. *Harchova nauka i tehnologiya – Food Science and Technology*, 2015, pp. 75–80. (in Russian).
- [6] Ryabchikov B. E. *Sovremennyye metodyi podgotovki vodyi*. [Modern methods of water treatment]. Minsk, 2005, 328p.
- [7] Burdo O. G., Milinchuk S. I., Mordynskiy V. P., Kharenko D. A. *Tekhnika blochnogo vymorazhivaniya* [Technique of block freezing]. Odessa, 2011. 294 p.
- [8] Karl F. Graff, Juan A. Gallego-Juárez. *Power Ultrasonics. Applications of High-intensity Ultrasound*. Woodhead Publishing, 2014, 1166p.
- [9] J. David N. Cheeke. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, Second Edition. CRC series in pure and applied physics, 2017, 504p.
- [10] Leighton T.G. *The Acoustic Bubble*. London: Academic Press, 1994. 611 p.
- [11] Mason T.J., Lorimer J.P. *Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*. N.Y.: Wiley&Sons, 2002. 314 p.
- [12] Ubbenjans B., Frank-Rotsch Ch., Virbulis J., Nacke B., Rudolph P. Influence of Ultrasonic Treatment on Crystal Growth From Melt. International Scientific Colloquium, Modelling for Material Processing, Riga, September 16-17, 2010, pp. 79-84.
- [13] John R.G. Sander, Brad W. Zeiger, Kenneth S. Suslick. (2014) Sonocrystallization and sonofragmentation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, pp. 1908-1915.
- [14] A. Hiratsuka and D. Pathak, "Application of Ultrasonic Waves for the Improvement of Water Treatment," *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 5 No. 6, 2013, pp. 604-610. doi: 10.4236/jwarp.2013.56061.
- [15] Deora, NS, Misra, NN, Deswal, A, Mishra, HN, Cullen, PJ & Tiwari BK (2013) Ultrasound for Improved Crystallisation in Food Processing, *Food Engineering Reviews*, 5(1):36-44.
- [16] Wagh, Ashwini & Birkin, Peter & Martini, Silvana. (2016). High-Intensity Ultrasound to Improve Physical and Functional Properties of Lipids. Annual review of food science and technology. 7. 10.1146/annurev-food-041715-033112.

- [17] Chemat, Farid & , Zill-e-Huma & Khan, Muhammad. (2010). Applications of Ultrasound in Food Technology: Processing, Preservation and Extraction. *Ultrasonics sonochemistry*. 18. 813-35. 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023.
- [18] Kasaai, M. (2013) Input power-mechanism relationship for ultrasonic Irradiation: Food and polymer applications. *Natural Science*, 5, 14-22. doi: 10.4236/ns.2013.58A2003.
- [19] Ultrasonication Affects Crystallization Mechanisms and Kinetics of Anhydrous Milk Fat. Rikke P. Frydenberg, Marianne Hammershøj, Ulf Andersen, and Lars Wiking. *Crystal Growth & Design* 2013 13 (12), 5375-5382. DOI: 10.1021/cg4012923.
- [20] Kentish, Sandra & Feng, Hao. (2014). Applications of Power Ultrasound in Food Processing. Annual review of food science and technology. 5. 10.1146/annurev-food-030212-182537.
- [21] Mahmoud Shatat, Saffa B. Riffat; Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 9, Issue 1, 1 March 2014, Pages 1–19, <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>
- [22] Choi, P. K. (2017). Sonoluminescence and acoustic cavitation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(7S1), 07JA01.
- [23] Suslick, K. S. (1989). The chemical effects of ultrasound. *Scientific American*, 260(2), 80-87.
- [24] Dezhkunov, N. V., & Leighton, T. G. (2004). Study into correlation between the ultrasonic capillary effect and sonoluminescence. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 77(1), 53-61.
- [25] Dezhkunov, N. V., Francescutto, A., Ciuti, P., & Ignatenko, P. (2003). Ultrasonic capillary effect and sonoluminescence. In *Proc. of 5-th World Congress on Ultrasonics (WCU 2003)*. Paris (pp. 597-600).
- [26] Lang, R. J. (1962). Ultrasonic atomization of liquids. *The journal of the acoustical society of America*, 34(1), 6-8.

**Сведения об авторах.**



**Тришин Федор Анатольевич.**  
Одесская национальная академия пищевых технологий, кандидат технических наук.  
Область научных интересов связана с разработкой и исследованием инновационных технологий автоматизации технологических и бизнес процессов  
[fatrishyn@gmail.com](mailto:fatrishyn@gmail.com)



**Орловская Юлия Витальевна.**  
Одесская национальная академия пищевых технологий, аспирант.  
Область научных интересов: процессы тепло- и массообмена  
[juliaorlovskaya2@gmail.com](mailto:juliaorlovskaya2@gmail.com)



**Трач Александр Романович.**  
Одесская национальная академия пищевых технологий, магистр.  
Область научных интересов: управление бизнес-процессами, моделирование технологических процессов  
[lointc@gmail.com](mailto:lointc@gmail.com)