

3. McNeill, L.S., Edwards M. (2001). Iron pipe corrosion in distribution system. Journal – American Water Works Association, 93 (7), 88–100.
4. Belikov S.E. and al. (2007). Vodopodgotovka: Spravochnik. Moskwa: Akva-Term.
5. Munter, R., Ojaste, H., Sutt, J. (2005). Complexed Iron Removal from Groundwater. Journal of Environmental Engineering, 131, 1014–1020.
6. Dolinskiy, A. A., Ivanitskiy G. K. (1997). Printsipy razrabotki novyih energo-resurso-sberegayuschih tehnologiy I oborudovaniya na osnove metodov diskretno-impulsnogo vvoda energii. Promyshlennaya tep-lotekhnika, 19(4-5), 13-25.
7. Dolinskiy, A. A. (1996). Ispolzovanie printsipa diskretno-impulsnogo vvoda energii dlya sozdaniya effektivnyih energosberegayuschih tehnologiy. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal, 69 (6), 35-43.
8. Nakorchevskiy, A. I., Basok, B. I., Ryzhkova, T. S. (2002). Gidrodinamika rotorno-pulsatsionnyih apparatov. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal, 75(2), 58–68.

УДК: 628.16.045.5–047.58:628.165

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Тришин Ф.А к.т.н, Трач А.Р. магистр, Орловская Ю. В. аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий

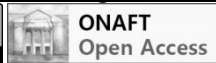
ENHANCEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE CRYSTALIZATION OF THE WATER IN THE ULTRASONIC FIELD

Trishin F. A., Ph.D., Trach A.R. master's degree, Orlovskaya Yu.V. post-graduate student
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Аннотация. Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей. Было проведено численное моделирование влияния пористости на процесс кристаллизации, установлено, что пористость блока льда является значительным фактором, влияющим на формирование двухфазного слоя. Приведены энергетические и конструктивные преимущества вымораживающих установок блочного типа. Подтверждено превосходство блочного вымораживания с применением ультразвука над другими методами очистки воды.

Abstract. In the world, 5000 km³ of fresh water are used every year. This amounts to 11% of the annual runoff of all rivers in the world. More than half of the world's future population will have been affected by severe water shortages by 2050. Such prospects significantly increase the importance of water purification. There is a growing interest in the technologies of block freezing for water cleaning. Systems of this type are characterized by simplicity of design, compactness, and energy efficiency. Due to its principle, block freezing eliminates systemic losses of cold. Since the efficiency of the process directly depends on the quality of its management, there arises a problem of controlling the processes of heat transfer with directional crystallization. In the real world, it is hard to conduct researches of heat transfer process due to its complexity and nonstationarity. That is why theoretical analysis and theoretical models are critically needed. In an ideal thermophysical conditions, the directional crystallization process must take place when the substrate is grown with zero porosity. Any methods of intensification can lead to an increase of the rate of freezing, however it will be accompanied by a porous structure formation. During the crystallization process, temperature, concentration, and porosity of each layer of the substrate are changed, so it is problematic to find an analytic solution to the problem. During the current study, the numerical model of the heat transfer process was obtained. It was found that the porosity of the ice structure has a significant effect on the processes of heat and mass transfer. It was decided to study the process of freezing in the ultrasonic field. The experiments were carried out using an ultrasonic generator. It was found that the optimum temperature is observed when ultrasound has the frequency of 20 kHz. At the higher frequency, the water temperature rises. By solving the equations of material balance, a formula for determining the porosity of the ice block was obtained. Thus, the optimization task is to find the regimes and methods with which the nec-

essary efficacy of ice formation can be achieved. At the same time, acceptable parameters for the density of the ice crystals must be present.

Ключевые слова: моделирование, кристаллизация, пористость, концентрация, температура, теплопередача, перколяция, фракталы.

Keywords: modeling, crystallization, porosity, concentration, temperature, heat transfer, percolation, fractals.

Анализ источников

Ежегодно в мире расходуется 5000 км³ пресной воды, или 11% годового стока всех рек мира. Доступные природные ресурсы пресной воды крайне неравномерно размещены на нашей планете, значительная часть крупнейших рек мира протекает в малонаселенных регионах. В густонаселенных областях относительно немного больших рек, и их воды интенсивно используются. Все это усложняет водоснабжения человечества, на текущий момент примерно одна треть населения Земли испытывает дефицит пресной воды [1].

К 2025 году в связи с ростом численности населения, ситуация существенно ухудшится. Такие перспективы значительно повышают важность очистки 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 [2,3]. Возрастает интерес к использованию низкотемпературных технологий водоподготовки, и, в частности, к технологиям блочного вымораживания. Для установок этого типа характерны простота конструкции, компактность и энергетическая эффективность. Принцип блочного вымораживания устраняет системные потери холода, которые характерны для традиционных установок криоконцентрирования [4,5].

Формулировка проблемы. Физике процесса опреснения вымораживанием удачно соответствуют установки блочного типа (рис. 1).

Схема работы выглядит следующим образом. Из раствора на кристаллизаторах формируется блок кристаллов льда, после чего оставшийся раствор удаляется из концентратора. Образовавшийся блок льда отделяется от кристаллизатора и осуществляется гравитационное сепарирование. Непродолжительное оттаивание сопровождается плавлением тонкого поверхностного слоя блока, образовавшаяся при этом вода смывает раствор соли из капиллярных объемов и с поверхности блока. Далее производится расплав льда и получение очищенной воды. Теплота плавления льда используется в холодильном цикле для снижения температуры холодильного агента перед дросселированием. Таким образом, можно обеспечить непрерывный процесс опреснения, процесс легко механизировать, им просто управлять. В качестве охлаждающей среды можно использовать холодильный агент или холодный воздух из окружающей среды [6].

Исходные входные потоки (рис.1) соответствуют параметрам водопроводной воды. На выходе задается допустимая концентрация солей в дистилляте.

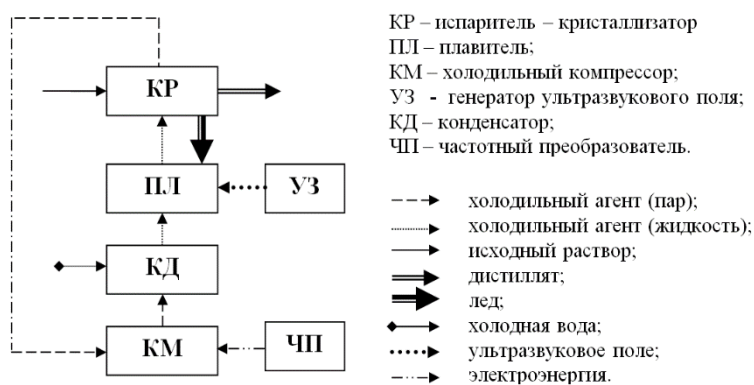


Рис. 1. Аппаратурно-процессовая схема установки блочного вымораживания.

ного преобразователя. Уменьшение холодильной мощности с помощью регулирующего вентиля является простым и удобным способом, но с энергетической точки зрения этот принцип не эффективен. Использование в схеме частотного преобразователя является более дорогим решением, но позволяет плавно перестраивать холодильную машину на необходимую мощность при максимальной энергетической эф-

Техническая идея схемы состоит в использовании рециклинга льда и частотного преобразователя для регулирования холодильной производительности машины. Система должна эффективно работать как в первом цикле (при запуске установки при отсутствии льда в плавителе), так и в последующих циклах, когда происходит плавление льда. Возврат энергии льда в холодильный цикл может существенно снизить затраты энергии. Но для этого необходимо изменить характеристики компрессора, что предлагается осуществлять с помощью частот-

фективности. Особенно важно иметь такую возможность в рассматриваемой схеме с рециклингом льда, где следует реагировать на тепловые режимы плавителя.

Поскольку эффективность процесса напрямую зависит от качества управления им, возникает проблема управления процессами теплопередачи при направленной кристаллизации. Исходя из требований энергоэффективности, исследование методик управления процессом теплопередачи при направленной кристаллизации представляет большое научное и практическое значение для решения проблем обеспечения чистой водой. Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей.

Цель работы. В данной работе рассмотрим подходы к аналитическому и экспериментальному моделированию процесса вымораживания, а также возможные принципы влияния на пористость и на процесс вымораживания.

Результаты математического моделирования. При направленной кристаллизации (рис. 2) 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 по схеме (рис.2) 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 [7,8].

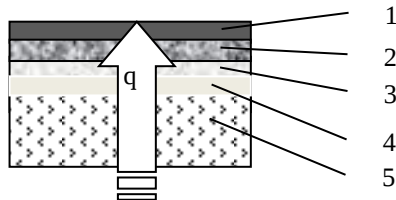


Рис. 2. Физическая модель процесса вымораживания.

В идеальном теплофизическом представлении процесс направленной кристаллизации должен проходить при выращивании подложки с нулевой пористостью. Такой консервативный способ управления процессом должен протекать при минимальной разнице температур, практически при криоскопической температуре. Теоретически обеспечится нулевая пористость, однако скорость формирования блока льда будет бесконечно низкой. Любые методы интенсификации приведут к росту скорости кристаллизации, но ценой получения пористой структуры. При расчете установок блочного вымораживания необходимо знание о влиянии пористости на процесс очистки воды. Поэтому экспериментальные исследования пористой структуры представляют большой интерес.

Поскольку найти аналитическое решение проблемы достаточно проблематично, логичным кажется провести численное моделирование процесса кристаллизации.

В процессе кристаллизации температура (t_p), концентрация (X_p) и пористость (ϵ) каждого среза слоя меняются, в зависимости от толщины слоя (h), поэтому:

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

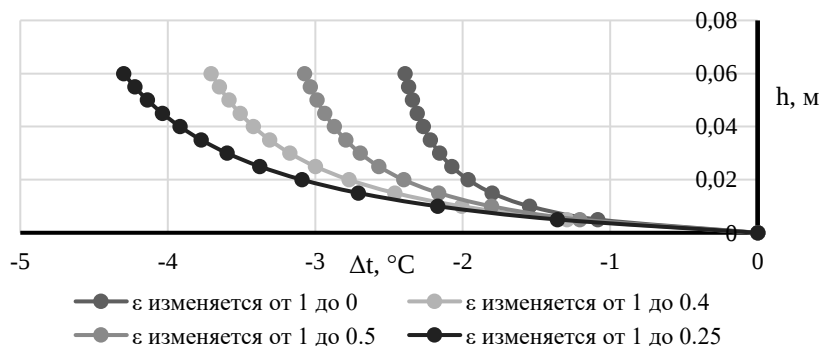


Рис. 3. Графики изменения температуры по высоте канала.

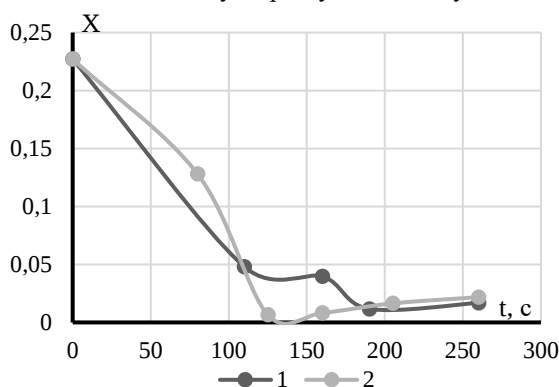
льда, поэтому актуальной является задача моделирования этой структуры и определение ее влияния на

Используя формулу (1) и учитывая, что значение ϵ изменяется по линейному закону, получим семейство графиков, представленное на рисунке 3.

По приведенным графикам можно сделать вывод, что возможность эффективного воздействия на процесс кристаллизации во многом определяются достоверностью представлений о строении пористой структуры

процессы тепло- и массообмена. Как показывает обзор литературы, эта проблема еще не решена в полной мере, потому было принято решение провести экспериментальное моделирование процесса вымораживания воды. Предполагается организация локального воздействия ультразвуковым генератором на поверхность фазового контакта «лед-вода», что позволит осуществлять формирование блока льда с плотной упаковкой кристаллов, а на стадии сепарирования – более эффективную эвакуацию растворов из пористого объема блока льда. Блок льда – это своеобразная система с порами (капиллярами), при воздействии ультразвука молекулы незамерзшего солевого раствора расшатываются, и облегчается их выход из пористой структуры блока, это теоретически позволяет значительно сократить время сепарирования. Исходя из результатов математического моделирования, пористость оказывает значительное воздействие на тепло- и массообмен в процессах кристаллизации и сепарирования. В работе формулируется гипотеза, что организация процессов кристаллизации в условиях воздействия ультразвукового поля будет способствовать более плотной упаковке кристаллов льда в блоке, а, следовательно, к уменьшению пористости. Это станет предпосылкой для более качественного разделения раствора.

Результаты экспериментальных исследований. С помощью блочной вымораживающей установки с ультразвуковым генератором был проведен ряд опытов исследующих влияние мощности, частоты и положения ультразвукового излучателя на процесс блочного вымораживания (рис. 4,5).



1 – без ультразвука,
2 – с применением ультразвука.

Рис. 4. Влияние ультразвука на солесодержание в стоках.

Для исследования влияния ультразвука на процессы кристаллизации и сепарирования был применен генератор ультразвуковых волн с переменной частотой (рис. 5, 6). Установлено, что минимальный прирост температуры наблюдается при влиянии ультразвука частотой 20 кГц. При более высокой частоте температура воды повышается, что ухудшает результаты в рамках решения задач вымораживания.

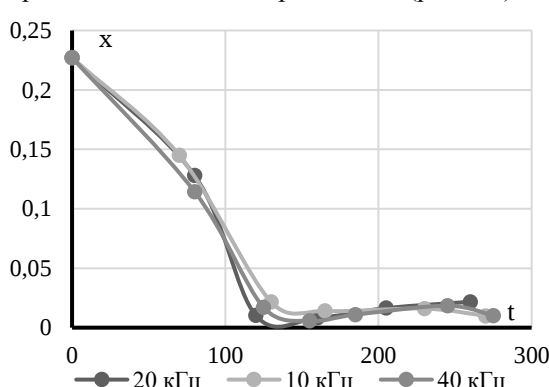
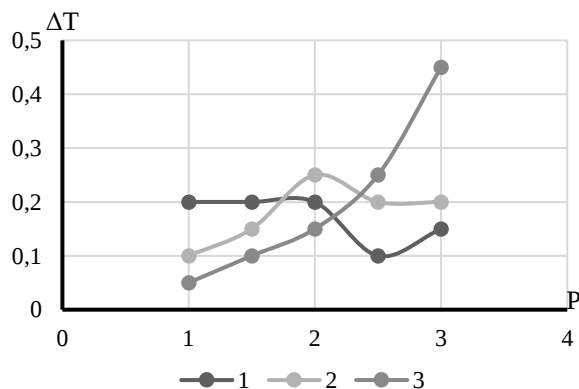
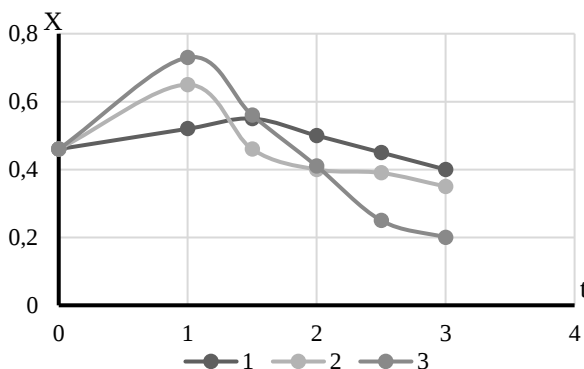


Рис. 5. Влияние ультразвука разной частоты на солесодержание в стоках.



1 – 6 кГц, 2 – 10 кГц, 3 – 20 кГц.

Рис. 6. Зависимость прироста температуры от мощности при разной частоте ультразвука.

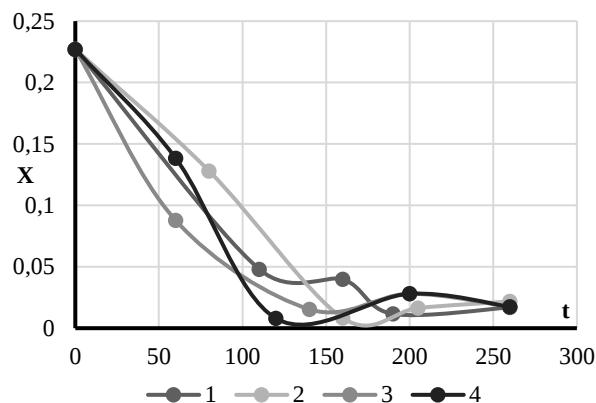


1 – 30 минут, 2 – 1 час, 3 – 2 часа.

Рис. 7. Влияние времени кристаллизации на солесодержание в стоках.

Опытным путем было установлено, что наилучший результат дал эксперимент с применением генератора частотой 20 кГц и длительностью кристаллизации 2 часа. Далее эксперименты проводились при различном месторасположении самого интенсификатора.

Установлено, что наибольший эффект на процессы кристаллизации и сепарирования оказал генератор с частотой ультразвука 20 кГц, расположенный в центре на расстоянии 1 см от блока льда с кольцом-ограничителем (рис. 8).



1 – сбоку; 2 – вплотную; 3 – центр на расстоянии 1 см; 4 – центр на расстоянии 1 см с кольцом-ограничителем.

Рис. 8. Зависимость количества соли в объеме раствора от времени с применением ультразвука частотой 20 кГц при различном расположении относительно блока льда.

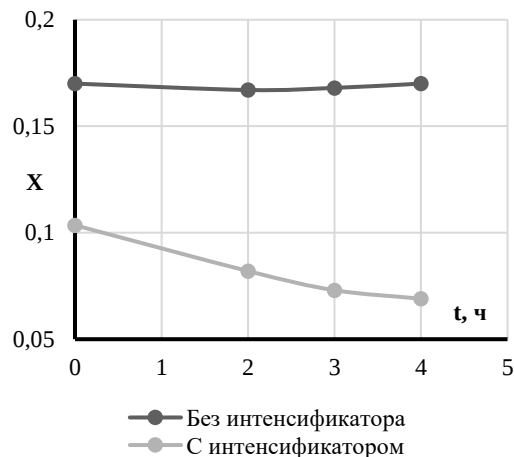


Рис. 9. Влияние ультразвукового интенсификатора на изменение концентрации соли в блоке льда с течением времени.

Путем решения уравнений материального баланса получена формула для нахождения концентрации соли в блоке льда, где M_n – начальная масса раствора с концентрацией солей X_n , $M(\tau)$ – текущая масса раствора с концентрацией солей $X(\tau)$:

$$X(\tau) = \frac{M_n X_n - M(\tau) X(\tau)}{M_n - M(\tau)} \quad (2)$$

Проведены опыты по определению концентрации солей в блоке льда с применением ультразвукового интенсификатора и без. Полученные графики (рис. 9) свидетельствуют, что применение ультразвука снижает концентрацию солей в блоке льда, а, следовательно, и его пористость.

Исходя из результатов опытов, можно сделать вывод, что применение ультразвуковых интенсификаторов в установках блочного вымораживания позволяет улучшить параметры блока льда и увеличить энергетическую эффективность процесса.

Выводы

1. Установлено, что пористость структуры льда оказывает значительное влияние на процессы тепло- и массообмена при формировании блока льда.
2. Разработана и проанализирована математическая модель влияния пористости блока льда на теплофизические процессы.
3. Результаты исследований показали, что наибольший эффект на процессы интенсификации и сепарирования оказал генератор с частотой ультразвука 20 кГц, расположенный в центре на расстоянии 1 см от блока льда с кольцом-ограничителем.
4. Применение ультразвука в процессе кристаллизации и сепарирования блока льда снижает количество солей в блоке и повышает энергетическую эффективность работы установки блочного вымораживания.

Литература

1. Хвесик М.А., Мандзик В.М. Водні ресурси – інвестиція сьогодення і перспектива майбутнього // Інвестиції: практика та досвід. 2009. №1. С. 2–8.
2. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды. Минск, 2005.
- Бурдо О.Г., Офатенко О.О. Анализ процессов деминерализации воды // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2009. №35. С. 287–292.
3. Бурдо О. Г. Холодильные технологии в системе АПК. Одесса: Полиграф, 2009. 288 с.
4. Антипов С.Т., Добромиров В.Е., Овсянников В.Ю. Тепло- и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием. Воронеж: гос. технол. акад. Воронеж, 2004. 208 с.

5. Техника блочного вымораживания / О. Г. Бурдо и др. Одесса: Полиграф, 2011. – 294 с.
6. Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Трач А.Р. Процессы кристаллизации воды в ультразвуковом поле воды // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. Т.2, вип.45. С. 80-86.
7. Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Трач А.Р. Моделирование процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле // Харчова наука і технологія. 2015. 1(30). С. 75–80.

References

1. Hvesik M. A. (2009). Vodni resursi – Investitsiya sogo denniya i perspektiva maybutnogo. Investitsiyi: praktika ta dosvid, 1, 2-8.
2. Ryabchikov B. E. (2005). Sovremennyye metodyi podgotovki vodyi.
3. Burdo O. G., Ofatenko O. O. (2009). Analiz protsessov demineralizatsii vodyi. Zbirnik naukovih prats ONAHT, 35, 287–292.
4. Burdo O. G. (2009). Holodilnyie tehnologii v sisteme APK.
5. Antipov S. T., Dobromirov V. E., Ovsyannikov V. Yu. (2004). Teplo- i massoobmen pri kontsentrirovanii zhidkih sred vyimorazhivaniem.
6. Burdo O. G., Milinchuk S. I., Mordynskiy V. P., Harenko D. A. (2011). Tehnika blochnogo vyimorazhivaniya.
7. Burdo O. G., Trishin F. A., Trach A. R. (2014). Protsessyi kristallizatsii vodyi v ultrazvukovom pole. Naukovi pratsi Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy, 80–86.
8. Burdo O. G., Trishin F. A., Trach A. R. (2015). Modelirovanie protsessa kristallizatsii vodyi v ultrazvukovom pole. Harchova nauka i tehnologiya, 75–80.