
А. Чернявский

**МИНИМИЗАЦИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОПРЕСНИТЕЛЕЙ**

В настоящее время подавляющее большинство способов получения электроэнергии так или иначе наносит вред окружающей среде. При этом объемы мирового энергопотребления постоянно увеличиваются. Многие регионы мира испытывают дефицит пресной воды, опреснение воды представляет собой технически сложный процесс. В работе рассмотрена возможность применения криоконцентратора объемного принципа действия с предварительным охлаждением для получения пресной воды питьевого качества. А также влияние теплообменной поверхности сложной формы поперечного сечения на увеличение энергоэффективности опреснителей.

Ключевые слова: энергосбережение, опреснение воды, вымораживание, ледообразование, очистка воды, кристаллизатор.

УДК: 621.57

EDN: NMLVFM

DOI: 10.51905/2073-038_2025_2S_175

JEL: Q57

Александр Васильевич Чернявский – аспирант 1-го курса кафедры «Техника низких температур им. П. Л. Капицы», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва).

Мария Андреевна Угольникова – научный руководитель: кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника низких температур им. П. Л. Капицы», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва).

Введение

Энергетика является одним из источников негативного воздействия на окружающую среду, а следовательно, и на человека. Она оказывает воздействие на атмосферу, вызывая потребление кислорода, выделение газов, влаги и твердых частиц. Наносится ущерб гидросфере, включая потребление водных ресурсов, создание искусственных водохранилищ, сброс загрязненных и подогретых вод, а также жидких отходов. Наконец, литосфера подвергается воздействию в виде потребления ископаемых энергоносителей, изменений в ландшафте и выбросов токсичных веществ.

Несмотря на отмеченные факторы, мировой рост потребления электроэнергии постоянно увеличивается, что усугубляет экологические проблемы и требует поиска устойчивых решений. В условиях климатических изменений и необходимости снижения выбросов парниковых газов развитие возобновляемых источников энергии становится все более актуальным направлением для минимизации негативного воздействия энергетики на окружающую среду и здоровье человека.

Негативное воздействие на окружающую среду при производстве электроэнергии

В настоящее время среди традиционных видов энергетических ресурсов в мировом масштабе преобладает теплоэнергетика. На базе нефти, например, вырабатывается 38% всей электроэнергии мира, на базе угля – 25%, газа – 24%, то есть 86% общей выработки всех электростанций мира приходится на невозобновляемые природные ресурсы [1, с. 9].

К основным экологически чистым технологиям принято относить энергию ветра и солнца, океана, приливов и отливов волн, рек, геотермальную энергию. Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что так называемые экологически чистые источники энергии на самом деле не всегда являются экологически безопасными.

В настоящее время значительная часть электроэнергии, получаемой с помощью возобновляемых источников, приходится на гидроэлектростанции. Не стоит забывать, что они наносят ощутимый вред флоре и фауне области постройки, из-за создания плотины идет заболачивание окрестных земель. Происходит изменение климата в сторону более умеренного. Это пагубно сказывается на тех видах растений и животных, которые жили в этой местности. Другой экологический вред, наносимый гидроэлектростанциями, связан с вымиранием отдельных видов рыб. А в некоторых случаях – появление дефицита воды ниже по течению [2].

Долгое время ветряные электростанции считались самым экологически чистым способом производства электроэнергии. Однако по-

следние исследования показывают, что ветряки могут наносить вред людям, а также животным, включая птиц и летучих мышей. Оказалось, ветряные энергоустановки создают интенсивный инфразвуковой шум, который может негативно влиять на здоровье человека.

Получение электроэнергии с помощью солнечных батарей является экологически чистым, однако производство и утилизация солнечных батарей в значительной степени наносят вред окружающей среде [3].

В настоящее время многие регионы мира испытывают дефицит пресной воды, которая является важным жизненным ресурсом. И хотя запасы пресной воды в мире достаточно значительны и составляют порядка 35,8 млн куб. км [4, с. 121], следует отметить, что распределение ее запасов по регионам мира неравномерное, из-за чего многие регионы испытывают острейший дефицит в пресной воде. По этой причине разработка технологий опреснения воды является актуальной задачей [5]. Таким образом, создание энергоэффективных устройств для опреснения воды является важной задачей не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

Известные методы опреснения воды можно разделить на две группы: с сохранением агрегатного состояния воды (электродиализ, ионный обмен, обратный осмос, экстракция); с изменением ее агрегатного состояния (дистилляция, замораживание). Главные недостатки перечисленных методов – это внушительные затраты на электроэнергию в себестоимости производимой воды (до 60%) и значительные капитальные затраты. В настоящее время более половины опресняемой воды получают при помощи дистилляции. Однако при реализации процесса испарения соленой воды на трубопроводах и рабочих элементах установки образуется солевой осадок, ухудшающий эксплуатационные характеристики дистилляционных установок [6–7].

Опреснение воды

Способы получения пресной воды 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 [8].

В последние годы многие исследователи выделяют низкотемпературные методы опреснения как перспективное решение для обеспечения водными ресурсами районов, испытывающих их дефицит, в условиях глобального изменения климата [9–12].

Для первого шага очистки воды применяется устройство для разделения суспензий [13]. Устройство для разделения суспензий (рис. 1)

включает в себя цилиндроконический корпус, обеспечивающие герметичность цилиндроконического корпуса верхнюю и нижнюю центрирующие пластины, установленный в нижней центрирующей пластине нижний блок подшипников, тангенциальный патрубок ввода исходной суспензии, патрубок отвода сгущенной суспензии, патрубок отвода фильтрата, установленный на патрубке отвода фильтрата и выполненный с возможностью вращения фильтрующий элемент, установленный в верхней части фильтрующего элемента и центрирующийся в верхней центрирующей пластине приводной вал, установленную в нижней части фильтрующего элемента и центрирующуюся в нижней центрирующей пластине выводящую трубу.

Устройство для разделения суспензий работает следующим образом: исходная суспензия подается по тангенциальному патрубку ввода исходной суспензии (6) в цилиндроконический корпус (1), закручивается и, вращаясь, движется в сторону фильтрующего элемента (9). Под действием разности центробежной силы инерции, центробежной силы Архимеда и силы сопротивления потока суспензии крупные частицы движутся к стенке цилиндроконического корпуса (1) и отводятся через патрубок отвода сгущенной суспензии (7). Мелкие частицы под действием указанных сил вместе с потоком

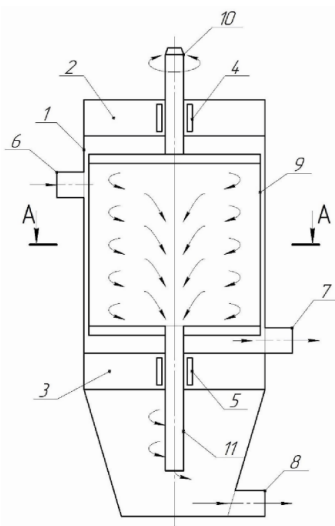


Рис. 1. Устройство для разделения суспензий.

1 – корпус; 2, 3 – центрирующие пластины; 4,5 – блоки подшипников; 6 – тангенциальный патрубок ввода исходной суспензии; 7 – патрубок отвода сгущенной суспензии; 8 – патрубок отвода фильтрата; 9 – фильтрующий элемент с возможностью вращения; 10 – приводной вал; 11 – выводящая труба.

Источники: Устройство для разделения суспензий: пат RU228354U1 Рос. Федерация. №2024119733 / Чернявский А., Чернявская В., Голованов И. Ю. 26.08.2024.

двигаются к установленному на патрубке отвода фильтрата (8) фильтрующему элементу (9) и оседают на его поверхности. Фильтрат из фильтрующего элемента (9) проходит по выводящей трубе (11) и отводится через патрубок отвода фильтрата (8).

Недостатком данного устройства для разделения суспензий является образование осадка на фильтрующем элементе. Этот недостаток предлагается уменьшить за счет установки фильтрующего элемента в поперечном сечении, имеющего форму укороченной эпитрохоиды с пятью вершинами (лепестками), представленный на рис. 2. Вследствие применения этого фильтрующего элемента происходит турбулизация потока исходной суспензии, что в свою очередь способствует самоочищению фильтра.

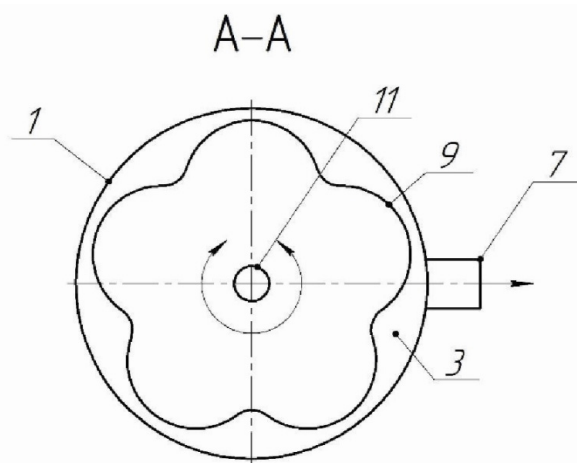


Рис. 2. Разрез устройства для разделения суспензий с применением формы поперечного сечения укороченной эпитрохоиды.

1 – корпус, 3 – центрирующая пластина, 7 – патрубок отвода сгущенной суспензии, 9 – фильтрующий элемент с возможностью вращения, 11 – выводящая труба.

Источники: Устройство для разделения суспензий: пат RU228354U1 Рос. Федерация. №2024119733 / Чернявский А., Чернявская В., Голованов И. Ю. 26.08.2024.

После предварительной подготовки очищенная от твердых частиц вода подается в низкотемпературный опреснитель для деминерализации. Для выполнения этой задачи можно использовать устройство, представленное на рис. 3, представляющее собой емкостной криоконцентратор [14].

Принцип работы емкостного криоконцентратора заключается в том, что очищенная от твердых частиц вода, подлежащая опреснению, подается в теплоизолированный бак (1), в котором за счет контакта с теплообменным аппаратом (2) происходит ее предвари-

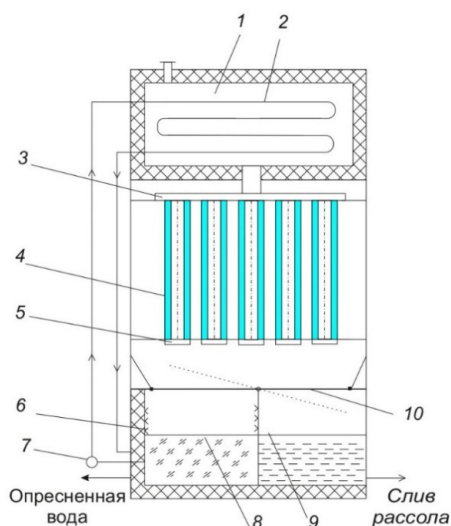


Рис. 3. Емкостной криоконцентратор.

1 – теплоизолированный бак, 2 – теплообменный аппарат, 3 – коллектор, 4 – теплообменные трубы, 5 – автоматические крышки, 6 – форсунки, 7 – насос, 8 – бак – приемник льда, 9 – бак для рассола, 10 – поворотный стол.

Источники: Исследование динамики образования водного льда при работе емкостных криоконцентраторов / М. А. Угольников, В. В. Чернявская // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021. №7. С. 20–22.

тельное охлаждение. Затем охлажденная вода подается в коллектор (3), через который она распределяется по теплообменным трубам (4), в которых происходит процесс намораживания водного льда на внутренней цилиндрической поверхности за счет отбора тепла с помощью хладоносителя протекающего в межтрубном пространстве. После достижения заданной толщины слоя льда открываются автоматические крышки (5), поворотный стол (10) занимает положение, необходимое для слива рассола в бак (9). Затем начинается процесс оттаивания и поворотный стол занимает положение, необходимое для сброса льда в бак (8). При оттаивании намороженный лед под собственным весом соскальзывает в бак (8), где с помощью форсунок (6) орошается пресной водой, в результате чего вода охлаждается и с помощью насоса (7) прокачивается через теплообменный аппарат (2). При достижении в баке (8) заданного уровня часть опресненной воды, образованной из талого льда, забирается.

Отличие низкотемпературного опреснителя от криоконцентратора объемного принципа действия в том, что в первом случае целевым продуктом является пресная вода, а во втором – сливаемый в бак (9) концентрат.

Предварительное охлаждение опресняемой воды за счет холодоаккумуляционной массы получаемого в аппарате льда позволяет повысить скорость намораживания слоя льда, что в свою очередь приводит к экономии электроэнергии, необходимой при работе холодильной установки.

Применение устройства для разделения суспензий с поперечным сечением сложной формы может повысить качество опреснения морской воды за счет дополнительной водоподготовки, а также продлить срок службы фильтрующего элемента за счет улучшения самоочистки фильтра.

Показанная в статье конструкция низкотемпературного опреснителя позволяет полезно использовать холодоаккумуляционную массу льда, что способствует энергосбережению при получении пресной воды.

Использование в технологической линии по получению воды питьевого качества комбинации устройств по разделению суспензий для предварительной очистки воды и низкотемпературных аппаратов с предварительным охлаждением может повысить как качество получаемого продукта, так и экономические показатели оборудования.

Перспективы применения теплообменной поверхности сложной формы

Одним из способов совершенствования низкотемпературных опреснительных устройств является повышение их теплообменной мощности, при этом важными показателями являются также масса и габаритные размеры аппарата [15]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t$$

где Q – теплообменная мощность кристаллизатора, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт / кв. м · К; F – площадь поверхности теплообмена, кв. м; Δt – средняя разность температур между исходным жидким продуктом и хладоносителем, К.

Увеличить площадь поверхности теплообмена с сохранением массогабаритных размеров установки возможно при использовании в качестве рабочей поверхности намораживания труб сложной формы поперечного сечения, например эпициклоидов (рис. 4).

В современной промышленности существует два основных способа изготовления труб со сложным профилем поперечного сечения [16]:

- из плоской полосы путем непрерывной валковой формовки с последующей сваркой;
- из круглых труб валковой формовкой (профилирование).

Второй способ изготовления, как с технической, так и с экономической точки зрения, является более перспективным, так как позволяет получать большой сортамент выпускаемой продукции без замены оборудования, а лишь с использованием технологической оснастки.

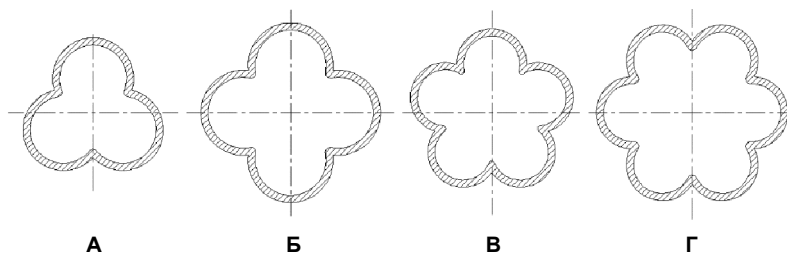


Рис. 4. Эпициклоиды.

А – с тремя ветвями; Б – с четырьмя ветвями; В – с пятью ветвями; Г – с шестью ветвями.

Источники: Оценка влияния сложной формы поверхности теплообмена на повышение эффективности кристаллизаторов / А. В. Чернявский, В. В. Чернявская, М. А. Угольникова // сборнике: Холодильная техника, инженерные системы и биотехнологии. Сборник тезисов VI Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2024.

В случае изготовления теплообменной трубы кристаллизатора сложной формы поперечного сечения путем профилирования металлоемкость аппарата не увеличивается, однако толщина стенки несколько уменьшается. Это практически не влияет на процесс льдообразования в кристаллизаторе, так как коэффициент теплопроводности материала стенки трубы много больше, чем у намораживаемого слоя водного льда.

Рассмотрим изменение площади поверхности теплообмена при использовании профилированной трубы (эпициклоида с количеством ветвей 3, 4, 5, 6) в сравнении с трубой круглого сечения. Для сохранения габаритных размеров аппарата размеры эпициклоиды выбраны таким образом, чтобы радиус описанной окружности соответствовал радиусу трубы круглого сечения.

Сравнение удельной площади поверхности трубы с формой поперечного сечения эпициклоиды (с различным количеством ветвей) и трубы с круглым поперечным сечением представлены в таблице 1. Размер трубы круглого сечения принят как радиус описанной окружности эпициклоиды [17].

Таблица 1

Изменение площади теплопередающей поверхности трубы с профилем поперечного сечения в виде эпициклоиды в сравнении с круглым сечением

Количество ветвей эпициклоиды	n=3	n=4	n=5	n=6
Изменение площади поверхности теплопередачи, %	+1,9%	+6,2%	+9,2%	+11,5%

Источники: рассчитано и составлено авторами на основании зависимостей [17]

На основании проведенного расчета можно сделать вывод, что при использовании в теплообменных аппаратах, в частности в кристаллизаторах, теплообменной трубы с профилем поперечного сечения в виде эпициклоиды наблюдается увеличение площади поверхности теплообмена, причем с увеличением количества ветвей эпициклоиды полезная площадь также увеличивается. Стоит также отметить, что при использовании профильной трубы в виде эпициклоиды с двумя ветвями площадь поверхности теплообмена уменьшилась на 4,4% в сравнении с трубой круглого сечения. Принимая во внимание уравнение, можно заключить, что использование в качестве поверхности теплообмена трубы с профилем поперечного сечения в виде эпициклоиды с тремя или более ветвями приведет к повышению тепловой мощности кристаллизатора, при сохранении массы и габаритных размеров аппарата.

Заключение

Приведенная в работе конструкция аппарата трубчатого вымораживания является удобной с точки зрения конструкции для производства талой воды, насыщенной необходимыми минеральными компонентами. Кроме того, предварительное охлаждение соленой воды за счет холодоаккумуляционной массы льда, получаемой в аппарате, позволяет несколько сократить расходы на электроэнергию. А использование в аппарате теплообменной поверхности в виде труб сложной формы поперечного сечения позволят увеличить производительность при сохранении габаритных размеров опреснителя.

Список литературы / References

1. Пугач Л. И. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность: учеб. пособие / Л. И. Пугач, Ф. А. Серант, Д. Ф. Серант. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2006. 347 с.
2. Макаренко Д. В., Паршина С. Л., Снежко А. А. Влияние гидроэлектростанций на окружающую среду // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. №11. С. 181–182.
3. Майер Е. А., Васильченко Ю. В. Переход к возобновляемым источникам энергии // Энергостарт. Материалы IV Всероссийской молодежной научно- практической конференции, 18–20 ноября 2021 г., Кемерово / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: Р. В. Беляевский (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2021. С. 412–1-412–5.
4. Якуцени С. П. Вода: ресурсы, запасы, рынки // Горная промышленность. 2022. №4. С. 120–128.

5. Смирнова Е. Е. Мировые запасы пресной воды // Вестник науки. 2020. Т. 1. №2 (23). С 80–84.

6. Аллабердиев А., Ходжанепесов Дж., Акмырадов Т., Аллануров Дж. Современные методы очистки воды // *Ceteris paribus*. 2024. №2. С. 25–27.

7. Смирнова Е. Е. Методы опреснения морской воды // Вестник науки. 2020. Т. 2. №1 (22). С. 249–252.

8. Ray S. S., Chen S.-S., Sangeetha D., Chang H.-M., Thanh C. N. D., Le Q. H., Ki H.-M. Developments in Forward Osmosis and Membrane Distillation for Desalination of Waters. // *Environmental Chemistry Letters*, 2018. Vol. 16 pp. 1247–1265 doi: 10.1007/s10311-018-0750-7.

9. Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Мордынский В. П., Сиротюк И. В., Фатеева Я. А. Многофункциональное оборудование для низкотемпературного разделения пищевых растворов на основе эффекта «термического парадокса» // Проблемы региональной энергетики. 2022. №1 (53). С. 42–58. DOI: 10.52254/1857-0070.2022.1-53.04.

10. Борисов И. М. Термодинамические основы процесса получения пресной воды методом кристаллизации // Российский химический журнал. 2022. Т. 66. №1. С. 66–70.

11. Кулакова Е. В., Усова О. А. Анализ способов очистки воды и водоемов от загрязнений // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. 2023. №1 (32). С. 9–13.

12. 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 // Проблемы региональной энергетики. 2022. №2 (54). С. 13–25.

13. Устройство для разделения суспензий: пат RU228354U1 Рос. Федерация. №2024119733 / Чернявский А., Чернявская В., Голованов И. Ю.; заявл. 12.07.2024; опублик. 26.08.2024. Бюл. №24. 4 с.

14. Ugolnikova M. A., Chernyavskaya V. V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57. №7–8. pp. 561–566. DOI: 10.1007/s10556-021-00976-z.

15. Lagutkin M. G. Increasing efficiency of shell-and-tube heat exchanger taking account of energy consumption reduction / M. G. Lagutkin, E. Yu. Baranova, D. I. Mishachkin, V. N. Naumov // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2022. Vol. 57. No 9–10. P. 713–719.

16. Моисеев А. А. Особенности получения сложных замкнутых профилей из круглой трубы методом непрерывной валковой формовки / А. А. Моисеев, О. В. Соколова, А. Е. Лепестов // *Сталь*. 2018. №11. С. 32–34.

17. Берман Г. Н. Циклоида: об одной замечательной кривой и некоторых других, с ней связанных / Г. Н. Берман. Изд. 4-е. Москва: URSS, 2007. С. 110.

Дата предоставления рукописи: 26 июня 2025 г.

About the Author

Alexander V. Chernyavsky – a First-Year Postgraduate Student of the Department of Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa, Moscow Polytechnic University (Moscow).

a_ch14@mail.ru

Maria A. Ugolnikova – a Scientific Supervisor: a Candidate of Technical Sciences, a Docent of the Department of Low Temperature Engineering named after P. L. Kapitsa, Faculty of Chemical Technology and Biotechnology Moscow Polytechnic University (Moscow).

set-square@mail.ru

Minimizing the Negative Impact of Low-temperature Desalinators on the Environment

Annotation. At present, the vast majority of ways to generate electricity are harmful to the environment in one way or another. Meanwhile, global energy consumption is constantly increasing. Many regions of the world experience a shortage of fresh water, desalination is a technically complex process. This paper examines the feasibility of using cryoconcentrator of volumetric principle of action with pre-cooling for obtaining fresh water of drinking quality. As well as the influence of heat-exchange surface of complex cross-sectional shape on increasing the energy efficiency of desalination.

Keywords: energy saving, desalination, freezing, ice formation, water purification, crystallizer.