
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

THEORETICAL BASES OF CHEMICAL TECHNOLOGY

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-7-15>



УДК 66.065.5:621.577

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Контактная кристаллизация веществ из растворов с применением испаряющегося хладагента

Г.А. Носов, М.Е. Уваров[@]

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий
им. М.В. Ломоносова), Москва, 119571 Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: uvamikhail@yandex.ru

Цели. Статья анализирует возможность применения контактной кристаллизации с использованием испаряющихся хладагентов для выделения веществ из их водных растворов на примере извлечения некоторых солей (KNO_3 , NaI , $(NH_2)_2CO$) и сахарозы. В качестве хладагента использован изобутан.

Методы. Изучение влияния основных технологических параметров – температуры охлаждения раствора, его исходной концентрации и давления сжатых паров хладагента – на ход рассматриваемого процесса разделения, а также выявление закономерностей его протекания проводилось с помощью выведенных ранее Н.И. Гельпериным и Г.А. Носовым математических зависимостей для каждой стадии процесса контактной кристаллизации. Авторы исследовали влияние указанных параметров на выход кристаллической и жидкой фаз, расход хладагента и мощность компрессора.

Результаты. Установлено, что применение испаряющихся хладагентов позволяет существенно интенсифицировать процесс кристаллизации и облегчает отделение отработанного хладагента от образующейся кристаллической суспензии. Это обусловлено тем, что при контакте жидкого хладагента с раствором происходит его испарение, которое сопровождается интенсивным охлаждением раствора. Установлено, что такой процесс может осуществляться при разности температур хладагента и кристаллизующейся смеси порядка 0.5–1.0 °С.

Выводы. Контактная кристаллизация с использованием испаряющихся хладагентов может быть успешно применена для выделения различных веществ из водных растворов. Важным преимуществом проведения подобного процесса является относительно небольшой расход хладагента, поскольку отвод теплоты из раствора осуществляется в результате изменения агрегатного состояния хладагента. Использование контактной кристаллизации позволяет также значительно упростить аппаратное оформление процесса.

Ключевые слова: кристаллизация, контактное охлаждение, испаряющиеся хладагенты, водные растворы

Для цитирования: Носов Г.А., Уваров М.Е. Контактная кристаллизация веществ из растворов с применением хладагента. Тонкие химические технологии. 2020;15(5):7-15. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-7-15>

RESEARCH ARTICLE

Contact crystallization of substances from solutions using evaporating refrigerants

Gennadi A. Nosov, Mikhail E. Uvarov[@]

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

[@]Corresponding author, e-mail: uvamikhail@yandex.ru

Objectives. The aim of this study was to analyze the possibility of using contact crystallization with evaporating refrigerants for the isolation of substances from their aqueous solutions using salts $[KNO_3, NaI, \text{and } (NH_2)_2CO]$ as extraction examples and sucrose. Isobutane was used as a refrigerant.

Methods. The analysis of the influence of the main technological parameters (i.e., solution's cooling temperature, initial concentration, and compressed refrigerant vapor pressure) on the separation process and identification of its regularities was performed using mathematical dependencies previously developed by N.I. Gelperin and G.A. Nosov for each stage of the contact crystallization process. The authors studied the influence of these parameters on the yield of crystalline and liquid phases, refrigerant consumption, and compressor power.

Results. The study showed that the use of evaporating refrigerants can significantly intensify the process of separating the mixture and spent refrigerant from the resulting crystalline suspension. This occurs owing to the evaporation of the liquid refrigerant that is in contact with the solution, which is accompanied by intense cooling. This process can be carried out at the temperature difference between the refrigerant and crystallizing mixture in the range of 0.5–1.0°C.

Conclusions. Contact crystallization with evaporating refrigerants can be successfully applied to separate various substances from aqueous solutions. An important advantage of this process is the relatively low refrigerant consumption because heat removal from the solution is carried out as a result of changes in the aggregate state of the refrigerant. The use of contact crystallization can also considerably simplify the equipment.

Keywords: crystallization, contact cooling, evaporating refrigerants, aqueous solutions

For citation: Nosov G.A., Uvarov M.E. Contact crystallization of substances from solutions using evaporating refrigerants. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2020;15(5):7-15 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-7-15>

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1–4], процесс кристаллизации широко используется для выделения веществ из различных растворов, очистки веществ от примесей перекристаллизацией, а также для концентрирования разбавленных растворов путем вымораживания растворителей. Применение этого процесса не ограничивается только лишь химической отраслью. Кристаллизация также с большим успехом применяется в пищевой, фармацевтической, нефтехимической промышленности, в строительной отрасли, в производстве радиоэлектроники и др. [5–13]. Чаще всего данный процесс осуществляется путем охлаждения растворов и расплавов. Реже применяется выпарная, вакуум-выпарная кристал-

лизация и кристаллизация с применением высаливающих агентов.

В случае кристаллизации методом охлаждения обычно используются аппараты, снабженные различными охлаждающими элементами: рубашками, змеевиками, трубчатками, полыми дисками и т.д. При этом отвод тепла от кристаллизующегося вещества происходит через теплопередающие стенки указанных выше устройств [14]. Иногда процесс кристаллизации осуществляют путем непосредственного контакта растворов с хладагентами [2, 4, 15, 16].

Одним из существенных преимуществ последнего является отсутствие теплопередающих поверхностей для отвода теплового потока. Это значительно упрощает конструкцию аппаратов, а также снимает вопрос инкрустации. К числу достоинств

такого процесса также следует отнести возможность достижения более развитой межфазной поверхности в отличие от обычного бесконтактного метода фракционной кристаллизации. Перемешивание массовых потоков в контактном кристаллизаторе обычно происходит достаточно интенсивно. Проведение кристаллизации таким способом позволяет осуществлять данный процесс при сравнительно небольшой разности температур между кристаллизующейся смесью и поступающим хладагентом (порядка 0.5–2.0 °C). Это дает возможность не ограничиваться в выборе конструкционных материалов для кристаллизаторов только дорогостоящими сталями и изготавливать такие аппараты из материалов с низкой теплопроводностью (полимеры, стекло, керамика и т.д.). Все эти достоинства в целом благоприятно отражаются на капитальных и эксплуатационных затратах.

При выборе контактного метода кристаллизации следует учитывать возможность загрязнения целевого продукта хладагентом, что является существенным недостатком данного процесса [2, 4]. С учетом этого в рассматриваемом процессе необходима стадия отделения отработанного хладагента от кристаллической фазы.

Следует отметить, что при проведении процесса контактной кристаллизации можно использовать различные типы хладагентов, отличающиеся между собой теплофизическими свойствами, а также агрегатным состоянием. Это могут быть охлажденные жидкости, сжиженные и не сжиженные газы. Поступающие в кристаллизатор хладагенты при контакте с кристаллизующейся смесью переходят в газообразное состояние (испаряются) [2]. Контактную кристаллизацию также можно проводить путем смешивания исходной смеси (раствора) с сильно переохлажденным растворителем [17].

Процесс контактной кристаллизации может протекать как в сплошной, так и в дисперсной фазах [2, 4, 16]. В этом случае используются жидкие хладагенты, которые не смешиваются с исходным раствором. Диспергирование охлаждаемого раствора в форме капель в массовом потоке хладагента образует дисперсную фазу. В случае диспергирования хладагента в кристаллизующемся растворе фаза становится сплошной. В зависимости от поставленной задачи процесс контактной кристаллизации может быть реализован как в периодическом, так и в непрерывном режимах. При выборе контактного метода кристаллизации следует учитывать, что при незначительной разности плотностей хладагента, маточного раствора и кристаллической фазы часто возникают трудности разделения полученной суспензии, в результате чего может происходить загрязнение продуктов разделения хладагентом.

Использование газообразных хладагентов существенно облегчает их отделение от суспензии.

Однако в настоящее время в промышленности они применяются нечасто, что вызвано большим расходом таких хладагентов вследствие их низкой теплоёмкости.

Перспектива промышленного применения испаряющихся хладагентов в кристаллизационных процессах продолжает оставаться актуальной. Они, с одной стороны, позволяют существенно интенсифицировать процесс кристаллизации, так как при их испарении поглощается значительное количество тепла. С другой стороны, не возникает проблем отделения образующихся паров хладагента от суспензии. В настоящее время такой процесс кристаллизации используется в основном для опреснения воды методом вымораживания и концентрирования разбавленных водных растворов [2, 5, 16]. В данной статье приведены результаты исследований контактной кристаллизации применительно к выделению нитрата калия, карбамида, йодида натрия и сахарозы из их водных растворов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

На рис. 1 показана принципиальная схема установки контактной кристаллизации. Здесь в кристаллизатор Cryst (стадия кристаллизации) непрерывно поступает исходный раствор в количестве F с концентрацией растворённого вещества x_F при температуре t_F , постепенно охлаждаясь до температуры $t_{\text{н}}$ ниже точки его насыщения. В результате этого происходит образование кристаллической фазы целевого продукта в растворе. Жидкий хладагент, подаваемый в кристаллизатор в количестве G_R , контактирует с охлаждаемым раствором. Это приводит к постепенному испарению хладагента с последующим охлаждением раствора в кристаллизаторе. Образующаяся в кристаллизаторе суспензия состоит из кристаллической фазы C состава x_C и маточника M состава x_M . Далее, суспензия $C+M$ направляется на фильтрацию Sep (стадия сепарации), где происходит извлечение кристаллической фазы в количестве S от маточного раствора L . Следует отметить, что сепарацию суспензии можно проводить не только методом фильтрации, но также и методом центрифугирования [18].

В рассматриваемом процессе используется пароконденсационная холодильная установка, в контуре которой циркулирует хладагент G_R . Кристаллизатор Cryst, в который непрерывно поступает жидкий хладагент, в данном случае является испарителем холодильной установки. Пары хладагента G_R , находящиеся в насыщенном состоянии, отводятся из кристаллизатора и далее поступают в компрессор Com для сжатия их от давления p_1 до давления p_2 . При этом температура сжимаемых

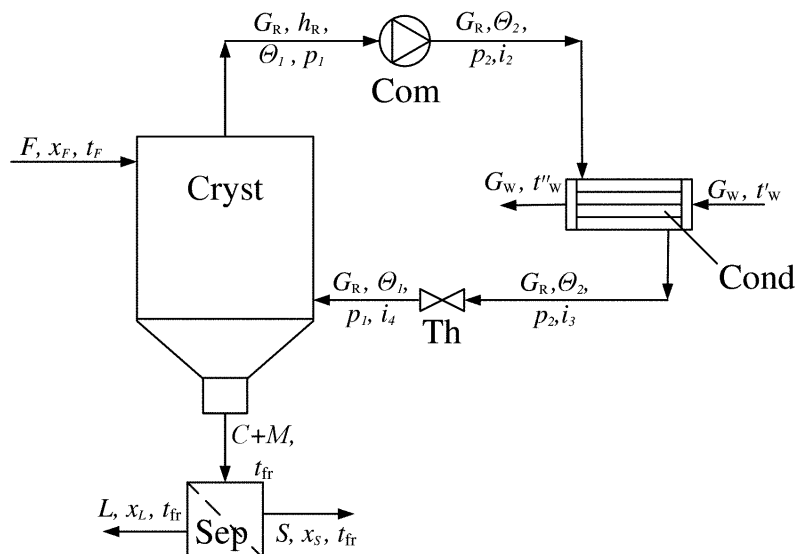


Рис. 1. Принципиальная схема установки контактной кристаллизации с испаряющимся хладагентом для выделения веществ из водных растворов.

Fig. 1. Schematic diagram of contact crystallization with an evaporating refrigerant for the extraction of substances from aqueous solutions.

паров повышается от Θ_1 до Θ_2 , а теплосодержание увеличивается от i_1 до i_2 . На рис. 2 показано изменение параметров хладагента на диаграмме давление – энтальпия. На данной диаграмме линия 1–2 соответствует процессу сжатия хладагента компрессором от давления p_1 до p_2 . Сжатые пары хладагента G_R затем поступают в конденсатор холодильной установки Cond, где они охлаждаются потоком воды G_W . При этом теплосодержание хладагента уменьшается от i_2 до i_3 (линия 2–3). В качестве конденсатора может быть использован обычный кожухотрубный теплообменник. Перед подачей хладагента в кристаллизатор необходимо понизить его давление. Для этого он в конденсированном виде проходит через дроссельный вентиль Th, что приводит к снижению давления хладагента от p_2 до p_1 . После этого хладагент снова возвращается на стадию кристаллизации Cryst в жидком состоянии. На диаграмме состояния хладагента линия 3–4 показывает изменение параметров потока G_R при его дросселировании. Заметим, что энтальпия при дросселировании остаётся постоянной $i_3 = i_4$. Линия 4–1 соответствует испарению хладагента при давлении p_1 . При этом энтальпия хладагента повышается от значения i_4 до i_1 .

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Для расчёта выхода кристаллической и жидких фаз при проведении рассматриваемого процесса разделения могут быть использованы те же зависимости, что и при обычном процессе кристаллизации. Так, выход кристаллической фазы можно установить, используя зависимость [2]

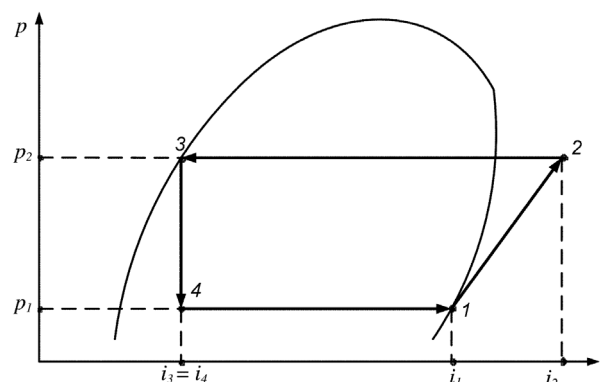


Рис. 2. Изменение параметров хладагента на диаграмме состояния p – i при проведении контактной кристаллизации.

Fig. 2. Changes in the parameters of the refrigerant in the p – i state diagram during contact crystallization.

$$C = F \frac{x_F - x_M}{x_C - x_M} \quad (1)$$

где x_C и x_M – концентрация растворенного вещества в кристаллической фазе C и маточнике M .

Уравнение теплового баланса проводимой стадии кристаллизации Cryst имеет вид

$$Fc_F t_F + Cr_{\text{sub}} + G_R i_4 = Cc_C t_{\text{fr}} + Mc_M t_{\text{fr}} + G_R i_1 \quad (2)$$

где c_C , c_M – теплоёмкости кристаллической фазы вещества C и маточного раствора M ; r_{sub} – теплота

кристаллизации вещества; i_4 и i_l – энтальпия хладагента на входе и выходе из кристаллизатора.

Используя уравнение (2), можно определить количество отводимого тепла Q_{cool} и расход хладагента G_R на стадии кристаллизации Cryst:

$$Q_{\text{cool}} = G_R(i_l - i_2) = Fc_F t_F + C(r_{\text{sub}} - c_C t_{\text{fr}}) - Mc_M t_{\text{fr}} \quad (3)$$

$$G_R = \frac{Q_{\text{cool}}}{i_l - i_4} = \frac{Fc_F t_F + C(r_{\text{sub}} - c_C t_{\text{fr}}) - Mc_M t_{\text{fr}}}{i_l - i_4} \quad (4)$$

Количество отводимой тепловой энергии Q_{cond} от конденсирующегося сжатого теплоносителя в конденсаторе Cond можно определить, используя зависимость

$$Q_{\text{cond}} = G_R(i_2 - i_3) \quad (5)$$

где i_2 и i_3 – энтальпия хладагента на входе и выходе из конденсатора.

Затрачиваемая мощность турбокомпрессора N_{real} на сжатие паров хладагента от давления p_l до давления p_2 определяется [19]

$$N_{\text{real}} = \frac{G_R(i_2 - i_l)}{\eta_A \eta_M} \quad (6)$$

где η_A и η_M – адиабатический и механический коэффициенты полезного действия компрессора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рассматриваемого процесса кристаллизации нами был выполнен на примере выделения KNO_3 , $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, NaI и сахарозы из их водных растворов. Все эти вещества при кристаллизации не образуют кристаллогидратов. На диаграммах их равновесия с водой имеются эвтектические точки, параметры которых приведены в таблице.

Анализ рассматриваемого процесса разделения приведённых выше бинарных систем проводился с использованием изобутана в качестве хладагента. Давление паров изобутана после дросселирования составляло $p_l = 1$ атм, а сжатие их в компрессоре

проводилось в диапазоне до $p_2 = 2-5$ атм в зависимости от температуры охлаждения растворов в кристаллизаторе t_{fr} .

В результате проведенного анализа было установлено, что охлаждение раствора до более низких температур t_{fr} при постоянной концентрации исходного раствора x_F приводит к закономерному увеличению выхода кристаллической фазы выделяемого вещества и к соответствующему снижению выхода маточного раствора (рис. 3).

Следует отметить, что изменение выхода кристаллической фазы в свою очередь влияет и на количество выделяемой теплоты. Так, понижение температуры охлаждения раствора t_{fr} , а, следовательно, и рост выхода кристаллов приводит к соответствующему увеличению количества выделяющейся тепловой энергии Q_{cool} (рис. 4а) и к повышению расхода хладагента G_R на проведение процесса кристаллизации (рис. 4б). Возрастает также мощность компрессора N_{real} , используемого для сжатия паров промежуточного теплоносителя (рис. 5а) и количество тепла Q_{cond} , отводимого при конденсации сжатых паров теплоносителя в конденсаторе установки (рис. 5б).

Эффективность рассматриваемого процесса разделения существенно зависит от концентрации исходного раствора x_F . Ее повышение приводит к закономерному росту выхода кристаллической фазы C (рис. 3) и количества тепла Q_{cool} , отводимого на стадии кристаллизации (рис. 4). Возрастает также расход хладагента G_R и мощность компрессора N_{real} (рис. 5).

Проведенный анализ показал также, что помимо температуры фракционирования t_{fr} и концентрации x_F на расход хладагента G_R и мощность компрессора N_{real} существенное влияние оказывает давление p_2 , до которого пары хладагента сжимаются в компрессоре. Характерно, что при разлении разбавленных растворов величина G_R с повышением давления p_2 несколько снижается, а при фракционировании концентрированных растворов она несколько возрастает (рис. 6а), мощность же компрессора с повышением p_2 всегда увеличивается (рис. 6б).

Расход хладагента G_R и мощность компрессора N_{real} определенным образом могут зависеть также от физико-химических и теплофизических

Параметры точки эвтектики для некоторых бинарных систем
Parameters of the eutectic point for some binary systems

Система System	x_F , масс. % x_F , wt %	t_F , °C
$\text{KNO}_3\text{--H}_2\text{O}$	11	–2
$(\text{NH}_2)_2\text{CO--H}_2\text{O}$	32	–12
$\text{NaI--H}_2\text{O}$	47	–32
$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}\text{--H}_2\text{O}$	63	–14

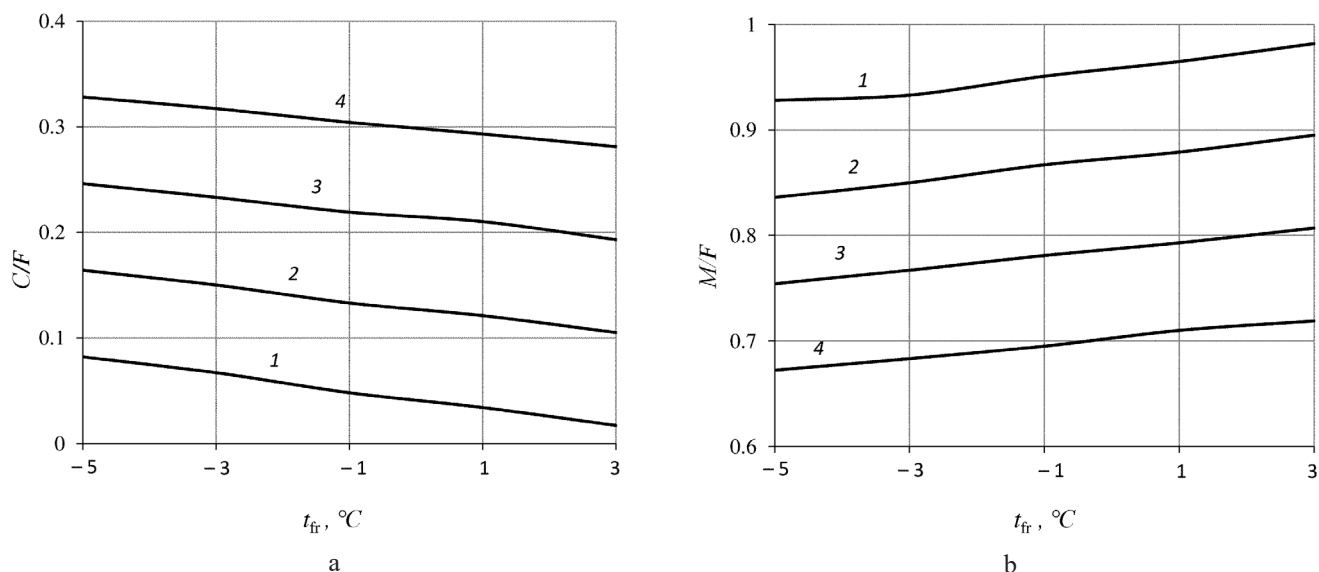


Рис. 3. Влияние температуры охлаждения t_{fr} на выход кристаллической фазы (а) и маточного раствора (б) (система $(NH_2)_2CO-H_2O$; $p_2 = 2$ атм): $x_F = 40\%$ $(NH_2)_2CO$ (1); 45% (2); 50% (3); 55% (4).

Fig. 3. Influence of the cooling temperature t_{fr} on the yield of the crystal phase (a) and mother solution (b) (system $(NH_2)_2CO-H_2O$; $p_2 = 2$ atm): (1) $x_F = 40\%$ $(NH_2)_2CO$; (2) $x_F = 45\%$; (3) $x_F = 50\%$; (4) $x_F = 55\%$.

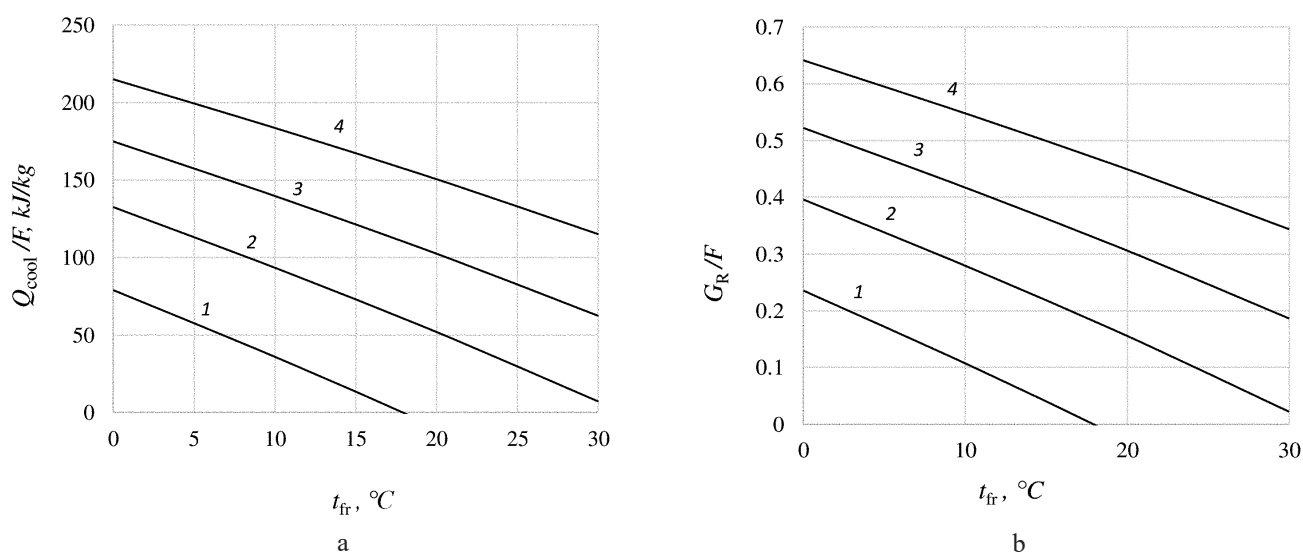


Рис. 4. Зависимость количества теплоты, отводимого из кристаллизатора (а) и расхода хладагента (б) от температуры фракционирования (система KNO_3-H_2O ; $p_2 = 2$ атм): $x_F = 20\%$ KNO_3 (1); 30% (2); 40% (3); 50% (4).

Fig. 4. Dependence of the amount of heat removed from the crystallizer (a) and the refrigerant flow rate (b) on the fractionation temperature (KNO_3-H_2O system; $p_2 = 2$ atm): (1) $x_F = 20\%$ KNO_3 ; (2) $x_F = 30\%$; (3) $x_F = 40\%$; (4) $x_F = 50\%$.

свойств кристаллизующихся веществ и их водных растворов [17]. Так, например, при одинаковом выходе кристаллической фазы для NaI расход энергии на проведение контактной кристаллизации в 1.5–2.0 раза выше, чем при кристаллизации сахарозы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных, а также проведённые нами исследования показали, что контактная

кристаллизация с использованием испаряющихся хладагентов может быть успешно применена для выделения целого ряда веществ из их водных растворов. Особенно выгодно ее применять, когда процесс кристаллизации осуществляется в области низких температур. При ее использовании существенно интенсифицируется межфазный теплообмен и упрощается аппаратное оформление процесса разделения.

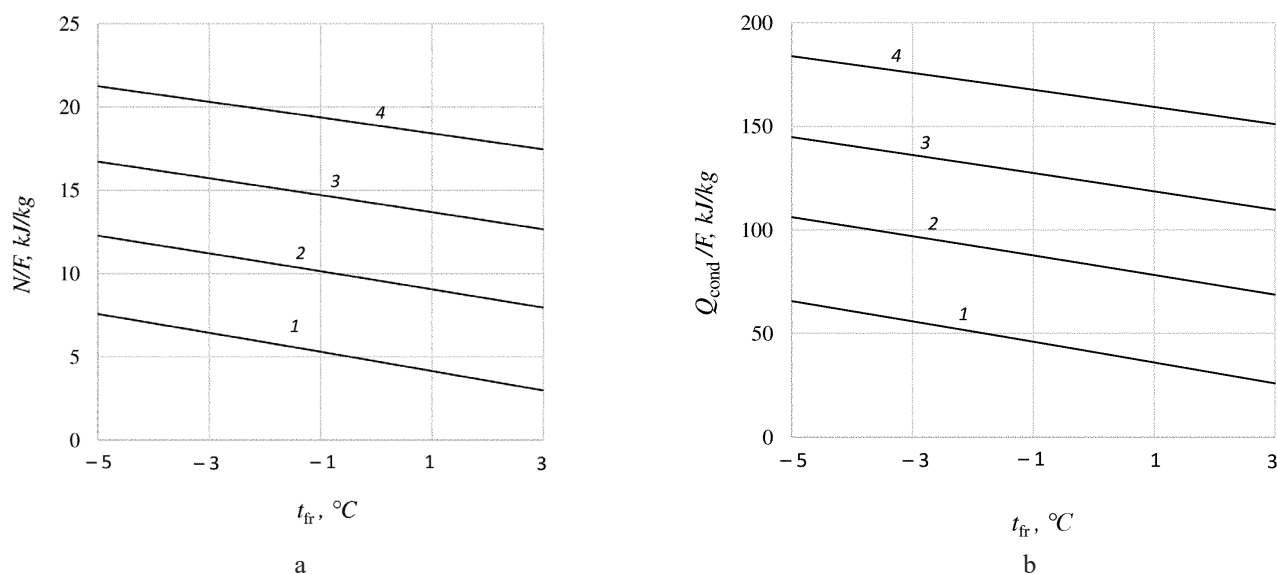


Рис. 5. Зависимость затрачиваемой мощности компрессора (а) и количества отводимой теплоты при конденсации паров хладагента (б) от температуры фракционирования (система $(NH_2)_2CO-H_2O$; $p_2 = 2$ атм): $x_F = 40\%$ $(NH_2)_2CO$ (1); 45% (2); 50% (3); 55% (4).

Fig. 5. Dependence of the compressor power consumption (a) and the amount of heat removed during the condensation of refrigerant vapor (b) on the fractionation temperature (system $(NH_2)_2CO-H_2O$; $p_2 = 2$ atm): (1) $x_F = 40\%$ $(NH_2)_2CO$; (2) $x_F = 45\%$; (3) $x_F = 50\%$; (4) $x_F = 55\%$.

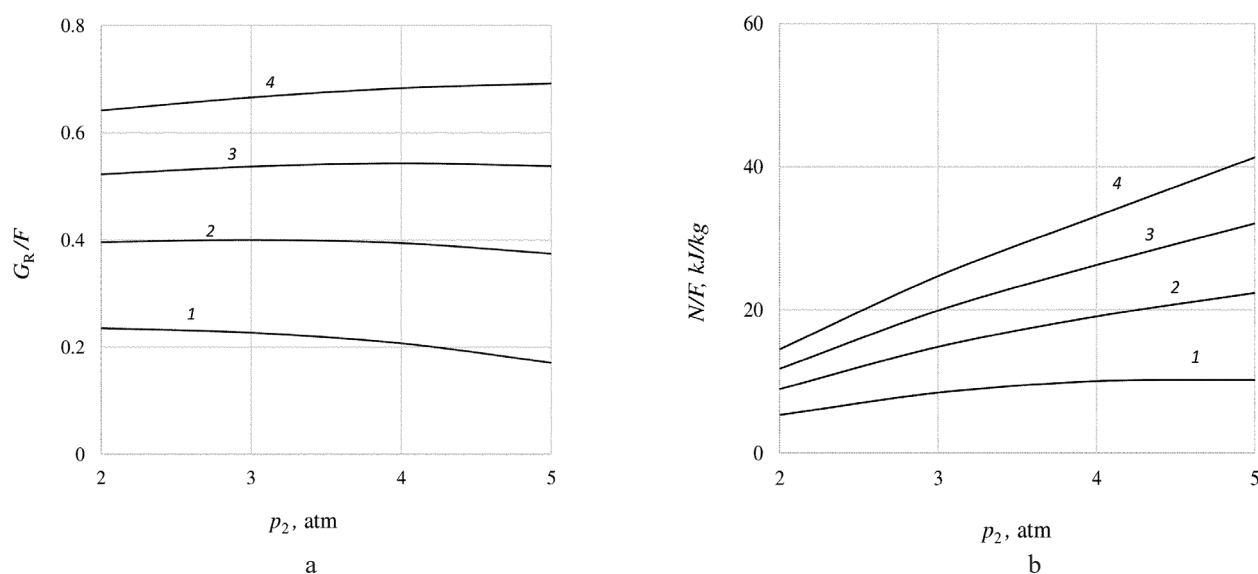


Рис. 6. Зависимость расхода хладагента (а) и мощности компрессора (б) от давления хладагента на выходе из компрессора (система $NaI-H_2O$; $t_{fr} = -28$ °C): $x_F = 60\%$ NaI (1); 63% (2); 66% (3); 69% (4).

Fig. 6. Dependence of the refrigerant flow (a) and compressor power (b) on the refrigerant pressure at the compressor outlet ($NaI-H_2O$ system; $t_{fr} = -28$ °C): (1) $x_F = 60\%$ NaI; (2) $x_F = 63\%$; (3) $x_F = 66\%$; (4) $x_F = 69\%$.

Обозначения

Cryst – кристаллизатор / crystallizer;
 Sep – фильтр (сепарация) / filter (separation);
 Com – турбокомпрессор / turbocharger;
 Th – дроссельный вентиль / throttle valve;
 Cond – конденсатор хладагента / refrigerant condenser;
 F – массовый поток исходного раствора / mass flow of the initial solution;
 C – выход кристаллической фазы / output of the crystal phase;
 M – выход маточного раствора / output of the stock solution;
 S – массовый поток извлеченной кристаллической фазы / mass flow of the extracted crystal phase;

L – массовый поток удаляемого маточника / mass flow of the removed uterus;
 G_R – расход хладагента / refrigerant consumption;
 G_w – расход воды / water consumption;
 x_F – концентрация исходного раствора / concentration of the initial solution;
 x_S – концентрация извлеченного вещества в кристаллической фазе / concentration of the extracted substance in the crystal phase;
 x_L – концентрация вещества в маточном растворе / concentration of the substance in the mother liquor;
 t_{fr} – температура охлаждения раствора (фракционирования) / cooling temperature of the solution (fractionation);
 Θ_1 – температура хладагента на входе в компрессор / temperature of the refrigerant at the compressor input;
 Θ_2 – температура сжатого в компрессоре хладагента / temperature of the refrigerant compressed in the compressor;
 t'_w – температура воды на входе в конденсатор / water temperature at the condenser input;
 t''_w – температура воды на выходе из конденсатора / water temperature at the condenser output;
 p_1 – давление хладагента на входе в компрессор / pressure of the refrigerant at the compressor input;
 p_2 – давление сжатого в компрессоре хладагента / pressure of the refrigerant compressed in the compressor;
 h_R – энтальпия хладагента на входе в компрессор / enthalpy of the refrigerant at the compressor input;
 i_2 – энтальпия сжатого в компрессоре хладагента / enthalpy of the refrigerant compressed in the compressor;
 i_3 – энтальпия хладагента на выходе из конденсатора / enthalpy of the refrigerant at the condenser output;
 i_4 – энтальпия хладагента на входе в кристаллизатор / enthalpy of the refrigerant at the crystallizer input.

Финансовая поддержка

Данное исследование не имело какой-либо финансовой поддержки от сторонних организаций.

Financial support

This study did not have any financial support from third-party organizations.

Вклад авторов

Г.А. Носов – планирование исследования, анализ научной работы, научное редактирование, подготовка списка литературы;

М.Е. Уваров – подбор модельных систем, проведение исследований, написание текста статьи, техническое редактирование, оформление списка литературы.

Authors' contribution

G.A. Nosov – research planning, analysis of scientific works, scientific editing, preparation of the list of references;

M.E. Uvarov – selection of model systems, conducting the study, writing the text of the article, technical editing, design of the list of references.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. М.: Химия; 1968. 304 с.
2. Гельперин Н.И., Носов Г.А. Основы техники фракционной кристаллизации. М.: Химия; 1986. 304 с.
3. Mullin J.W. Crystallization. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2001. 594 p.
4. Михалёв М.Ф., Щупляк И.А. Контактная кристаллизация. Л.: Изд-во ЛГУ; 1983. 190 с.
5. Challener C.A. Considering continuous crystallization. *Pharm. Technol.* 2015;39(5):38-40.
6. Elfassy E., Basel Y., Mastai Y. Crystallization of amino acids at the chiral ionic liquid/water interface. *CrystEngComm.* 2016;18(45):8769-8775.
<https://doi.org/10.1039/C6CE01726F>
7. Kim H.J., Lee J. Novel porous materials prepared by repeated directional crystallization of solvent. *Polymer Korea.* 2015; 9(1):151-156.
<https://doi.org/10.7317/pk.2015.39.1.151>
8. Liu S., Hao L., Rao Z., Zhang X. Experimental study on crystallization process and prediction for the latent heat of ice slurry generation based sodium chloride solution. *Appl. Energy.* 2017;185(2):1948-1953.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.073>
9. Stamenov L., Stefanova V., Petkov K., Iliev P. Study of the crystallization process of ferric sulfate hydrate from rich of Fe(III) waste solutions. *J. Chem. Technol. Metall.* 2017;52(2):333-339.

REFERENCES

1. Matusevich L.N. *Kristallizatsiya iz rastvorov v khimicheskoi promyshlennosti* (Crystallization from solutions in the chemical industry). Moscow: Khimiya; 1968. 304 p. (in Russ.).
2. Gel'perin N.I., Nosov G.A. *Osnovy tekhniki fraktsionnoi kristallizatsii* (Fundamentals of fractional crystallization technique). Moscow: Khimiya; 1986. 304 p. (in Russ.).
3. Mullin J.W. Crystallization. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 594 p.
4. Mikhalev M.F., Schuplyak I.A. *Kontaktnaya kristallizatsiya* (Contact crystallization). Leningrad: LGU Publishing House; 1983. 190 p. (in Russ.).
5. Challener C.A. Considering continuous crystallization. *Pharm. Technol.* 2015;39(5):38-40.
6. Elfassy E., Basel Y., Mastai Y. Crystallization of amino acids at the chiral ionic liquid/water interface. *CrystEngComm.* 2016;18(45):8769-8775.
<https://doi.org/10.1039/C6CE01726F>
7. Kim H.J., Lee J. Novel porous materials prepared by repeated directional crystallization of solvent. *Polymer Korea.* 2015;9(1):151-156.
<https://doi.org/10.7317/pk.2015.39.1.151>
8. Liu S., Hao L., Rao Z., Zhang X. Experimental study on crystallization process and prediction for the latent heat of ice slurry generation based sodium chloride solution. *Appl. Energy.* 2017;185(2):1948-1953.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.073>

10. Rachah A., Noll D. Mathematical Analysis of a Continuous Crystallization Process. In: Anastassiou G., Duman O. (eds.). *Intelligent Mathematics II: Applied Mathematics and Approximation Theory. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2016;441:283-301. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30322-2_20
11. Horst J.H., Schmidt C., Ulrich J. Fundamentals of Industrial Crystallization. In book: *Handbook of Crystal Growth. Bulk Crystal Growth: Second Edition*. 2015;2:1317-1349. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63303-3.00032-8>
12. Price C.J. Continuous Pharmaceutical Crystallization from Solution. In: Roberts K., Docherty R., Tamura R. (eds.). *Engineering Crystallography: From Molecule to Crystal to Functional Form. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. Springer, Dordrecht. 2017;1:315-329. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1117-1_19
13. Mancigotti S., Hamilton A. Salt crystallisation in pores: The effect of crystal growth rate on damage. *WIT Trans. Built Environ.* 2017;171:207-214. <https://doi.org/10.2495/STR170181>
14. Harada R. Development of small continuous crystallizer. *J. Soc. Powder Technol. Japan*. 2017;54(7):478-482. <https://doi.org/10.4164/sptj.54.478>
15. Пап Л. Концентрирование вымораживанием. М.: Лёгкая и пищевая промышленность; 1982. 96 с.
16. Филаткин В.Н., Плотников В.Т. Разделительные вымораживающие установки. М.: Агропромиздат; 1987. 352 с.
17. Носов Г.А., Кесоян Г.А., Попов Д.А. Контактная кристаллизация с использованием охлажденных растворителей. *Тонкие химические технологии*. 2008;3(2):40-44.
18. Семенов Е.В., Славянский А.А. Особенности процесса разделения суспензий в роторах фильтрующих центрифуг. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2017;5:7-12.
19. Носов Г.А., Уваров М.Е. Двухстадийная перекристаллизация с регенерацией растворителя. *Тонкие химические технологии*. 2017;12(1):50-56. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-1-50-56>
9. Stamenov L., Stefanova V., Petkov K., Iliev P. Study of the crystallization process of ferric sulfate hydrate from rich of Fe(III) waste solutions. *J. Chem. Technol. Metall.* 2017;52(2):333-339.
10. Rachah A., Noll D. Mathematical Analysis of a Continuous Crystallization Process. In: Anastassiou G., Duman O. (eds.). *Intelligent Mathematics II: Applied Mathematics and Approximation Theory. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2016;441:283-301. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30322-2_20
11. Horst J.H., Schmidt C., Ulrich J. Fundamentals of Industrial Crystallization. In book: *Handbook of Crystal Growth. Bulk Crystal Growth: Second Edition*. 2015;2:1317-1349. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63303-3.00032-8>
12. Price C.J. Continuous Pharmaceutical Crystallization from Solution. In: Roberts K., Docherty R., Tamura R. (eds.). *Engineering Crystallography: From Molecule to Crystal to Functional Form. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. Springer, Dordrecht. 2017;1:315-329. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1117-1_19
13. Mancigotti S., Hamilton A. Salt crystallisation in pores: The effect of crystal growth rate on damage. *WIT Trans. Built Environ.* 2017;171:207-214. <https://doi.org/10.2495/STR170181>
14. Harada R. Development of small continuous crystallizer. *J. Soc. Powder Technol. Japan*. 2017;54(7):478-482. <https://doi.org/10.4164/sptj.54.478>
15. Pap L. *Kontsentririvanie vymorazhivaniem* (Freezing Concentration). Moscow: Light and Food Industry; 1982. 96 p. (in Russ.).
16. Filatkin V.N., Plotnikov V.T. *Razdelitel'nye vymorazhivayushchie ustanovki* (Separating freezing installations). Moscow: Agropromizdat; 1987. 352 p. (in Russ.).
17. Nosov G.A., Kesoyan G.A., Popov D.A. Contact crystallization with using of cooled solvents. *Tonkie khimicheskie tekhnologii = Fine Chemical Technologies*. 2008;3(2):40-44 (in Russ.).
18. Semenov E.V., Slavyanskiy A.A. Peculiarities of the process of suspensions separation in rotors of filtering centrifuges. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroyeniye*. 2017;5:7-12 (in Russ.).
19. Nosov G.A., Uvarov M.E. Two-stage recrystallization with the regeneration of the solvent. *Tonkie khimicheskie tekhnologii = Fine Chemical Technologies*. 2017;12(1):50-56 (in Russ.).

Об авторах:

Носов Геннадий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Н.И. Гельперина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: nosovga@mail.ru. Scopus Author ID 7003643516

Уваров Михаил Евгеньевич, старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Н.И. Гельперина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: uvamikhail@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0003-3184-8496>

About the authors:

Gennadi A. Nosov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, N.I. Gel'perin Department of Processes and Apparatus of Chemical Technologies, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: nosovga@mail.ru. Scopus Author ID 7003643516

Mikhail E. Uvarov, Senior Teacher, N.I. Gel'perin Department of Processes and Apparatus of Chemical Technologies, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: uvamikhail@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0003-3184-8496>

*Поступила: 27.12.2019; получена после доработки: 02.04.2020; принята к опубликованию: 30.07.2020.
The article was submitted: December 27, 2019; approved after reviewing: April 02, 2020; accepted for publication: July 30, 2020.*