

УДК 536.24

МИХАЙЛЕНКО Т.П., ПЕТУХОВ И.И.

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

МЕЖФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВАКУУМИРУЕМЫХ РАСТВОРОВ

Експериментально досліджено вплив початкової концентрації розсолу й інтенсивності перемішування на ступінь переохолодження до початку кристалізації. Використовуючи експериментальні дані з випарного охолодження розсолу і модель розрахунку тепло- і масообміну при спливанні парових бульбашок, отримано емпіричну кореляцію для коефіцієнта збільшення площі міжфазної поверхні.

Экспериментально исследовано влияние начальной концентрации рассола и интенсивности перемешивания на степень переохлаждения до начала кристаллизации. С использованием экспериментальных данных по испарительному охлаждению рассола и модели расчета тепло- и массообмена при всплытии паровых пузырьков, получена эмпирическая корреляция для коэффициента увеличения площади межфазной поверхности.

Initial brine concentration and intermixing intensity impact on supercooling before freezing experimentally investigated. Using of brine transpiration cooling experimental data and vapour bubble emersion simulator of heat-mass exchange was got the correlation for interphase surface area coefficient.

A_b – площа міжфазної поверхності;
 A_v – площа міжфазної поверхності в одинице об'єму суміші;
 $A_{\text{гор}}$ – площа зеркала рідини в посуді;
 $c^{(l)}$ – теплоємність рідини;
 C_{μ} – коефіцієнт аеродинамічного опору;
 d_b – діаметр бульбашки;
 g – прискорення вільного падіння;
 $G_b^{(v)}$ – маса парової бульбашки, кг;
 h – глибина парожидкісної середовища, м;
 J_{lv} – потік маси в бульбашку, віднесений до одиниці об'єму суміші;
 $K_{\text{гор}}$ – коефіцієнт збільшення площі міжфазної поверхності;
 N_b – кількість центрів пароутворення в одиниці об'єму суміші;
 p – тиск парожидкісної середовища;

$p_{\text{н1}}$ – тиск насичення на кривій кипіння води;
 $p^{(v)}$ – тиск в паровій просторі над рідиною;
 Q_b – теплота, відведена з об'єму рідини з урахуванням пароутворення;
 Re – число Рейнольдса;
 $T^{(l)}$ – температура рідини;
 w_b – швидкість вспливу бульбашки;
 We – число Вебера;
 $\alpha^{(v)}$ – об'ємний паровміст суміші;
 α_d – коефіцієнт масообміну;
 $\rho^{(l)}$ – густина рідини;
 $\rho_1^{(v)}$ – густина водяного пару в бульбашці;
 ρ_m – густина парожидкісної суміші;
 ρ_{σ} – густина пару на міжфазній поверхності;
 $\sigma^{(l)}$ – поверхневе натягнення рідини;
 Ψ_{lv} – теплота фазового переходу.

Изучение процессов тепло- и массообмена, протекающих при испарительном охлаждении жидкости с последующей ее кристаллизацией, представляет интерес для различных областей техники. Среди них технологии концентрирования соков вымораживанием [1, 2], опреснение морской воды, получение отвержденных газов

при откачке паров криогенных жидкостей [3,4]. В последнее время интерес к этим процессам возрос в связи с совершенствованием технологий жидкого льда, текучей суспензии воды или водного раствора с мелкими кристаллами льда [5-9]. Они наметили значительный прорыв в холодильной технике с точки зрения энергосбережения и

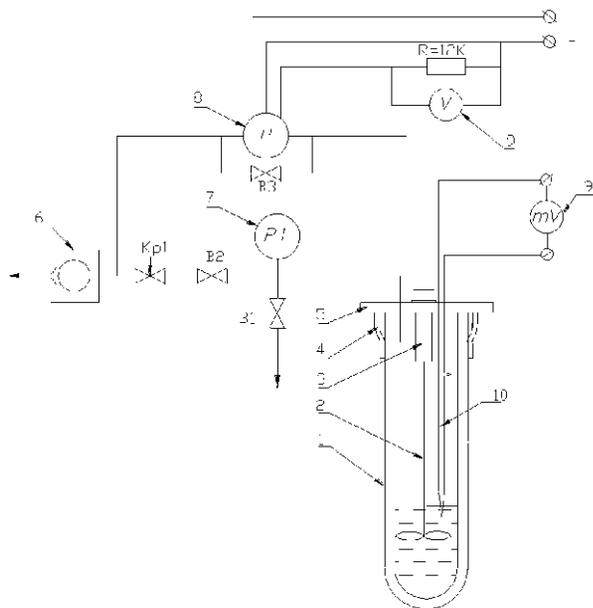


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения водяной шуги при вакуумировании:
 1 – сосуд Дьюара; 2 – турбинная мешалка;
 3 – привод мешалки; 4 – резиновая манжета;
 5 – крышка; 6 – вакуумный насос НВЗ-20;
 7 – мановакуумметр; 8 – датчик перепада давления ИКД6ТДф; 9 – восьмиканальный измеритель-регистратор ТРМ138;
 10 – термопара типа хромель-алюмель.

обеспечения экологической безопасности. Дополнительные преимущества использования жидкого льда связаны с возможностью аккумуляции холода, уменьшения диаметра труб и затрат на прокачку хладоносителя. Одним из способов получения жидкого льда является испарительное охлаждение рассола за счет вакуумирования [9].

Создать эффективные технологии испарительного охлаждения с последующей кристаллизацией жидкости невозможно без изучения закономерностей и достоверного описания термогидравлических эффектов в процессе роста и движения паровых пузырей, зарождения и роста кристаллов, теплообмена при кристаллизации жидкости. В связи с этим представленная в работе [10] математическая модель расчета процесса испарительного охлаждения жидкости с последующей ее кристаллизацией требует дополнений.

Данная работа посвящена изучению влияния режимных параметров и концентрации рассола

NaCl на процесс объемной кристаллизации и определению величины площади межфазной поверхности при испарительном охлаждении жидкости.

При вакуумировании рассола с начальной температурой выше температуры кристаллизации его температура уменьшается, а после достижения линии плавления в рассоле начинается кристаллизация. В реальных условиях для этого требуется некоторое переохлаждение, зависящее от степени турбулентности, свойств фаз и наличия в жидкости инородных включений. Небольшое переохлаждение сохраняется и в процессе дальнейшего роста кристаллов. Кроме того, в действительном процессе испарительного охлаждения давление пара над зеркалом жидкости меньше равновесного, соответствующего параметрам жидкой фазы. Для изучения влияния концентрации растворяемого вещества и интенсивности перемешивания на процесс объемной кристаллизации была проведена серия экспериментов с раствором поваренной соли концентрацией 2, 5, 8%.

Эксперименты проводились на установке (рис.1), оснащенной современными аттестованными средствами измерений.

Для измерения температуры в установке использовались шесть индивидуально тарированных хромель-алюмелевых термопар 10 с погрешностью показаний $\pm 0,2$ °С, две из которых располагались в паровом пространстве, а четыре в жидкости. Контроль процесса вакуумирования емкости осуществлялся по мановакуумметру 7 типа ОБМВ1-160 класса точности 1,5. Для измерения давления использовался датчик перепада давления 8 типа ИКД6ТДф, позволяющий измерять перепад давления до 1600 Па. В результате индивидуальной тарировки датчика погрешность измерения не превышала 1 %. В процессе вакуумирования с интервалом 15 секунд показания термопар и датчика давления регистрировались универсальным восьмиканальным измерителем-регистратором 9 (ТРМ 138) и заносились в память компьютера при помощи SOFT SCADA 1.02. Результаты экспериментов представлены на рис. 2, 3.

Результаты экспериментов показали, что для начала процесса зарождения кристаллов необхо-

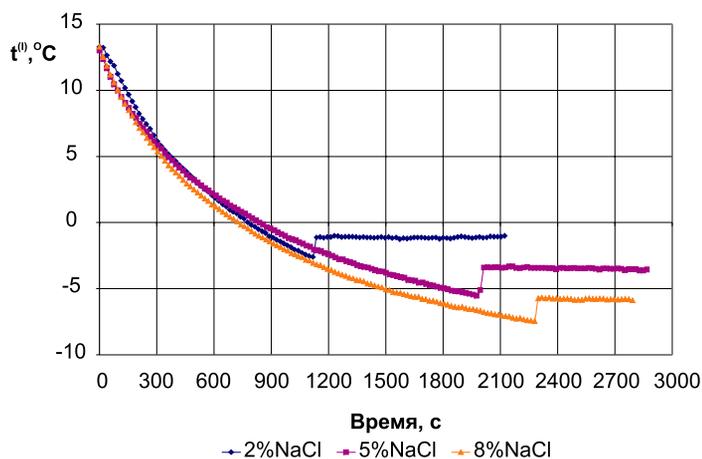


Рис. 2. Влияние концентрации рассола на степень переохлаждения при перемешивании мешалкой $n = 800$ об/мин.

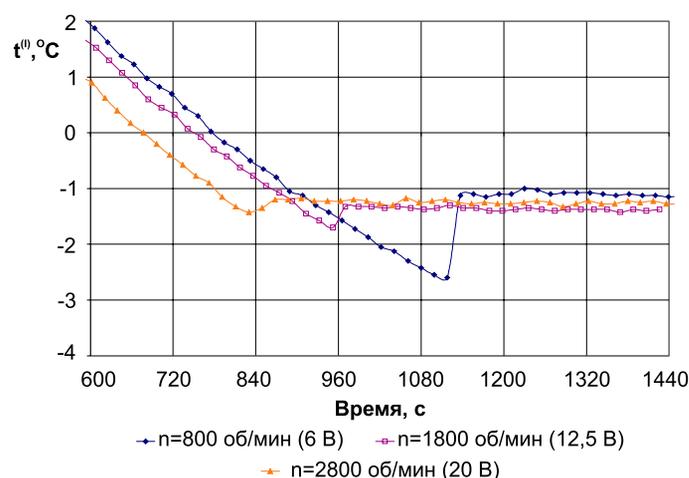


Рис. 3. Влияние интенсивности перемешивания на степень переохлаждения 2% рассола NaCl.

димо переохлаждение жидкости, о чем свидетельствует скачок температуры в начальный момент кристаллизации (рис.2, 3). В диапазоне концентраций рассола NaCl 2...8% переохлаждение до начала кристаллизации составляет 0,2...2,3 К. Как показал регрессионный анализ, степень переохлаждения жидкости не зависит от начальной концентрации рассола (рис.2) и уменьшается с увеличением числа оборотов мешалки (рис.3).

При испарительном охлаждении за счет снижения давления в паровом пространстве над жидкостью в верхних слоях происходит процесс образования и роста паровых пузырей, что подтверждается экспериментально. В результате площадь межфазной поверхности превышает площадь зеркала жидкости. Этот факт необходимо учитывать при описании процессов тепло- и массообмена при вакуумировании жидкости [10] за счет коэффициента увеличения площади межфазной поверхности.

Далее приводится модель расчета тепло- и массообмена при всплытии паровых пузырей в неподвижной жидкости, позволяющая определить величину площади межфазной поверхности, изменение размеров, массы и температуры пузырей.

Процесс образования пузырей (кипение) лимитируется гидростатическим давлением жидкости, далее профиль давления по глубине парожидкостной среды определяется плотностью и объемным содержанием жидкости в смеси и из-

меняется от значения, соответствующего давлению насыщения на кривой кипения жидкости, до значения давления в паровой подушке над жидкостью. Вследствие роста всплывающих пузырей объемное паросодержание увеличивается и в верхних слоях жидкости принимает максимальное значение. При построении модели считаем, что профиль паросодержания при перемешивании смеси подобен тому, что получается в результате расчета при фиксированном числе пузырей, первоначально возникших как зародыши парообразования с давлением насыщения раствора. Вследствие интенсивного перемешивания полагаем, что температура жидкости постоянна, а ее изменение определяется после расчета количества пара, отведенного в паровую подушку. Также полагаем, что пузырьки пара имеют сферическую форму, а заключенный в них пар – калорически совершенный идеальный газ. Капиллярными эффектами пренебрегаем.

При расчете тепло- и массообмена пузырька с жидкостью принимаем квазиравновесную схему фазового перехода, когда температура на межфазной поверхности соответствует температуре насыщения компоненты, претерпевающей фазовый переход. Ввиду интенсивного теплообмена в процессе парообразования температуру пара в пузырьке считаем равной температуре на межфазной поверхности.

Интенсивность фазового перехода в единице объема смеси определяется соотношением

$$J_{lv} = \alpha_d (\rho_\sigma - \rho_1^{(v)}) A_v. \quad (1)$$

Используя рекомендации, приведенные в [11], коэффициент массоотдачи α_d находится из соответствующих критериальных уравнений.

Площадь межфазной поверхности в единице объема смеси

$$A_v = \pi d_b^2 N_b. \quad (2)$$

Скорость всплытия пузыря определяется из равенства сил Архимеда и сопротивления

$$g \frac{\pi d_b^3}{6} (\rho_m - \rho_1^{(v)}) = C_\mu \frac{\rho^{(l)} w_b^2}{2} \frac{\pi d_b^2}{4}. \quad (3)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления при всплытии пузырька зависит от числа Re и We и определяется по приведенным в [12] соотношениям. При достаточно больших значениях числа Вебера ($We_{кр} \sim 2\pi$) из-за появления на сферической поверхности нелинейных, конечных по амплитуде возмущений происходит разрушение парового пузыря. При этом условие дробления (4) задается динамическим напором в газовой фазе [12]

$$We = \frac{\rho_1^{(v)} w_b^2 d_b}{\sigma^{(l)}} > We_{кр} \approx 2\pi. \quad (4)$$

Теплота, отведенная из объема жидкости высотой dh за счет парообразования

$$dQ_b = J_{lv} \Psi_{lv} \frac{dh}{w_b}. \quad (5)$$

Тогда за счет парообразования температура жидкости уменьшится на величину

$$dT^{(l)} = \frac{dQ_b}{c^{(l)} \rho^{(l)}}. \quad (6)$$

Расчет процесса тепло- и массообмена, протекающего при всплытии парового пузыря в жидкости, ведется в зависимости от профиля давления жидкости при заданном шаге dp . На каждом шаге по давлению определяются высота слоя жидкости, в которой идет процесс парообразования, масса пузырька, площадь межфазной поверхности:

$$dh = \frac{1}{g(1 - \alpha^{(v)}) \rho^{(l)}} dp, \quad (7)$$

$$dG_b^{(v)} = \frac{J_{lv}}{g(1 - \alpha^{(v)}) \rho^{(l)} w_b N_b} dp, \quad (8)$$

$$dA_b = A_v A_{гор} \frac{1}{g(1 - \alpha^{(v)}) \rho^{(l)}} dp. \quad (9)$$

По мере притока массы из жидкой фазы в пузырек на каждом слое смеси высотой dh изменяется его диаметр

$$d_b = \sqrt[3]{\frac{6G_b^{(v)}}{\pi \rho_1^{(v)}}}. \quad (10)$$

После интегрирования соотношений (9) коэффициент увеличения площади межфазной поверхности определяется соотношением

$$K_{гор} = 1 + \frac{A_b}{A_{гор}}. \quad (11)$$

В связи с падением давления по высоте парожидкостной среды от значения, соответствующего давлению насыщения на кривой кипения жидкости до давления в паровом пространстве над жидкостью, происходит снижение температуры межфазной поверхности, что приводит к увеличению интенсивности фазового перехода, диаметра пузырька и, как следствие, объемного паросодержания (рис.4). На начальном этапе сила сопротивления со стороны жидкости не оказывает существенного влияния на процесс всплытия пузырька, и скорость всплытия непрерывно растет до достижения критического числа Рейнольдса, затем начинает сказываться влияние

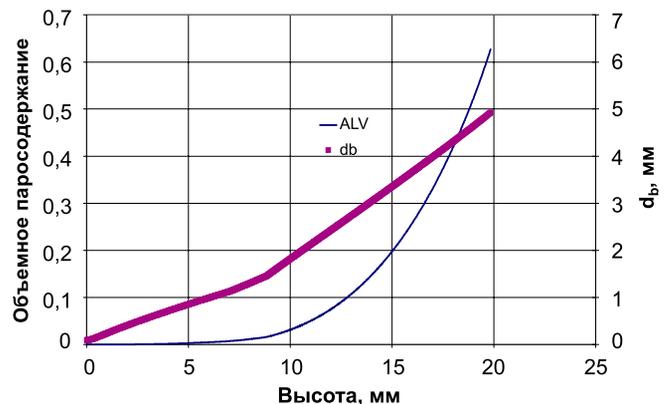


Рис. 4. Изменение объемного паросодержания при росте всплывающего парового пузыря.

поверхностного натяжения, и скорость резко уменьшается и растет менее интенсивно.

Используя экспериментальные данные по испарительному охлаждению рассола и модель расчета тепло- и массообмена при всплывании паровых пузырей в неподвижной жидкости, получили эмпирическую корреляцию (12) для коэффициента увеличения площади межфазной поверхности, входящего в соотношения модели кристаллизации рассола при вакуумировании [10].

$$K_{\text{гор}} = -2416213,59 \left(\frac{P^{(v)}}{P_{\text{н1}}} \right)^3 + 6561430,2 \left(\frac{P^{(v)}}{P_{\text{н1}}} \right)^2 - 5939452,36 \left(\frac{P^{(v)}}{P_{\text{н1}}} \right) + 1792170,55. \quad (12)$$

В процессе испарительного охлаждения жидкости значение коэффициента увеличения площади межфазной поверхности уменьшается, что обусловливается снижением интенсивности парообразования из-за уменьшения температуры жидкости и давления в паровом пространстве над ней.

Выводы

Полученные результаты дополняют разработанную ранее модель [10] кристаллизации рассола при вакуумировании и позволяют более точно учесть влияние геометрических и режимных факторов на про-

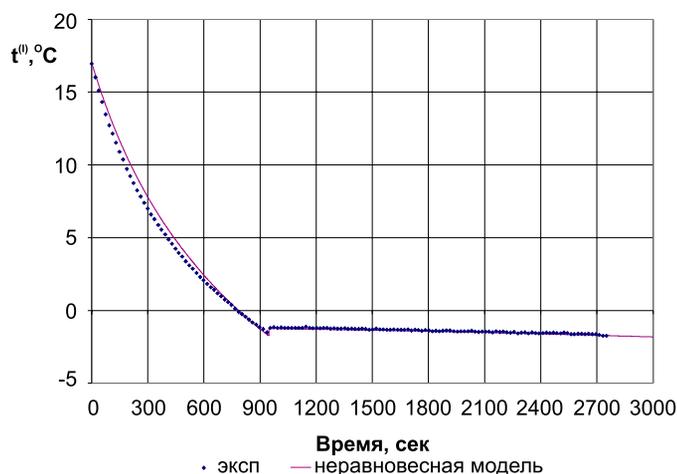


Рис. 5. Изменение температуры жидкой фазы при испарительном охлаждении 2% рассола NaCl с последующей кристаллизацией.

цесс охлаждения и кристаллизации вакуумируемого рассола. Результаты расчёта удовлетворительно согласуются с опытными данными (рис. 5) и могут служить базой для разработки генератора жидкого льда.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пан Л.* Концентрирование вымораживанием. Пер. с венгерского. М.: Легкая пищевая промышленность. 1982. — 96 с.
2. *Холодильные установки* / Чумак И.Г., Чепурненко В.П., и др.; Под ред. И.Г.Чумака. М.: Агропромиздат. 1991. — 495 с.
3. *Опреснение воды замораживанием* / М.В. Колонин; Под ред. В.А. Клячко, Л.З. Мельцера; АН ТССР Ин-т пустынь. — Ашхабад: Ылым. 1977. — 244 с.
4. *Плотников В.Т., Филаткин В.Н.* Раздельные вымораживающие установки. М.: Агропромиздат. 1987. - 352 с.
5. *З. Дворжак.* Бинарный лёд. // Холодильный бизнес. —2000. —№3. — С. 7...10.
6. *Wang M.J., Lopez G., Goldstein V.* Ice slurry for shrimp farming and processing// Proceedings of the Fifth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. — Stockholm, Sweden. — 2002. — P. 161–168.
7. *Laude-Bousquet A., Fournaison L.* Technology use of ice slurries // Proceedings of the Fifth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. — Stockholm, Sweden. — 2002. — P. 169–174.
8. *Akio S.* The latest advances of TES// International journal of refrigeration. — N25. — 2002. — P. 177-189.
9. *Жеманюк П.Д., Таран А.И., Бакиш П.А., Петухов И.И., Михайленко Т.П.* К вопросу получения бинарного льда в условиях вакуумирования жидкостей // Холодильна техніка і технологія. — 2003. — N3(83). — С.13-17.
10. *Петухов И.И., Михайленко Т.П.* Расчет процесса кристаллизации рассола в вакуумированном объеме // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2003. - N37/2. — С.79-82.
11. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. — 417 с.
12. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987. — 464 с.

Получено 03.10.2005 г.