

УДК 532.78

Т.П. МИХАЙЛЕНКО

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ВОДЯНОЙ ШУГИ ИЗ РАССОЛА

Представлены результаты экспериментов по получению жидкого льда из водного раствора поваренной соли различной концентрации при изменении интенсивности перемешивания. Исследованы факторы, определяющие форму и размер кристаллической фазы водяной шуги. Показано, что для начала процесса зарождения кристаллов необходимо переохлаждение жидкости, величина которого в большей степени зависит от интенсивности перемешивания и практически не зависит от концентрации рассола. Обнаружено, что при концентрациях рассола NaCl менее 2% форма образующихся кристаллов существенно асимметрична и приближается к чешуйчатой.

Ключевые слова: эксперимент, жидкий лед, рассол, вакуумирование, объемная кристаллизация, переохлаждение, кристалл.

Введение

Жидкий лед (водяная шуга – суспензия воды и мелких кристаллов льда), благодаря своим свойствам, широко используется в системах кондиционирования воздуха и охлаждения помещений; в пищевой промышленности: для быстрого охлаждения плодов и овощей, при переработке мяса и птицы, на молочных, сыродельных и пивоваренных заводах, при транспортировке скоропортящихся продуктов [1]. В качестве среды для получения жидкого льда могут использоваться водные растворы солей (хлористых натрия и кальция), этилен- и пропилен гликоля при различных концентрациях растворяемого вещества [2].

Существует два основных подхода к получению жидкого льда [3]:

1) соскабливание кристаллов льда, образующихся на охлажденной поверхности труб или пластин;

2) образование кристаллов льда в объеме переохлажденной жидкости.

В рамках второго подхода в установках жидкого льда могут использоваться компрессора авиационных газотурбинных двигателей [4]. При этом в случае адиабатного КПД компрессора 0,4 и выше, такие установки жидкого льда энергетически эффективнее в сравнении с традиционными фреоновыми машинами [5].

Постановка и решение задачи

Для исследования особенностей процесса объемной кристаллизации необходимо сочетание теоретических и экспериментальных методов. Экспериментальные результаты необходимы не только для проверки адекватности расчётной модели, но и для обоснования отдельных её допущений и соотношений.

Для изучения факторов, влияющих на процесс формирования кристаллов льда при объемной кристаллизации, на кафедре аэрокосмической теплотехники НАКУ «ХАИ» была создана экспериментальная установка на базе сосуда с вакуумной изоляцией (сосуд Дьюара) и вакуумного насоса марки НВЗ-20 с быстротой действия по входу 20 л/с. Схема установки представлена на рис. 1. С её помощью можно моделировать процесс кристаллизации различных растворов при вакуумировании. Для получения мелкокристаллической структуры образующегося льда установка оборудована турбинной мешалкой 2 с двигателем постоянного тока (27В) 3, позволяющего регулировать обороты мешалки в пределах 800 – 3000 об/мин за счет изменения напряжения питания привода.

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 в процессе образования жидкого льда использовался датчик перепада давления 8 типа ИКД6ТДф, позволяющий измерять перепад давления до 1600 Па. В результате индивидуальной тарировки датчика с использованием жидкостного дифференциального манометра с

наклонной трубкой погрешность измерения не превышала 1 %. Сигналы показаний термопар и датчика давления регистрировались измерительной системой 9 на базе ТРМ 138.

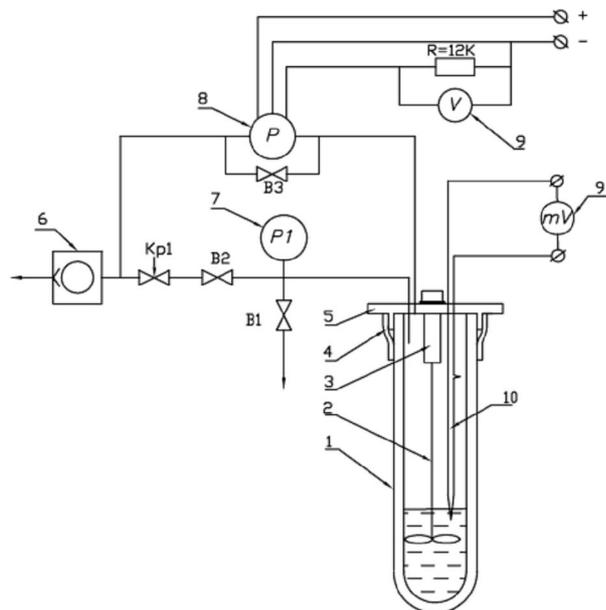


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения водяной шуги при вакуумировании:

- 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 – гребёнка термопар типа хромель-алюмель

Эксперименты проводились с 250 г раствора $H_2O-NaCl$ 2%, 5%, 8% концентрации. Приготовленный рассол заливался в сосуд 1. Давление над рассолом понижалось вакуумным насосом 6. Для изучения влияния интенсивности перемешивания, частота вращения мешалки 2 устанавливалась согласно плану полного двухфакторного эксперимента [6]. 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. При достижении в объеме температуры рассола, соответствующей 20% концентрации льда, эксперимент завершался. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

На рис. 2, 3 показаны графики зависимости степени переохлаждения до начала кристаллизации от интенсивности перемешивания и концентрации рассола. Для начала процесса зарождения кристаллов необходимо переохлаждение жидкости, о чем свидетельствует резкий скачок температуры в начальный момент кристаллизации (рис. 2, 3). Как

показал регрессионный анализ, степень переохлаждения жидкости не зависит от начальной концентрации рассола (рис. 2) и уменьшается с увеличением числа оборотов мешалки (рис. 3).

Таблица 1

Результаты экспериментов

Начальная концентрация NaCl, %	Частота вращения мешалки, об/мин	Температура начала кристаллизации, °C	Переохлаждение жидкости, °C
2	800	-1,12	1,47
2	1800	-1,32	0,37
2	2800	-1,2	0,22
5	800	-3,4	2,12
5	2800	-3,65	0,37
8	800	-5,72	1,72
8	1800	-5,27	0,62
8	2800	-5,45	0,35
2	800	-1,47	2,27
2	2800	-1,2	0,3
8	800	-6	2,32
8	2800	-5,82	1

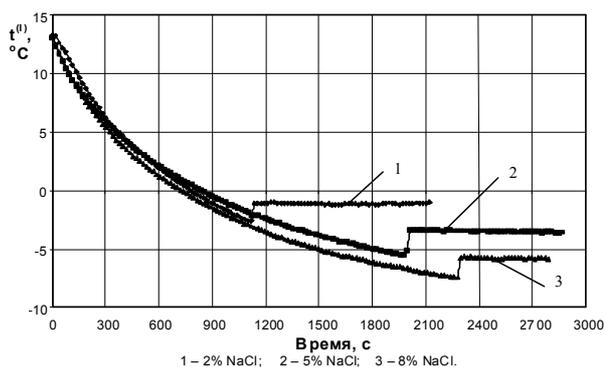


Рис. 2. Влияние концентрации рассола

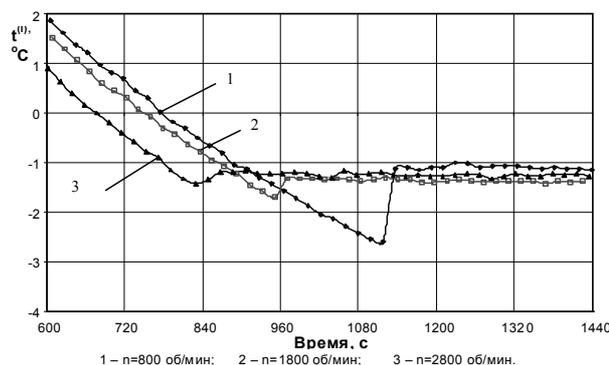


Рис. 3. Влияние интенсивности перемешивания

Это может быть связано с тем, что перемешивание доставляет в среду извне избыточную энергию, необходимую для образования зародышей кристаллизации. Кроме этого влияние перемешивания обусловлено увеличением скорости диффузии воды

к месту образования зародыша, оно также может вызывать дополнительную генерацию твердых частиц с поверхности сосуда и мешалки в объем раствора, что способствует зарождению кристаллов.

Для изучения формы и размера кристаллов льда эксперименты проводились с дистиллированной водой, 2 и 5% раствором NaCl. За счет вакуумирования жидкость охлаждалась до температуры, необходимой для инициализации процесса кристаллизации, и при образовании кристаллов осуществлялось их фотографирование фотоаппаратом «Зенит Е» с насадкой (комплект колец). Для освещения объекта фотографирования использовались синхронизированные с затвором фотоаппарата два импульсных осветителя с длительностью импульса 1 мкс и энергией 1 Дж. Для определения размера кристаллов в зону фотографирования была помещена игла диаметром 0,625 мм в качестве масштабного фактора. В случае дистиллированной воды образовавшиеся кристаллы быстро агломерировали с образованием устойчивого слоя на поверхности. Для исследованных растворов явление имело другой ха-

рактер. Динамика формирования кристаллов в рассоле представлена на рис. 4, 5.

Процесс кристаллизации 2 и 5% раствора происходил во всем объеме перемешиваемой жидкости. При кристаллизации 2% раствора отмечалось образование дискообразных кристаллов льда эллиптической формы с диагоналями 1,11 мм и 0,61 мм (рис. 4). Кристаллизация 5% раствора NaCl сопровождалась образованием кристаллов льда близкой к сферической формы диаметром 0,1 мм (рис. 5).

Заключение

Результаты экспериментов показали, что для начала процесса зарождения кристаллов необходимо переохлаждение жидкости, величина которого в большей степени зависит от интенсивности перемешивания и не зависит от концентрации раствора. После начала кристаллизации по мере роста кристаллов концентрация соли в жидкой фазе раствора непрерывно увеличивается, о чем свидетельствует уменьшение температуры кристаллизации раствора.

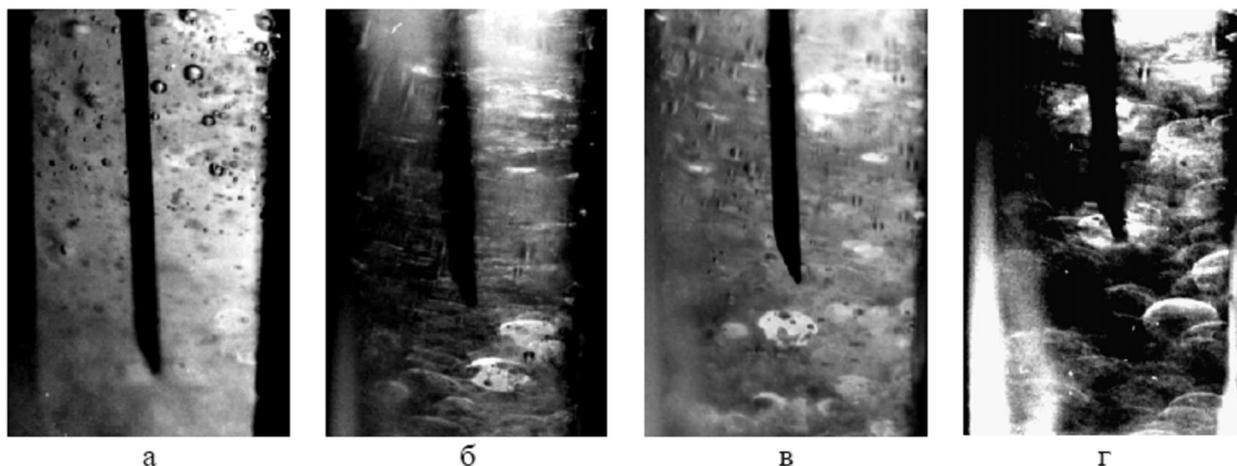


Рис. 4. Динамика формирования кристаллов в рассоле с 2% NaCl: а – 15 сек; б – 150 сек; в – 300 сек; г – 600 сек. (диаметр иглы 0,625 мм)

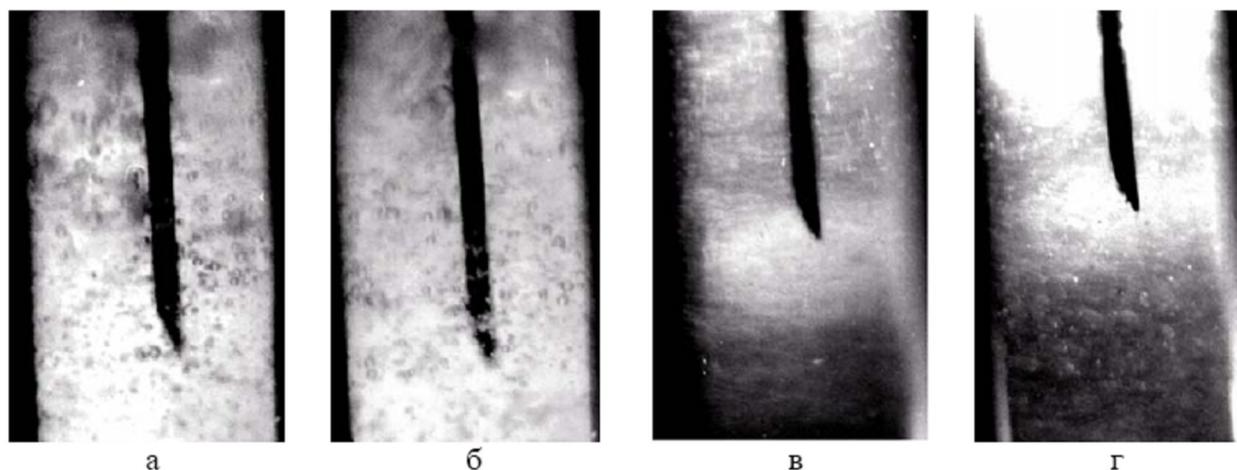


Рис. 5. Динамика формирования кристаллов в рассоле с 5% NaCl: а – 15 сек; б – 60 сек; в – 240 сек; г – 360 сек. (диаметр иглы 0,625 мм)

При анализе результатов измерения температуры в паровой подушке ёмкости был установлен факт её тесной корреляции с температурой насыщения, соответствующей текущим значениям давления в подушке и концентрации рассола, что позволило обосновать принятое в расчётной модели допущение. Результаты измерения темпа охлаждения и наблюдаемое в опыте изменение объёмного паросодержания в поверхностном слое перемешиваемой жидкости послужили базой для определения коэффициента увеличения площади межфазной поверхности при парообразовании. Обнаружено также, что при концентрациях рассола NaCl менее 2% форма образующихся кристаллов существенно асимметрична и приближается к чешуйчатой.

Литература

1. Дворжак З. Бинарный лёд / З. Дворжак // *Холодильный бизнес*. – 2000. – № 3. – С. 6-9, 44.
2. Melinder A. *Enthalpy-phase diagrams of aqueous solution for ice-slurry applications* / A. Melinder // *Proceedings of the Fifth Workshop on Ice Slurries of the*

International Institute of Refrigeration. – Stockholm, Sweden. – 2002. – P. 107-118.

3. К вопросу получения бинарного льда в условиях вакуумирования жидкостей / П.Д. Жеманюк, А.И. Таран, П.А.Бакии и др. // *Холодильна техніка і технологія*. – 2003. – №3(83). – С. 13-17.

4. Эффективность установок для производства жидкого льда при вакуумировании / И.И. Петухов, Т.П. Михайленко, П.Д. Жеманюк и др. // *Труды XIII Междунар. конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке»*. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2004. – Т. 3. – С. 47-52.

5. Перспективы использования осевых компрессоров при охлаждении шахтного воздуха / Т.П. Михайленко, И.И. Петухов, П.Д. Жеманюк и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №10 (46). – С. 111-115.

6. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А.Е. Егоров, Г.Н. Азаров, А.В. Коваль; под ред. В.Г. Воронова. – Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 240 с.

Поступила в редакцию 16.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник И.Г. Суворова, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного, Харьков.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ВОДЯНОЇ ШУГИ З РОЗСОЛУ

Т.П. Михайленко

Представлені результати експериментів по отриманню рідкого льоду з водного розчину кухарської солі різної концентрації при зміні інтенсивності перемішування. Досліджені фактори, що впливають на форму та розмір кристалічної фази водяної шуги. Показано, що для початку процесу зародження кристалів необхідне переохолодження рідини, величина якого більшою мірою залежить від інтенсивності перемішування і практично не залежить від концентрації розсолу. Виявлено, що при концентраціях розсолу NaCl менше 2% форма кристалів, що утворюються, істотно асиметрична і наближається до лускової.

Ключові слова: експеримент, рідкий лід, розсіл, вакуумування, об'ємна кристалізація, переохолодження, кристал.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SLURRY ICE FORMATION PROCESS FROM BRINE

T.P. Mikhailenko

The experimental results of slurry ice formation from water solution with different concentration of salt at a change intensity of interfusion are presented. Factors determining on form and size of crystalline phase of slurry ice are investigated. It is shown that for the beginning of crystal nucleation process require the supercooling of liquid. The supercooling of liquid in a greater degree depends on intensity of interfusion and practically does not depend on the concentration of brine. It is discovered, when the concentrations of brine less than 2% the form of appearing crystals is substantially asymmetric and approaches scaly.

Key words: experiment, slurry ice, brine, vacuumization, volumetric crystallization, supercooling, crystal.

Михайленко Тарас Петрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник каф. 205, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: k205@d2.khai.edu.