

DOI: 10.17516/1999-494X-0371

УДК 536.248.2

Experimental Study of Frost Formation in a Plate Heat Exchanger

Evgeniy N. Vasil'ev*,
Dmitriy P. Emel'yanov and Denis A. Nesterov
Institute of Computational Modelling SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 10.11.2021, received in revised form 09.01.2022, accepted 06.02.2022

Abstract. The paper presents the results of a study of frost formation on the surface of the heat exchanger fins when a moist air flow is flown around. The description of the experimental stand and the experimental procedure are given. The effect of frost formation on the efficiency of heat transfer was estimated from the time temperature dependences at various points of the fin surface. During the experiments, the thickness of the frost layer and the degree of overlap of the intercostal spaces were monitored visually and using an anemometer. Analysis of the experimental data revealed the features of frost formation depending on the geometric parameters of the ribs. The results obtained can be used in the development and design of heat exchangers for refrigeration equipment.

Keywords: frost formation, plate heat exchanger, heat transfer, refrigeration unit.

Citation: Vasil'ev, E. N., Emel'yanov, D.P, Nesterov, D. A. Experimental study of frost formation in a plate heat exchanger. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(1), 24–34. DOI: 10.17516/1999-494X-0371

Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике

Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов, Д. А. Нестеров
Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Представлены результаты исследования инееобразования на поверхности ребер теплообменника при обтекании потоком влажного воздуха. Приведено описание экспериментального стенда и методики проведения экспериментов. Влияние инееобразования на эффективность теплопередачи оценивалось по временным температурным зависимостям в различных точках поверхности ребра. В ходе экспериментов толщина слоя инея и степень перекрытия межреберных промежутков контролировались визуально и с помощью анемометра. Анализ экспериментальных данных выявил особенности образования инея в зависимости от геометрических параметров ребер. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании теплообменников холодильного оборудования.

Ключевые слова: инееобразование, пластинчатый теплообменник, теплопередача, холодильная установка.

Цитирование: Васильев, Е. Н. Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике / Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов, Д. А. Нестеров // Журн. Сиб. федер. унта. Техника и технологии, 2022, 15(1). С. 24–34. DOI: 10.17516/1999-494X-0371

Введение

Эффективная работа теплообменников особенно актуальна для термоэлектрических холодильных установок из-за их сравнительно низкого холодильного коэффициента [1]. Характеристики термоэлектрической системы охлаждения исследованы в работах [2–4], результаты расчетов показали значительное влияние термических сопротивлений теплообменников устройств подвода и отвода теплоты на холодильный коэффициент и холодопроизводительность. При работе холодильных установок влага, содержащаяся в воздухе холодильной камеры, оседает в виде инея на ребрах теплообменника, имеющих отрицательную температуру. Процессы образования инея и последующего его оттаивания на поверхности ребер оказывают существенное влияние на эффективность теплообменников. Во-первых, слой инея представляет собой дополнительное термическое сопротивление, снижающее общий коэффициент теплоотдачи поверхности ребер. Во-вторых, нарастание слоя инея уменьшает проходное сечение межреберных воздушных каналов, что приводит к снижению расхода воздуха и производительности теплообменника. Для устранения этих негативных факторов необходимо периодически производить оттаивание инея и удаление образовавшейся воды из межреберных каналов, при этом частота циклов оттаивания влияет на экономичность холодильных установок и сохранность продукции в камере. Учет процессов образования инея необходим при выборе конструкции и геометрических параметров ребристо-пластинчатых теплообменников.

В работе [5] представлена оригинальная конструкция термоэлектрического блока охлаждения, который содержит в себе восемь термоэлектрических модулей. Инееобразование

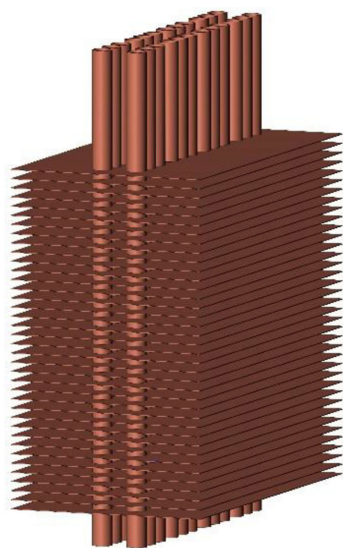


Рис. 1. Пластинчатый теплообменник термоэлектрического блока охлаждения

Fig. 1. Plate heat exchanger for thermoelectric cooling unit

происходит на поверхности ребер теплообменника, который обеспечивает теплообмен с охлаждаемым объемом. В конструкции блока применены технические решения, направленные на повышение эффективности охлаждения. В частности, использование термосифонов обеспечивает снижение величины термического сопротивления при теплопередаче от ребер воздушного радиатора к холодному спаю термоэлектрических модулей и препятствует возникновению обратного потока теплоты при выключении электропитания блока, которое периодически производится для оттаивания инея и удаления воды. К каждому термоэлектрическому модулю присоединены по три термосифона, ребра теплообменника выполнены в виде прямоугольных пластин и нанизаны на все термосифоны термоэлектрического блока (рис. 1). В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования инееобразования в макете теплообменника термоэлектрического блока охлаждения.

Описание экспериментального стенда

Исследование образования инея проводилось на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 2. Стенд состоит из корпуса бытовой морозильной камеры объемом 230 л 1, макета воздушного теплообменника 2, емкости с водой 3, вентилятора типа «улитка» 4, радиатора системы охлаждения 5. Для интенсификации испарения в емкость с водой помещены ультразвуковой генератор и нагреватель, которые подключены к источнику питания 6. Температурный режим ребер макета и внутреннего объема стенда обеспечивается за счет циркуляции теплоносителя, поступающего из циркуляционных термостатов LOIP LT-300 7 и 8. Система измерения температуры 9 включала в себя 9 термопар, размещенных в емкости с водой, на пластинах макета теплообменника, на входе и выходе из макета, в объеме камеры. Регистрация значений температуры производилась автоматизированным вычислительным комплексом на базе модульной измерительной системы L-Card E-270 9 и персонального ком-

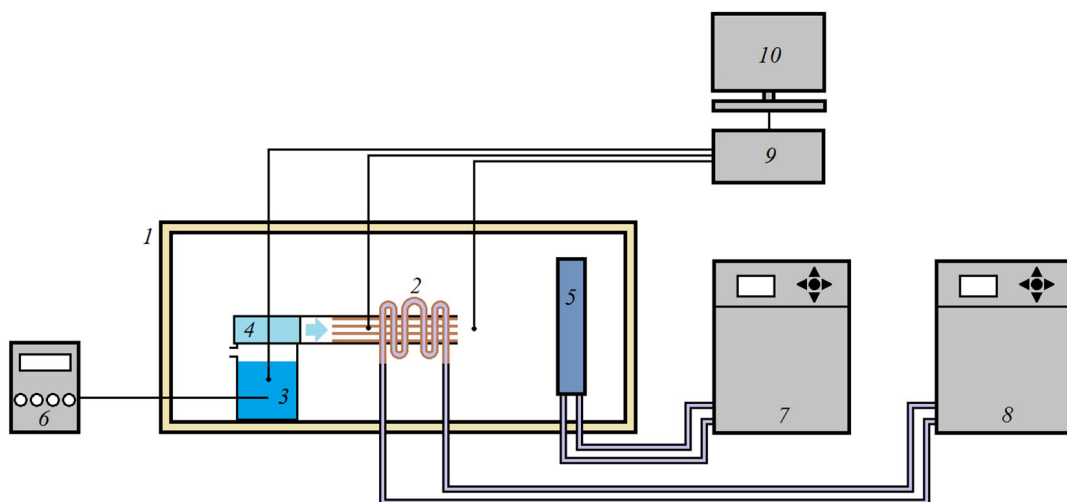


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – корпус, 2 – макет теплообменника, 3 – емкость с водой, 4 – вентилятор, 5 – радиатор, 6 – источник питания, 7 – термостат макета, 8 – термостат радиатора, 9 – модуль измерительной системы, 10 – компьютер

Fig. 2. Diagram of the experimental stand: 1 – case, 2 – model of the heat exchanger, 3 – container with water, 4 – fan, 5 – radiator, 6 – power supply, 7 – model thermostat, 8 – radiator thermostat, 9 – measuring system module, 10 – computer



Рис. 3. Общий вид элементов экспериментального стенда

Fig. 3. General view of the experimental stand elements

пьютера 10. Общий вид расположения элементов экспериментального стенда в корпусе морозильной камеры представлен на рис. 3.

Исследование образования инея производилось с помощью макета, являющегося фрагментом теплообменника термоэлектрического блока охлаждения. Термоэлектрические модули и термосифоны в макете не использовались, их функцию выполняли термостат и трубки, к которым припаяны ребра в виде прямоугольных пластин, имеющих поперечные размеры $150 \times 50 \text{ мм}^2$ и толщину 1 мм. Макет изготовлен из меди и соответствует части теплообменника термоэлектрического блока, в конструкцию макета входят 6 последовательно соединенных

трубок и 4 ребра (рис. 4а). Макет помещен в корпус из оргстекла, через входное сечение которого поступает влажный воздух от вентилятора, стрелкой показано направление потока воздуха (рис. 4б).

Трубки расположены по длине ребра несимметрично, расстояние от краев ребра до оси ближайшей трубки составляет 60 мм для длинной и 20 мм для короткой выступающих частей ребра соответственно (рис. 5). Термостат прокачивает по трубкам жидкий теплоноситель и позволяет поддерживать температуру стенок трубок в широком интервале значений. Процесс образования инея в экспериментах исследовался для двух вариантов ориентации макета: в первом случае у входного сечения макета расположена длинная выступающая часть ребер, как показано на рис. 5, во втором случае ближе к входу находится короткая выступающая часть ребер (рис. 4б).

Процесс образования инея зависит от множества факторов: температуры, влажности и скорости воздуха, температуры и геометрических характеристик поверхности ребер. Стенд позволяет проводить исследования при различных значениях этих параметров. Температура

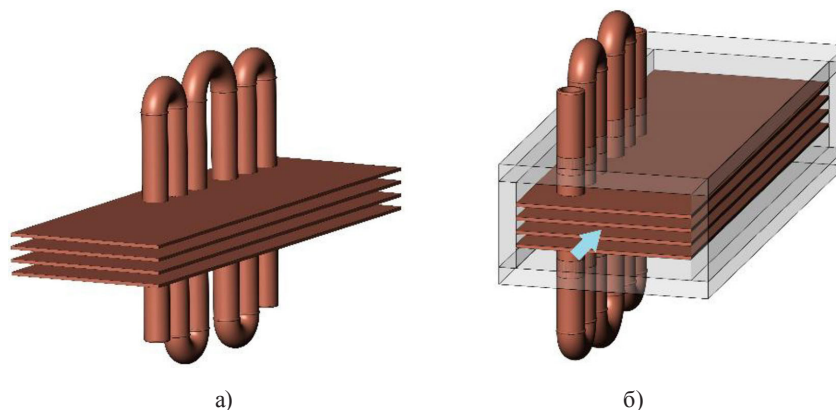


Рис. 4. Конструкция макета пластинчатого теплообменника

Fig. 4. Plate heat exchanger layout design

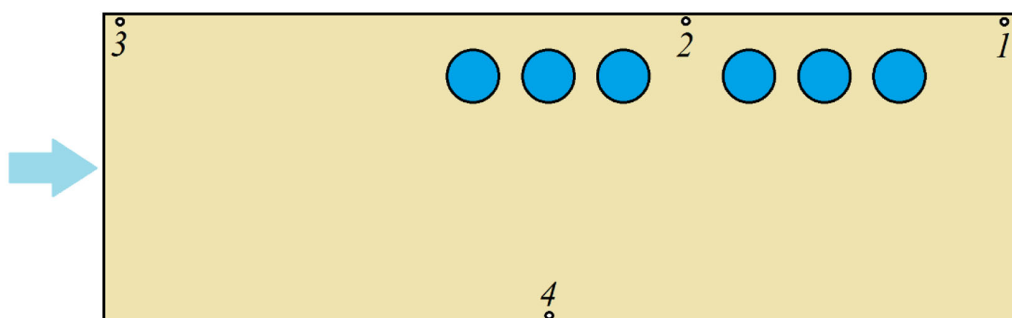


Рис. 5. Схема размещения трубок и термодпар на ребре теплообменника, стрелкой показано направление потока воздуха

Fig. 5. Layout of tubes and thermocouples on the fin of the heat exchanger, the arrow shows the direction of air flow

в объеме стенда регулируется с помощью термостата 8, который обеспечивает циркуляцию теплоносителя в радиаторе 5 (рис. 2). Мощность нагревателя в емкости определяет температуру воды и тем самым влияет на содержание влаги в воздухе, поступающем в макет. Скорость потока воздуха измерялась анемометром и управлялась изменением напряжения электропитания вентилятора. Температурный режим ребер задавался термостатом 7, соединенным с трубками макета. Измерение температуры производилось термопарами на одном из внутренних ребер, схема размещения термопар показана на рис. 5.

Образование инея и его влияние на температуру ребер

Проведение эксперимента начиналось с предварительного включения термостатов и нагревателя в емкости с водой. Это необходимо для получения заданных параметров исследуемого процесса инееобразования, динамика установления теплового режима в стенде отслеживалась по временным температурным зависимостям. После выхода температурных зависимостей на установившиеся уровни производилось включение вентилятора, обеспечивающего подачу влажного воздуха через входное сечение макета. С этого момента начиналось осаждение влаги на поверхности ребер и трубок в виде инея. Толщина слоя инея на ребрах оценивалась визуально через прозрачные стенки корпуса макета, по изменению температурных зависимостей и по скорости потока воздуха на выходе из макета. Эксперименты проводились для двух ориентаций макета, различных температурных режимов термостатов и значений мощности нагревателя в емкости с водой. Для исследования процесса образования инея на ребрах использовались показания термопар, фото- и видеосъемка.

Анализ влияния ориентации макета основан на сравнении результатов двух экспериментов, проведенных при следующих условиях. С помощью термостата макета в трубки подавался теплоноситель с температурой $T_1 = \text{минус } 25^\circ\text{C}$, термостат радиатора поддерживал температуру теплоносителя $T_2 = \text{минус } 20^\circ\text{C}$, вода в емкости в течение эксперимента подогревалась нагревателем и имела температуру около 8°C . При этих условиях значение температуры в средней части объема камеры устанавливалось на уровне минус 12°C . В начале экспериментов скорость воздуха на выходе из макета составляла 3 м/с .

Данные измерений температуры, приведенные на рис. 6, получены для варианта с расположением длинной выступающей части ребер у входного сечения макета. Численные значения на кривых соответствуют номерам термопар, их расположение и нумерация отмечены на рис. 5, кривая с нулевым значением относится к температуре воздуха на входе в макет. Нулевая точка отсчета времени на графиках температурных зависимостей относится к моменту включения вентилятора, подающего на вход макета влажный воздух. Окончание эксперимента, как правило, соответствовало перекрытию каналов теплообменника инеем, которое контролировалось визуально с помощью видеокamеры и по падению скорости воздуха на выходе из макета, измеряемой анемометром.

В отсутствие продува воздуха через макет температура ребер устанавливалась на значении примерно минус 24°C , близком к начальной температуре теплоносителя, подаваемого из термостата. В момент включения вентилятора в макет начинает поступать воздух из камеры с температурой минус 12°C , это обуславливает резкий рост всех показаний температуры. Поступающий из камеры воздух дополнительно нагревается при прохождении через емкость

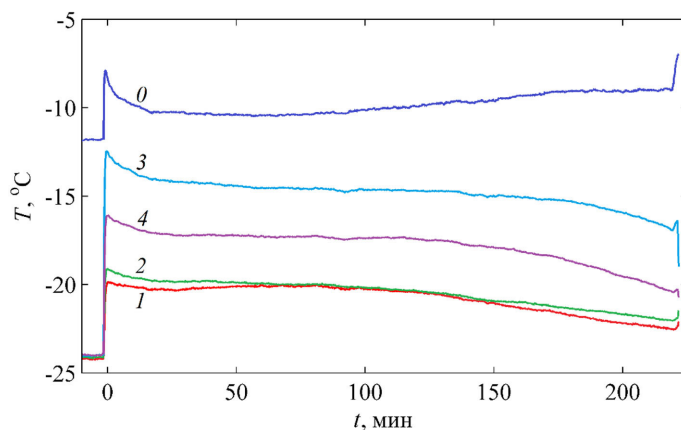


Рис. 6. Временные зависимости температуры

Fig. 6. Time dependences of temperature

с водой и тракт вентилятора, наибольшее влияние этот фактор оказывает в начальный момент времени, поскольку до включения продува вентилятор и элементы входного тракта подогреты водой, поддерживаемой при температуре 8°C . Установление равновесного температурного состояния вентилятора и элементов входного тракта, а также стабилизация значений температуры воздуха на входе в макет и поверхности ребер происходили в течение 10–15 мин. Дальнейшие 120–150 мин соответствуют периоду стабильных условий теплообмена, когда значения температур меняются незначительно, а сам уровень этих значений температуры определяется условиями теплообмена на поверхности ребер. На поверхности ребра наибольшие значения температуры на рис. 6 соответствуют термопарам 3 и 4, которые наиболее удалены от трубок. Показания расположенных вблизи трубок термопар 1 и 2 отличаются незначительно.

Величина температуры в каждой точке ребра определяется тепловым балансом притока теплоты от воздуха и ее дальнейшего оттока по материалу ребра к трубкам с теплоносителем. На отток теплоты в точке измерения влияет ее удаленность от трубок, толщина ребра и коэффициент теплопроводности материала, эти факторы не меняются во времени. Нарастание слоя инея практически не влияет на отток теплоты из-за очень малой его теплопроводности по сравнению с медью. Плотность теплового потока, поступающего на поверхность ребра, определяется произведением локального коэффициента теплопередачи α на разницу температур воздуха и ребра. Образование инея оказывает двойное разнонаправленное влияние на величину теплового потока. С одной стороны, шероховатость поверхности инея приводит к росту поверхности теплообмена и увеличению эффективного значения α [6], с другой – слой инея является дополнительным термическим сопротивлением, снижающим величину теплового потока, поступающего на поверхность ребра. Увеличение температуры на начальном этапе формирования инея наиболее заметно наблюдается на кривой 1, этот рост связан с увеличением α вследствие формирования шероховатой поверхности инея. В целом постоянство температуры в указанный период стабильного теплообмена, очевидно, обеспечивается постоянством термического сопротивления слоя инея. Такой эффект обусловлен тем, что через некоторый интервал времени после начала процесса десублимации иней постепенно уплотняется и его коэффициент

теплопроводности возрастает, в итоге с учетом роста толщины слоя его термическое сопротивление меняется слабо.

После периода стабильных условий теплообмена наблюдается плавное снижение температуры ребер, которое связано со снижением притока теплоты вследствие постепенного перекрытия поперечного сечения межреберных каналов при увеличении слоя инея на ребрах. По истечении примерно 3,5 ч падение температуры на ребрах стало существенным и эксперимент был завершен, скорость потока на выходе из макета к этому моменту упала до 0,25 м/с. Следует отметить, что при снижении скорости входного воздуха его температура повысилась вследствие лучшего подогрева от емкости с водой. Изображение макета с боковой стороны для этого момента времени приведено на рис. 7, входное сечение расположено слева, на переднем плане видны подводящие провода термопары № 4. Как видно на рисунке, на входном участке имеется зазор между ребрами, в средней наиболее холодной части ребер слой инея практически полностью заполняет межреберные промежутки. При этом межреберные зазоры еще не перекрыты инеем полностью как во входном (рис. 8а), так и выходном сечениях (рис. 8б).

Во втором исследованном варианте ориентации макета у входного сечения расположена короткая выступающая часть ребер, как показано на рис. 4б, при этом трубки и термопара 1 расположены вблизи входного сечения, а термопара 3 находится на выходе потока воздуха. Остальные параметры процесса остались неизменными. Результаты измерений приведены на рис. 9, для удобства сравнения результатов двух вариантов экспериментов масштаб осей на графике сохранен. Воздействие входного воздуха увеличило показания, полученные с термопары 1; наоборот, воздух, охладившийся при прохождении межреберных каналов, снизил показания с термопары 3, расположенной на выходе из макета. Условия теплообмена в месте расположения термопар 2 и 4 практически остались прежними, поэтому их показания суще-



Рис. 7. Слой инея на ребрах

Fig. 7. A layer of frost on the fins



Рис. 8. Образование инея на ребрах со стороны входного (а) и выходного (б) сечений

Fig. 8. Frost formation on the fins from the input (a) and output (b) sections

ственно не изменились. Основное отличие временных зависимостей на рис. 9 заключается в более раннем и резком снижении значений температуры, ее заметное падение начинается примерно через 1,5 ч, а через 2,5 ч канал уже был полностью перекрыт слоем инея и продув воздуха отсутствовал, поэтому эксперимент был прекращен.

К концу эксперимента входное сечение было практически полностью перекрыто инеем (рис. 10). Передняя кромка ребер находится вблизи трубок и имеет низкую температуру, поэтому здесь наблюдается наиболее интенсивное осаждение инея. Длинная выступающая часть ребер расположена у выходного сечения, толщина инея здесь была минимальной.

Сопоставление представленных результатов экспериментов показывает, что основное отличие заключается в характере инееобразования и времени перекрытия межреберных промежутков. В первом варианте ориентации с длинной выступающей частью ребер распределение температуры имеет падающий профиль от передней кромки к месту расположения трубок. По мере движения вдоль ребер влагосодержание воздуха и температура поверхности одновременно снижаются. Эти механизмы имеют разнонаправленное влияние на скорость осаждения инея, тем самым обуславливая более однородное осаждение инея на поверхности. В этом слу-



Рис. 9. Временные зависимости температуры

Fig. 9. Time dependences of temperature

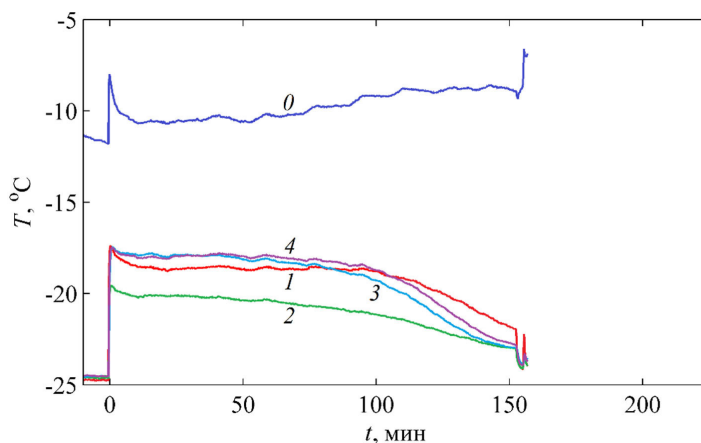


Рис. 10. Образование инея на ребрах со стороны входного сечения

Fig. 10. Frost formation on the ribs on the side of the inlet section

чае осаждение влаги из потока в виде инея распределяется на большей поверхности ребер, что увеличивает время перекрытия межреберных зазоров. Во втором варианте наиболее интенсивное осаждение инея наблюдается на холодной передней кромке ребер и ее ближайшей окрестности, которые контактирует с воздушным потоком, имеющим максимальное влагосодержание. Это приводит к более быстрому перекрытию входного сечения слоем инея. Выявленные особенности инеобразования показали возможность оптимизации конструкции теплообменника, представленной на рис. 1, за счет удлинения выступающей части ребер на входе, что позволит увеличить однородность намерзания инея и время работы термоэлектрического блока без оттаивания.

В ходе исследований также проводились эксперименты по изучению влияния других факторов на процесс инеобразования. Установлено, что при прочих равных условиях скорость намерзания инея и время перекрытия межреберных каналов прежде всего зависят от температуры воды в емкости, определяющей интенсивность испарения. Интенсивность испарения ожидаемо возрастает с ростом температуры воды в емкости, что приводит к увеличению скорости намерзания инея. Практически вся испарившаяся вода осаждается в виде инея на ребрах и трубках макета, поскольку на других элементах экспериментального стенда образования инея не наблюдалось. При подаче теплоносителя в радиатор с температурой $T_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в трубки макета с температурой $T_1 = \text{минус } 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение температуры в камере устанавливалось на уровне $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом наблюдалось обмерзание только на поверхности трубок и ребрах радиатора в окрестности трубок, на остальной площади ребер был конденсат в виде как сплошных перемычек межреберных промежутков, так и отдельных капель, которые лишь частично сдувались набегающим потоком.

Заключение

Таким образом, проведено экспериментальное исследование инеобразования при различных параметрах процесса на макете пластинчатого теплообменника, расположенном в холодильной камере. Измерения температуры поверхности ребра показали наличие временного интервала, в течение которого сохраняются стабильные значения температуры, свидетельствующие о поддержании теплопередающей способности ребер на постоянном уровне в условиях непрерывного инеобразования. Установлено, что удлинение выступающей части ребер позволяет повысить длительность временного интервала со стабильной теплопередачей за счет более однородного осаждения инея на поверхности ребра. В этом случае повышение однородности слоя инея обусловлено формированием снижающегося профиля температуры вдоль ребра в направлении движения влажного воздуха. Учет выявленных особенностей дает возможность оптимизации конструкции теплообменника термоэлектрического блока охлаждения с целью снижения негативного влияния инеобразования на теплообменных поверхностях и минимизации количества циклов оттаивания.

Список литературы / References

- [1] Иоффе А. Ф. *Полупроводниковые термоэлементы*. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 188 с. [Ioffe A. F. *Semiconductor Thermoelements*. Moscow-Leningrad, Akad. Nauk SSSR, 1960. 188 p. (in Russian)]

[2] Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения. *Журнал технической физики*, 2021, 91(5), 743–747 [Vasil'ev E. N. Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system. *Technical Physics*, 2021, 66(5), 720–724]

[3] Васильев Е. Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники. *Микроэлектроника*. 2020, 49(2), 133–141 [Vasil'ev E. N. Thermoelectric cooling of heat-loaded electronics, *Russian Microelectronics*, 2020, 49(2), 123–131]

[4] Васильев Е. Н. Регулирование режима охлаждения термоэлектрического блока. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2021, 14(4), 416–423 [Vasil'ev E. N. Regulation of cooling mode of thermoelectric block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2021, 14(4), 416–423 (in Russian)]

[5] Васильев Е. Н., Гейнц Э. Р., Деревянко В. А., Коков Е. Г., Кукушкин С. В. Термоэлектрический блок охлаждения. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2019, 12(2), 146–152 [Vasil'ev E. N., Gejnts E. R., Derevyanko V. A., Kokov E. G., Kukushkin S. V. Thermoelectric cooling block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(2), 146–152 (in Russian)]

[6] Явнель Б. К. Исследование коэффициентов тепло- и массообмена продольно обтекаемой пластины при инееобразовании. *Холодильная техника*, 1968, (12), 13–18 [Javnel' B. K. Investigation of the coefficients of heat and mass transfer of a longitudinally streamlined plate during frost formation, *Holodil'naja tehnika*, 1968, (12), 13–18 (in Russian)]