



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.577.6

DOI: 10.52957/27821919\_2022\_2\_19

# Состояние тепло- и холодопроизводительности воздушного теплового насоса в условиях влияния влажного воздуха на испаритель

**С.В. Федосов<sup>1</sup>, В.Н. Федосеев<sup>2</sup>, В.А. Воронов<sup>2</sup>**

Сергей Викторович Федосов

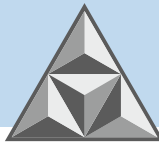
<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Москва, Российская Федерация  
*fedosov-academic53@mail.ru*

Вадим Николаевич Федосеев

<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация  
*4932421318@mail.ru*

Владимир Андреевич Воронов

<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация  
*atpenatiiii@gmail.com*



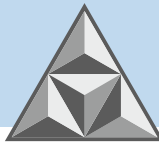
*Рассмотрены термодинамические процессы, влияющие на режим работы испарительно-конденсационного блока воздушной теплонасосной системы (ВТНС). Для эффективной эксплуатации теплохолодильных агрегатов необходимо учитывать внутренние и внешние условия протекания рабочего процесса. Фазовые превращения происходят не только в объеме кипящего хладагента при испарении и конденсации, но и на внешних теплопередающих поверхностях теплообменников. Эти процессы ведут к неизбежному возникновению и нарастанию во времени иная, игольчатых кристаллов льда с низкими значениями коэффициента теплопроводности, что приводит к снижению величины коэффициента теплопередачи от воздушного потока к кипящему или конденсирующемуся хладагенту и, соответственно, эффективности и долговечности работы воздушной теплонасосной системы.*

**Ключевые слова:** теплообмен, конденсация, теплопередача, испарительно-конденсационный блок, холодопроизводительность, инееобразование

**Для цитирования:**

**Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А.** Состояние тепло- и холодопроизводительности воздушного теплового насоса в условиях влияния влажного воздуха на испаритель // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 2. С. 19-28  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2\\_2022](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2_2022)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2022\_2\_19



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919\_2022\_2\_19

# The state of the heat and cooling capacity of the air heat pump under the influence of humid air on the evaporator

**S.V. Fedosov<sup>1</sup>, V.N. Fedoseev<sup>2</sup>, V.A. Voronov<sup>2</sup>**

Sergey V. Fedosov

<sup>1</sup>National research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

*edosov-academic53@mail.ru*

Vadim N. Fedoseev

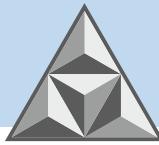
<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

*4932421318@mail.ru*

Vladimir A. Voronov

<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

*amenamiiii@gmail.com*



*Thermodynamic processes affecting the mode of operation of the evaporative-condensing unit of the air heat pump system (VTNS) are considered. For efficient operation of heat-cooling units, it is necessary to take into account the internal and external conditions of the workflow. Phase transformations occur not only in the volume of boiling refrigerant during evaporation and condensation, but also on the external heat transfer surfaces of heat exchangers. These processes lead to the inevitable occurrence and increase in time of frost, needle-like ice crystals with low values of the thermal conductivity coefficient, which leads to a decrease in the value of the heat transfer coefficient from the air stream to the boiling or condensing refrigerant and, accordingly, the efficiency and durability of the air heat pump system.*

**Key words:** heat exchange, condensation, heat transfer, evaporation-condensation unit, cooling capacity, frost formation

**For citation:**

**Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. & Voronov, V.A. (2022)** The state of the heat and cooling capacity of the air heat pump under the influence of humid air on the evaporator, *Smart Composite in Construction*, 3(2), pp. 19-28 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2\\_2022](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2_2022) (In Russian)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2022\_2\_19



## ВВЕДЕНИЕ

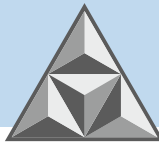
Учеными Национального исследовательского Московского государственного строительного университета и Ивановского государственного политехнического университета рассматривается ряд вопросов, связанных с изучением способов интенсификации теплообмена, в первую очередь в режиме кипение-испарение, который возникает в ходе работы испарительно-конденсационного блока воздушной теплонасосной системы (ВТНС) [1-3]. Все полученные выражения материального и теплового баланса, как для испарительного, так и конденсационного блока, справедливы для условий работы ВТНС в стационарном режиме. Периоды запуска и остановки теплового насоса имеют определенную продолжительность и некоторые особенности, и их необходимо учитывать для осуществления режимов основного цикла и цикла регенерации. Нестабильность и стохастичность температурно-влажностных параметров воздушной среды, т.е. воздушного потока, омывающего трубки испарительного блока, вызывают нестационарность работы установки ВТНС [4].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

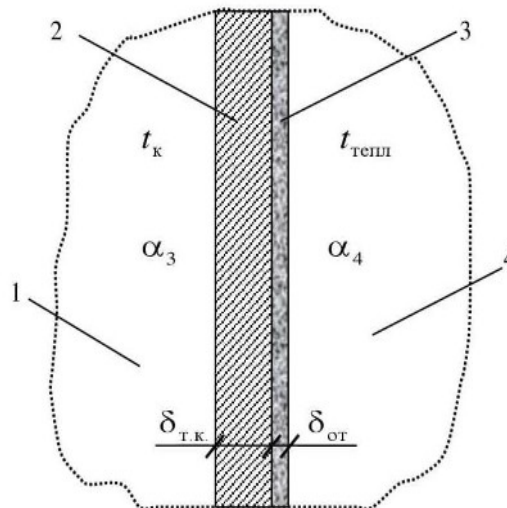
Холодопроизводительность испарителей ВТНС зависит от разности температур между поверхностью испарителя и окружающим воздухом и резко уменьшается при понижении температуры испарения. В условиях длительного изменения воздействия температуры происходит изменение их теплофизических и физико-механических характеристик, а оно, в свою очередь, способно изменять значения коэффициента теплоотдачи, а значит, и коэффициента теплопередачи. Также величина производительности ВТНС зависит от перегрева паров при всасывании их из испарителя, температуры конденсации и переохлаждения конденсата. Фазовые превращения происходят не только в объеме кипящего хладагента (испарение, конденсация), но и на внешних теплопередающих поверхностях теплообменников (конденсация влаги и газообразование). Избыток влаги в виде слоя инея, особенно в пограничном слое, оседает на поверхности испарителя, ухудшая его работу. Из осложняющих теплофизических явлений представляют собой эффекты «перегрева» пара и «переохлаждения» конденсата. Центром конденсации, как правило, являются и капли, и теплопередающие поверхности конденсационного блока [5, 6]. Из зависимости упругости насыщенного пара от размеров капли состоит сохранение газообразного состояния в условиях, когда вещество должно было бы уже перейти в жидкое состояние. Высота столба жидкости над поверхностью нагрева оказывает заметное влияние на величину коэффициента теплоотдачи, в особенности при низком давлении, т.к. повышение давления вызывает увеличение температуры кипения жидкости, уменьшая перегрев поверхности нагрева по отношению к кипящей жидкости, что приводит к снижению интенсивности образования пузырьков пара. Однако при достижении температуры «точка росы» выпадение конденсата не происходит мгновенно.

При дальнейшем понижении температуры начинается процесс зарождения центров конденсации. Вообще говоря, процесс конденсации состоит из двух стадий: зарождение центров конденсации и рост капель. Заметим, что центром конденсации, как правило, являются и капли, и теплопередающие поверхности конденсационного блока (рис. 1).

Поэтому теплоноситель, снимающий теплоту в конденсационном блоке и значения коэффициента теплопередачи от изменяющихся во времени коэффициентов теплоотдачи,



не всегда учитывается в практических расчетах. Однако влияние флуктуации параметров во времени интересно не столько с точки зрения определения площади теплообмена и количества теплообменных трубок, но и, в большей степени, для создания математических моделей и алгоритмов управления процессами прямого цикла и цикла регенерации. Порой теплоноситель, заполняющий систему, может содержать примеси, способные оседать на теплопередающей поверхности, и существенно снижать значения коэффициента теплопередачи, понижая, таким образом, эффективность всего процесса работы воздушного теплового насоса.



**Рис. 1.** Фрагмент теплопередающей поверхности конденсационного блока: 1 - сконденсированный хладагент; 2 - поверхность теплопередачи; 3 - слой осадка (накипи); 4 - теплоноситель (воздух)

**Fig. 1.** Fragment of the heat transfer surface of the condensation unit: 1 - condensed refrigerant; 2 - heat transfer surface; 3 - sediment layer (scale); 4 - heat carrier (air)

Поэтому теплоноситель, снимающий теплоту в конденсационном блоке и транспортирующий ее к конечной цели – потребителю, также является важнейшим участком процесса. И он обладает не только основным параметром, обеспечивающими теплообмен, - скоростью потока  $v$ , но и способствующими теплопереносу теплофизическими характеристиками: плотностью  $\rho$ , теплоемкостью, вязкостью  $\mu$ , теплопроводностью  $\lambda$ .

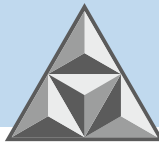
Тепловой поток от конденсата к теплоносителю будет определяться выражением

$$Q_k(\tau) = K_k(\tau) \cdot F_k \cdot [t_k(\tau) - t_{менл}(\tau)] \quad (1)$$

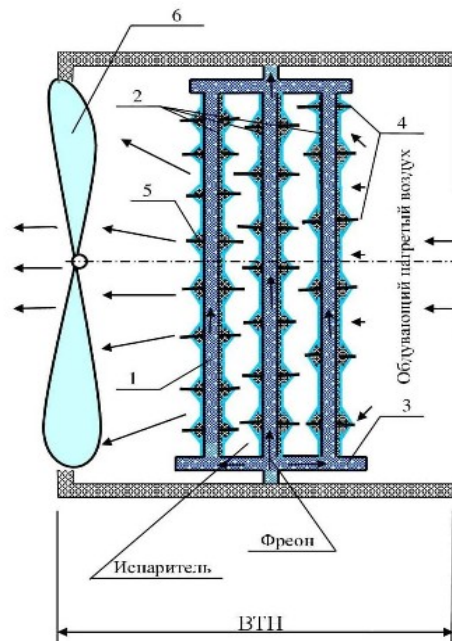
В данном случае коэффициент теплопередачи будет определяться

$$K_k(\tau) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3(\tau)} + \frac{1}{\alpha_4(\tau)} + \frac{\delta_{т.к.}}{\lambda_{т.к.}} + \frac{\delta_{от}(\tau)}{\lambda_{от}}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_3(\tau)$ ,  $\alpha_4(\tau)$  – коэффициенты теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\delta_{т.к.}$  – толщина стенки трубы конденсатора, м;  $\lambda_{т.к.}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки трубы конденсатора Вт/мК;  $\delta_{от}(\tau)$  – толщина отложений, м;  $\lambda_{от}$  – коэффициент теплопроводности с учетом отложений на стенке Вт/мК.



При низкой температуре наружного воздуха теплообменная поверхность испарителя воздушного теплового насоса начинает покрываться слоем инея, что серьёзно влияет на эффективность работы установки, а также на её долговечность, так как образование слоя инея неминуемо ведёт к падению давления кипения. Процесс нарастания «снежной шубы» на поверхности испарителя неизбежен, поскольку температура кипения хладагента (фреона) в испарителе, а следовательно, и температура поверхности испарителя ниже температуры «точки росы» (рис. 2). Образование слоя льда на трубках испарителя приводит к неравномерному распределению температуры по объёму жидкости (фреона) в испарителе и существенно снижает интенсивность теплообмена.



**Рис. 2.** Фрагмент теплопередающей поверхности испарителя: 1 - корпус воздушного испарителя; 2 - параллельные трубки; 3 - хладагент (фреон); 4 - рёбра снаружи трубок; 5 - толщина слоя инея; 6 - вентилятор теплового насоса

**Fig. 2.** Fragment of the heat transfer surface of the evaporator: 1 - the body of the air evaporator; 2 - parallel tubes; 3 - refrigerant (freon); 4 - fins outside the tubes; 5 - thickness of the frost layer; 6 - heat pump fan

С понижением температуры на уровне от 0 до  $-40$  °C иней образуется вследствие выпадения водяных паров на этой поверхности, при этом плотность инея изменяется таким образом: в начальной стадии отложения инея плотность его снижается, так как в этот период кристаллы любой структуры растут в основном вверх, после чего происходит образование замкнутого фронта кристаллизации, достижение инеем ячеистой структуры, падение плотности замедляется [2, 4, 7]. Дальнейшее инееобразование связано с формированием инея на нижележащем слое и диффузией водяных паров через иней к поверхности, что приводит к некоторому возрастанию плотности инея и в дальнейшем к стабилизации ее примерно на одном уровне. Изменение коэффициента теплопроводности инея в процессе инееобразования условно можно разделить на три периода. Первый период - увеличение коэффициента теплопроводности в результате появления шероховатости инея и турбулизации потока, вызванное резким ростом кристаллов инея на холодной поверхности. Второй период - понижение теплопроводности инея за счет дальнейшего его роста, разветвления и уплотнения (образование наледи). Третий период характеризуется



снижением коэффициента теплопроводности слоя инея до минимальной величины, так как это вызвано уплотнением инея и снижением интенсивности движения воздуха в пространстве между кристаллами, а затем по мере его дальнейшего уплотнения - возрастанием коэффициента за счет диффузии влаги внутрь слоя. Первоначально толщина слоя инея при температуре охлаждаемого воздуха ниже 0 °С изменяется во времени, вначале происходит интенсивный рост слоя инея, температура его поверхности повышается до значения, близкого к точке росы, а затем рост слоя инея замедляется. Иней уплотняется вследствие диффузии влаги во внутренние слои. Толщина слоя инея и температура его поверхности изменяются мало. В результате наблюдений нашими учеными отмечены такие моменты как: плотность инея тем больше, чем больше скорость и влажность воздуха и чем выше его температура, но с понижением температуры холодной поверхности плотность инея уменьшается. Темпы изменения коэффициента теплопроводности инея по времени на ранних стадиях возрастают при увеличении скорости воздуха, плотности инея и повышении влажности. Увеличение массовой скорости воздуха приводит к сокращению времени, в течение которого коэффициент теплоотдачи достигает максимальной величины и снижается до первоначального значения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренный комплекс проблем тепломассообмена, который таким образом сопровождает работу воздушной теплонасосной системы, разумеется, отражается и на промышленных аспектах реализации перспективных по своей сути энергетических устройствах, призванных увеличить состояние энергосбережения, комфортности помещения и среды обитания человека [8, 9]. Необходимость разрабатываемых современных методов интенсификации теплообмена на основе анализа опытных данных, технико- и экологоэкономических обоснований и внедрения интенсификаторов теплообмена в существующем оборудовании позволит поднять эффективность испарительно-конденсационного блока и в целом ВТНС [1, 10]. Авторы считают, что технически полезным решением является разработанная камера смешения, встроенная в систему воздушной теплонасосной системы с нагревателем [10]. Работа такой конструкции с увеличением аэродинамического сопротивления воздухонагревателя, как один из основных параметров при определении начального момента оттаивания аппарата, обеспечивая подачу равновесного напора воздушной смеси на теплообменник – испаритель, оказывая эффективное влияние на уменьшение время оттаивания наледи. Реакция автоматики ВТН на обмерзание поверхности испарителя заставляет электронику теплового насоса в автоматизированном режиме периодически переключать его в режим разморозки – «откл/вкл» ВТН, что определенным образом будет влиять на теплопроизводительность воздушного теплового насоса [8].

## ВЫВОДЫ

Изучение и анализ состояния наледи и разморозки в процессе теплообмена режима кипение-испарение в испарительно-конденсационном блоке ВТНС дает возможность учитывать быстродействие реагирования теплового интенсификатора на данный процесс и сократить цикл разморозки воздушного теплового насоса.





## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бабакин Б.С., Еркин М.А.** Интенсификация работы приборов охлаждения при инееобразовании: Обзорная информация. М.: АгроНИИТЭИММП, 1987. 28 с.
2. **Румянцев Ю.Д., Скоробогатов И.А.** Повышение эффективности работы охлаждающих устройств при инееобразовании: Обзорная информация. М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1985. 32 с.
3. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Опарина Л.А.** Анализ экологической безопасности хладагентов систем теплоснабжения воздушными тепловыми насосами на принципах термодинамической активности неравновесных процессов // *Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование. Сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина»*. Т. 1. М.: ФГБОУ ВО РГУ им. А. Н. Косыгина, 2019. С. 221–223.
4. **Напалков Г.Н.** Теплоперенос в условиях инееобразования. М.: Машиностроение, 1983. 189 с.
5. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Логинова С.В.** Тепловые процессы в испарительно-конденсационном контуре воздушного теплового насоса // *Приволжский научный журнал*. 2022. № 1(61). С. 104-110.
6. **Федосов С.В., Федосеев В.Н.** Теплообмен и десублимация в испарительной линии воздушного теплового насоса // *Приволжский научный журнал*. 2022. № 2(62). С. 94-104.
7. **Кремерс К.Д., Мера В.К.** Образование инея на вертикальных цилиндрах в условиях свободной конвекции // *Теплопередача*. 1982. № 2. С. 1-7.
8. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Опарина Л.А.** Проектирование и эксплуатация зданий при решении совместного энергоэффективного теплоснабжения и микроклимата // *Сб. материалов XX Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы строительства, стройиндустрии и архитектуры»*. Тула: Тульский государственный университет, 2019. С. 324-328.
9. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Емелин В.А.** Высокотехнологическая система воздушного теплового насоса «три в одном» для малоэтажных и коттеджных строений // *Приборы*. 2020. № 2 (236). С. 49-53.
10. **Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В., Воронов В.А., Емелин В.А.** Теплотери и теплоприток при совместной работе смесительной камеры и воздушно-теплового насоса в малоэтажных строениях // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 4 (370). С. 209-213.

Поступила в редакцию 07.06.2022

Одобрена после рецензирования 20.06.2022

Принята к опубликованию 22.06.22



## REFERENCES

1. **Babakin, B.S. & Erkin, M.A.** (1987) *Intensification of the operation of cooling devices during frost formation: Overview*. M.: AgroNIITEIMMP (in Russian).
2. **Rumyantsev, Yu.D. & Skorobogatov, I.A.** (1985) *Improving the efficiency of cooling devices during frost formation: Review information*. M.: TsNIITEImyasomolprom (in Russian).
3. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. & Oparina, L.A.** (2019) Analysis of the environmental safety of refrigerants in heat supply systems by air heat pumps based on the principles of thermodynamic activity of non-equilibrium processes. *Energoresursoeffektivnyye ekologicheski bezopasnyye tekhnologii i oborudovaniye. Sb. nauch. trudov Mezhdunar. nauch.-tekh. simpoziuma «Vtoryye mezhdunarodnyye Kosyiginskiye chteniya. priurochennyye k 100-letiyu RGU imeni A.N. Kosygina»*, M.: FGBOU VO RGU im. A.N. Kosygina. (1), pp. 221-223 (in Russian).
4. **Napalkov, G.N.** (1983) *Heat and mass transfer under conditions of frost formation*. M.: Mashinostroenie (in Russian).
5. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. & Loginova, S.V.** (2022) Thermal processes in the evaporation-condensation circuit of an air heat pump. *Privolzhsky scientific journal*, 1(61), pp.104-110 (in Russian).
6. **Fedosov, S.V. & Fedoseev, V.N.** (2022) Heat transfer and desublimation in the evaporative line of an air heat pump, *Privolzhsky Scientific Journal*, 2(62), pp.94-104 (in Russian).
7. **Kremers, K.D. & Mera, V.K.** Formation of frost on vertical cylinders under conditions of free convection, *Teploperedacha*, 1982, (2), pp. 1-7 (in Russian).
8. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. & Oparina, L.A.** (2020) Design and operation of buildings when solving joint energy-efficient heat supply and microclimate, *Sb. materialov XX Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Aktualnyye problemy stroitelstva. stroyindustrii i arkhitektury»*. Tula: Tulskiy gosudarstvennyy universitet, pp. 324-328 (in Russian).
9. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Zaitseva, I.A. & Emelin, V.A.** (2020) High-tech three-in-one air source heat pump system for low-rise and cottage buildings, *Pribory*, 2(236), pp. 49-53 (in Russian).
10. **Aloyan, R.M., Fedoseev, V.N., Vinogradova, N.V., Voronov, V.A. & Emelin, V.A.** (2017) Heat loss and heat gain during the joint operation of the mixing chamber and the air-heat pump in low-rise buildings, *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti*, 4(370), pp. 209-213 (in Russian).

Received 07.06.2022

Approved after reviewing 20.06.2022

Accepted 22.06.22