

УДК 697.978

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические)

ТЕРМОДИНАМИКА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕКУПЕРАТОРОВ

Корнев Андрей Сергеевич

к.т.н., доцент

РИНЦ SPIN-код: 3969-1468

E-mail: kornev.andr@mail.ru*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Россия, 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1*

Черномазов Семен Алексеевич

Аспирант кафедры механизации животноводства и безопасности жизнедеятельности

РИНЦ SPIN-код: 3319-5744

E-mail: semencernomazov@gmail.com*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Россия, 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1*

С использованием программного продукта MATLAB, а также формул баланса масс и решения задачи Стефана и уравнения Навье-Стокса производится моделирование процесса обледенения теплообменника пластинчатого рекуператора, а также образующегося при этом перепада давления ввиду перекрытия части канала. В качестве объекта исследования, рассмотрен канал между двумя пластинами стандартного пластинчатого теплообменника с расстоянием между пластинами 5 мм., имеющий постоянную температуру внутреннего воздуха +22°C и влажность 40%, подобные условия микроклимата соответствуют реальным рабочим параметрам систем кондиционирования применяемых в курятниках, а также тепличных комплексах. При этом температура верхней и нижней стенок канала составляет -5°C, в таких условиях точка росы находится на отметке +8°C, что свидетельствует о возникновении процесса образования конденсата. По итогам моделирования приводится таблица с расчетными данными и график отражающий зависимость перепада давления при обледенении теплообменного канала от толщины образующегося инея с течением времени в ходе его эксплуатации. Анализируя представленные данные, следует, что полное прекращение работы вентиляционных систем малой и средней мощности происходит через четыре часа эксплуатации в моделируемых условиях, а также значительном снижении эффективности установок повышенной мощности (не менее 9 кПа). Ввиду чего следует вывод о необходимости внедрения систем пассивной защиты от обледенения теплообменников, применяемых в системах

UDC 697.978

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical)

THERMODYNAMICS OF ICING OF PLATE HEAT EXCHANGERS

Kornev Andrey Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

RSCI SPIN-code: 3969-1468

E-mail: kornev.andr@mail.ru*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurina, Voronezh, 394087, Russia*

Chernomazov Semyon Alekseevich

Graduate student

RSCI SPIN code: 3319-5744

E-mail: semencernomazov@gmail.com*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurina, Voronezh, 394087, Russia*

Using the MATLAB software product, as well as mass balance formulas and solutions to the Stefan problem and the Navier-Stokes equation, the icing process of the heat exchanger of a plate heat exchanger is simulated, as well as the resulting pressure drop due to the overlap of part of the channel. As an object of research, a channel between two plates of a standard plate heat exchanger with a distance between the plates of 5 mm is considered. Having a constant internal air temperature of +22 °C and humidity of 40%, such microclimate conditions correspond to the actual operating parameters of air conditioning systems used in chicken coops, as well as greenhouse complexes, while the temperature of the upper and lower walls of the channel is -5 °C, in such conditions, the dew point is at around +8 °C, which indicates the formation of condensation. Based on the results of the simulation, a table with calculated data and a graph are presented reflecting the dependence of the pressure drop during icing of the heat exchange channel on the thickness of the frost formed over time during its operation. Analyzing the presented data, it follows that the complete shutdown of low- and medium-power ventilation systems occurs after four hours of operation under simulated conditions, as well as a significant decrease in the efficiency of high-power installations (at least 9 kPa). This leads to the conclusion that it is necessary to introduce passive icing protection systems for heat exchangers used in ventilation systems for chicken coops and greenhouse complexes

вентиляции курятников и тепличных комплексах

Ключевые слова: РЕКУПЕРАЦИЯ, ОБЛЕДЕНЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, КОНДЕНСАТ, ПЛАСТИНЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ, МИКРОКЛИМАТ

Keywords: HEAT RECOVERY, ICING, VENTILATION, HEAT TRANSFER, CONDENSATE, PLATE HEAT EXCHANGERS, MICROCLIMATE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-216-037>

Введение. Современное сельское хозяйство предъявляет высокие требования к показателям микроклимата, ввиду наличия прямой взаимосвязи рентабельности производства от соответствия нормам микроклимата.

Для достижения необходимых параметров микроклимата, традиционно применяются рекуперационные установки, позволяющие сохранять тепло, передавая его от вытяжного к холодному приточному воздуху. Подобная система позволяет снижать затраты на подогрев вентилируемого помещения, особенно в зимний период времени. Однако недостатком рекуперационных установок является то, что при их работе в условиях пониженных температур, происходит процесс обледенения, ввиду постепенного замерзания образующегося конденсата [1].

На сегодняшний день активно развиваются средства борьбы с этим негативным эффектом, применяются, как средства принудительного обогрева, так и абсорбционные элементы, которые позволяют не только снизить скорость обледенения рекуператора, но и повысить его эффективность [2].

Для лучшего понимания работы подобных устройств необходимо детально углубиться в процесс обмерзания, выявить факторы, влияющие на его возникновение с учетом стадий образования.

Началом данного процесса является возникновение конденсата из вытяжного воздуха, который образуется на охлажденной стороне пластины теплообменника [3]. Ввиду того, что температура пластины в зимний

<http://ej.kubagro.ru/2026/02/pdf/37.pdf>

период может снижаться до -10°C , конденсирующаяся влага передает тепловую энергию и постепенно охлаждается.

Однако для начала процесса кристаллизации, необходимо образование первичного кристалла, местом образования которого могут являться различные шероховатости или царапины на поверхности пластин [4].

В случае возникновения первичного кристалла замерзшего конденсата, его дальнейшее разрастание имеет повышенную нестабильность структуры и высокую пористостью, что обуславливается его ростом в условиях меняющихся параметров воздушного потока.

По мере нарастания слоя инея, происходит снижение теплопроводности теплообменника, а также уменьшается эффективное сечение канала, что приводит к существенному падению КПД рекуперационной установки.

Важно учитывать то, что скорость процесса обледенения зависит от скорости и количества образования конденсата и теплообмена поверхности его образования, ввиду чего возможно возникновение эффекта замедления обледенения из-за снижения отводимого тепла слоем инея.

Целью настоящей работы является моделирование процесса намерзания инея на пластинах пластинчатого рекуператора, для выявления зависимости величины перепада давления в вентиляционной системе от толщины инея на поверхностях теплообменных пластин рекуперационной установки.

Методика исследования. В качестве объекта исследования, рассмотрен канал между двумя пластинами стандартного пластинчатого теплообменника с расстоянием между пластинами 5 мм. Через этот канал поступает вытяжной воздух, имеющий постоянную температуру $+22^{\circ}\text{C}$ и влажность 40%, подобные условия микроклимата соответствуют реальным рабочим параметрам систем кондиционирования применяемых в

курытниках, а также тепличных комплексах. При этом температура верхней и нижней стенок канала составляет -5°C , в таких условиях точка росы находится на отметке $+8^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о возникновении процесса образования конденсата.

Для расчета количества конденсата недостаточно опираться только на влажность воздуха, в данном случае необходимо также учитывать разность плотностей водяного пара, поэтому воспользуемся уравнением массоотдачи [5]:

$$m = \beta \times (p_v - p_s) \quad (1)$$

где

β – коэффициент массопередачи, м/с;

p_v – плотность водяного пара в центре потока, $\text{кг}/\text{м}^3$;

p_s – плотность пара на поверхности раздела фаз, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Данное уравнение позволяет учитывать разность плотностей водяного пара в центре потока и в месте контакта с пластиной, в свою очередь коэффициент массопередачи описывает то, насколько быстро пар может быть перемещен из ядра потока к поверхности конденсации.

На стадии образования первичного слоя инея, скорость его нарастания принимается за максимальную ввиду того, что в последующем увеличивающийся слой льда будет замедлять реакцию обледенения. В данном случае скорость обледенения определяется из уравнения баланса масс [4-5]:

$$v_0 = \frac{m}{\rho_{\text{лед}}} = \frac{\beta \times \Delta p_v}{\rho_{\text{лед}}} \quad (2)$$

где:

v_0 – начальная скорость частицы, м/с;

m – скорость прироста массы ледяной частицы, кг/с;

$\rho_{\text{лед}}$ – плотность льда, кг/м³;

β – коэффициент массообмена;

$\Delta\rho_v$ – разность плотностей водяного пара между окружающей средой и у поверхности льда.

Данное уравнение описывает начальную скорость роста кристаллов, которая пропорциональна разности плотности пара и обратно пропорциональна плотности льда.

Однако, в реальных условиях разность плотностей воздуха не постоянна, а утолщающийся слой инея постепенно замедляет процесс теплопередачи, поэтому для расчета в конкретном временном промежутке необходимо учитывать коэффициент диффузии пара в воздухе, а также толщину льда, растущую со временем, тогда уравнение примет следующий вид [6]:

$$H(t) = \sqrt{H_0^2 + \frac{2D \times \Delta\rho_v}{\rho_{\text{лед}}} \times t} \quad (3)$$

где:

$H_{(t)}$ – толщина инея в момент времени t , м;

H_0 – начальная толщина инея, м;

T – время, с;

D – коэффициент диффузии, м²/с.

Помимо снижения теплопередачи, с нарастанием слоя инея, также снижается пропускная способность теплообменных каналов, что вызывает перепад давления в рекуперационной установке, из-за чего не только снижается эффективность ее работы, но и повышается нагрузка на вентиляторы вентиляционной системы [6-7].

Для упрощенного расчета перепада давления в системе воспользуемся комбинированной формулой, составленной из задачи Стефана и уравнения Навье-Стокса [8-10]:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \times \left[\frac{H_0}{H_0 - 2 \sqrt{\frac{2D\Delta\rho v \times t}{\rho_{\text{лед}}}}} \right]^3 \quad (4)$$

где:

$\Delta P(t)$ – перепад давления в канале в момент времени t , Па;

ΔP_0 – начальный перепад давления, Па;

Результаты исследования. На основе представленных формул произведен теоритический расчет степени обледенения в заданных условиях (таблица 1).

Таблица 1 – Расчетные данные толщины образования слоя инея и образующегося при этом перепада давления.

Время, t , ч	Толщина льда с одной стороны, $L(t)$, мм	Оставшаяся высота канала, $H(t)$, мм	Перепад давления, $\Delta P(t)$, кПа	Отношение $\Delta P(t)/\Delta P_0$
0,0	0,00	5,00	0,050	1,0
0,5	0,46	4,08	0,092	1,8
1,0	0,85	3,30	0,177	3,5
1,5	1,18	2,64	0,340	6,8
2,0	1,35	2,30	0,526	10,5
2,5	1,55	1,90	0,912	18,2
3,0	1,67	1,66	1,364	27,3
3,5	1,77	1,46	2,006	40,1
4,0	1,86	1,28	2,978	59,6
4,5	1,92	1,16	3,975	79,5
5,0	1,98	1,04	5,660	113,2
5,5	2,02	0,96	7,245	144,9
6,0	2,05	0,90	9,070	181,4

Анализируя табличные данные, можно отметить явное превышение максимального перепада давления для бытовых и промышленных вентиляторов малой мощности систем вентиляции (не более 1 кПа), а

также промышленных вентиляторов средней мощности (не более 3кПа). На основании полученных данных построена 3D проекция в программном продукте MATLAB, на которой отмечены критические параметры перепада давления для вентиляторов систем кондиционирования (Рис.1).

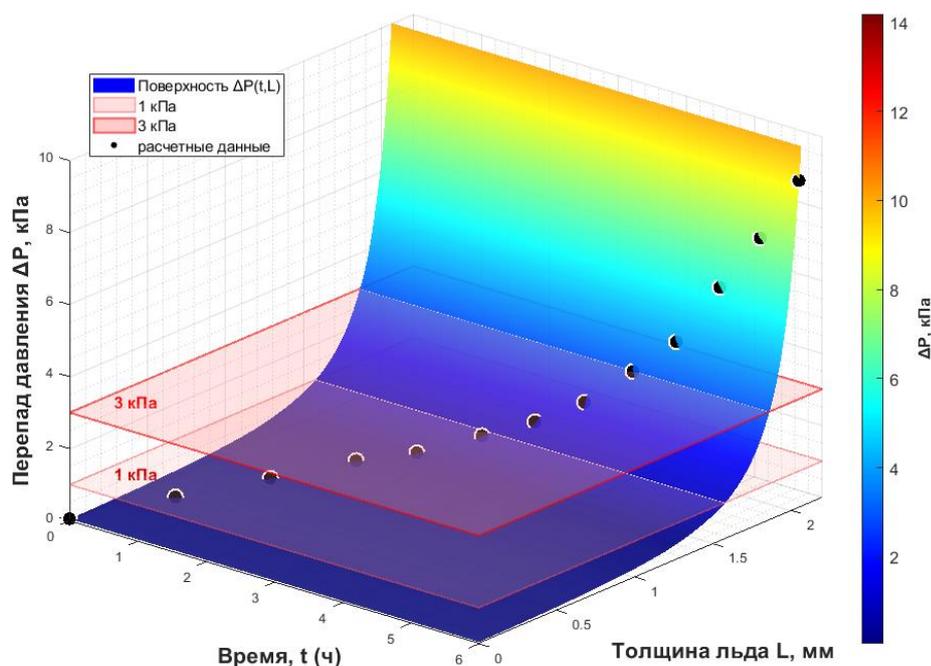


Рисунок 1 – Динамика перепада давления при обледенении теплообменного канала, зависимость от времени и толщины льда.

После первого часа работы рекуперационной установки в условиях отрицательных температур, толщина инея достигла 0,85 мм на поверхности пластины. Учитывая то, что образование наледи происходит на поверхности верхних и нижних пластин теплообменника, общая толщина инея будет равняться 1,7 мм, что по отношению к высоте вентиляционного канала снизит его эффективную площадь до 66%.

В результате перекрытия 33% площади моделируемого канала произойдет повышение перепада давления до 0,177 кПа, что в 3,5 раза выше начальных данных, что свидетельствует о существенном повышении

рабочей нагрузки на применяемые вентиляторы, вызывая их повышенный износ.

По итогу 2,5 часов работы рекуперационной установки толщина инея увеличилась до 1,55 мм на поверхности теплообменной пластины, что равняется 3,1 мм общей толщины с обеих сторон моделируемого канала высотой 5мм, что снизит его полезную площадь до 38%.

Перекрытие слоем льда более чем половины канала вызвало перепад давления в 0,912 кПа, что является увеличением начальных данных в 18 раз. Подобные условия работы являются критическими для бытовых вытяжных систем, для которых наибольший перепад давления в системе не должен превышать 0,50...0,75 кПа, что свидетельствует о возможном выходе из строя вентиляционного бытового оборудования. В свою очередь, для промышленных вентиляционных систем и устройств кондиционирования малого давления перепад не должен превышать 1кПа (Рис.1), ввиду чего, по расчетным данным, на отметке в 2,5 часа подобные системы будут работать в условиях повышенного износа. Однако уже через 0,5 часа эффективная площадь рассматриваемого канала снизиться до 33,2%, что вызовет повышение перепада давления до 1,364 кПа, а также превышение максимально допустимого сопротивления для производственных вентиляторов малой мощности. Превышение данного показателя свидетельствует о прекращении работы вентиляционной систем рассматриваемого типа.

На отметке в 4 часа, высота слоя инея составила 1,86 мм, что суммарно составляет 3,72 мм, при этом полезная площадь канала снизилась до 25,6%. Подобный процент перекрытия канала создает перепад давления в 2,976 кПа, что является предельным показателем условий эксплуатации для промышленных вентиляторов средней мощности до 3 кПа (Рис.1), а также возможном прекращении работы вентиляционной системы.

В конце проведенного моделирования, на отметке в 6 часов, слой наледи составил 2,05 мм или 4,1 мм с учетом двух сторон, а также снижению эффективной площади теплообменника до 18%. При этом создается перепад давления равный 9,07 кПа, что является критическим эксплуатационным параметром для работы систем вентиляции повышенного давления.

Обобщая рассмотренные данные, следует вывод о полном прекращении работы вентиляционных систем малой и средней мощности через четыре часа эксплуатации в моделируемых условиях, а также значительном снижении эффективности установок повышенной мощности (не менее 9 кПа).

Заключение. По итогу проведенного теоритического исследования становится очевидна серьезность возникающих негативных эффектов при обледенении теплообменников рекуперационных систем для агропромышленного комплекса, а также необходимость применения эффективных средств борьбы с этим явлением.

Судя по динамике образования конденсата и его кристаллизации, очевиден выбор в пользу таких пассивных средств защиты, как абсорбирующие элементы, которые позволяют снизить количество образующегося конденсата, а также произвести его своевременное извлечение до достижения стадии роста кристаллических структур, приводящих к снижению пропускной способности рекуперационных установок.

Список литературы

1. Арбатский, А. А. Проблема обледенения теплообменников утилизации тепла для систем вентиляции зданий / А. А. Арбатский, В. С. Глазов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения) : материалы международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, Иваново, 29–31 мая 2019 года. Том II. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 341-346.

2. Патент на полезную модель № 236858 U1 Российская Федерация, МПК F24F 12/00, F24F 3/14. Устройство рекуперации тепла промышленных микроклиматических систем для работы в условиях низких температур окружающего воздуха : заявл. 18.06.2025: опубл. 26.08.2025 / А. С. Корнев, С. А. Черномазов, С. В. Корнев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.

3. Черномазов, С.А. Проблематика возникновения конденсационной влаги в вентиляционных системах / С.А. Черномазов, П.А. Скуридин, А.С. Корнев // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 25 сентября 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 294-299.

3. Круглов, А. А. Расчет процесса кристаллизации воды в факеле при распылении в вакууме / А. А. Круглов, Р. Р. Тазитдинов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : IX Международная научно-техническая конференция, Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. – С. 40-43.

4. Богомоллов, Д. А. О влиянии эксплуатационных параметров работы рекуператора на интенсивность инееобразования / Д. А. Богомоллов, А. И. Грошев, А. А. Орешонков // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 16(138). – С. 84-86.

5. Расчет воздушных теплоутилизаторов, установленных в приточно-вытяжных устройствах систем вентиляции воздуха / Б. С. Сажин, О. С. Кочетов, М. В. Чунаев [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 4(72). – С. 88-92.

6. Приходько, А. А. Численное моделирование процессов обледенения аэродинамических поверхностей при наличии крупных переохлажденных капель воды / А. А. Приходько, С. В. Алексеенко // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 19. – С. 75-82.

6. A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions / H. Y. Bai, M. Justo Alonso, H. M. Mathisen, P. Liu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 162. – P. 112417.

7. Бирюков, В. В. Теплообменные конденсационные системы вентиляции животноводческих помещений : специальность 05.23.03 "Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бирюков Владимир Викторович. – Ростов-на-Дону, 2005. – 26 с.

8. Berquist, Ju. Comparison of Heat Recovery Ventilator Frost Control Techniques in the Canadian Arctic: Preheat and Recirculation / Ju. Berquist, C. Banister, M. Pellissier // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 246. – P. 11010.

9. Пуган, А. А. Установка утилизации тепла с системой оттаивания / А. А. Пуган, О. П. Андреев // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 2. – С. 76-85.

10. Каткова, Е.Ю. Влияние противообледенительных покрытий на эффективность вентиляции / Е. Ю. Каткова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тезисы докладов двадцать седьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 11–12 марта 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2021. – С. 701.

References

1. Arbatskij, A. A. Problema obledeneniya teploobmennikov utilizacii tepla dlja sistem ventiljacii zdaniy / A. A. Arbatskij, V. S. Glazov // Sostojanie i perspektivy razvitija jelektro- i teplotehnologii (Benardosovskie chteniya) : materialy mezhdunarodnoj (HH Vserossijskoj) nauchno-tehnicheskoi konferencii, Ivanovo, 29–31 maja 2019 goda. Tom II. – Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet im. V.I. Lenina, 2019. – S. 341-346.
2. Patent na poleznuju model' № 236858 U1 Rossijskaja Federacija, MPK F24F 12/00, F24F 3/14. Ustrojstvo rekuperacii tepla promyshlennyh mikroklimaticheskikh sistem dlja raboty v uslovijah nizkix temperatur okruzhajushhego vozduha : zajavl. 18.06.2025 : opubl. 26.08.2025 / A. S. Kornev, S. A. Chernomazov, S. V. Kornev ; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni imperatora Petra I.
3. Chernomazov, S.A. Problematika vozniknovenija kondensacionnoj vlagi v ventiljacionnyh sistemah / S.A. Chernomazov, P.A. Skuridin, A.S. Kornev // Problemy resursoobespechennosti i perspektivy razvitija agropromyshlennogo kompleksa : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, Voronezh, 25 sentjabrja 2024 goda. – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I, 2024. – S. 294-299.
3. Kruglov, A. A. Raschet processa kristallizacii vody v fakele pri raspylenii v vakuume / A. A. Kruglov, R. R. Tazitdinov // Nizkotemperaturnye i pishhevye tehnologii v XXI veke : IX Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija, Sankt-Peterburg, 13–15 nojabrja 2019 goda. Tom 1. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij nacional'nyj issledovatel'skij universitet informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki, 2019. – S. 40-43.
4. Bogomolov, D. A. O vlijanii jekspluacionnyh parametrov raboty rekuperatora na intensivnost' ineeobrazovanija / D. A. Bogomolov, A. I. Groshev, A. A. Oreshonkov // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. – 2013. – № 16(138). – S. 84-86.
5. Raschet vozdushnyh teploutilizatorov, ustanovlennyh v pritochno-vytjazhnyh ustrojstvah sistem ventiljacii vozduha / B. S. Sazhin, O. S. Kochetov, M. V. Chunaev [i dr.] // Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii. – 2007. – T. 21, № 4(72). – S. 88-92.
6. Prihod'ko, A. A. Chislennoe modelirovanie processov obledeneniya ajerodinamicheskikh poverhnostej pri nalichii krupnyh pereohlazhdennyh kapel' vody / A. A. Prihod'ko, S. V. Alekseenko // Pis'ma v Zhurnal tehniceskoi fiziki. – 2014. – T. 40, № 19. – S. 75-82.
6. A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions / H. Y. Bai, M. Justo Alonso, H. M. Mathisen, P. Liu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 162. – P. 112417.
7. Birjukov, V. V. Teploobmennye kondensacionnye sistemy ventiljacii zhivotnovodcheskikh pomeshhenij : special'nost' 05.23.03 "Teplosnabzhenie, ventiljacija, kondicionirovanie vozduha, gazosnabzhenie i osveshhenie" : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk / Birjukov Vladimir Viktorovich. – Rostov-na-Donu, 2005. – 26 s.
8. Berquist, Ju. Comparison of Heat Recovery Ventilator Frost Control Techniques in the Canadian Arctic: Preheat and Recirculation / Ju. Berquist, C. Banister, M. Pellissier // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 246. – P. 11010.
9. Putan, A. A. Ustanovka utilizacii tepla s sistemoj ottaivaniya / A. A. Putan, O. P. Andreev // Mezhdunarodnyj tehniko-jekonomicheskij zhurnal. – 2020. – № 2. – S. 76-85.
10. Katkova, E. Ju. Vlijanie protivooledenitel'nyh pokrytij na jeffektivnost' ventiljacii / E. Ju. Katkova // Radioelektronika, jelektrotehnika i jenergetika : tezisy dokladov dvadcat'

sed'moj mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov, Moskva, 11–12 marta 2021 goda. – Moskva: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "Centr poligraficheskikh uslug " RADUGA", 2021. – S. 701.