

На правах рукописи

Путан Алексей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВИНОВОДСТВА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
НАРУЖНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность:

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева».

Научный руководитель:	Девянин Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева
Официальные оппоненты:	Самарин Геннадий Николаевич, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией переработки сельскохозяйственной продукции отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» Скляр Алексей Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник – заведующий отделом микроклимата и производственных процессов ФНЦ «ВНИТИП» РАН
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Защита состоится «25» апреля 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8(499)976-21-84.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Пуляев
Николай Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Свиноводство, как составная часть животноводства, является довольно энергоёмким направлением, где создание и поддержание оптимального микроклимата связано со значительным расходом энергоресурсов, однако микроклимат для животных, наряду с полнорационным кормлением, играет важную роль в повышении их продуктивности и сохранности.

Для создания микроклимата в производственных помещениях свиноводческого комплекса используется тепловая и электрическая энергии. Причём, увеличение потребления тепловой энергии, на свиноводческом комплексе, напрямую связано с понижением наружных температур воздуха. На отопление производственных помещений свиноводческого комплекса приходится наибольшая доля энергетических затрат. Из них, до 90% выбрасывается в атмосферу при вентиляции для создания микроклимата. Вторичное использование теплоты, удаляемой из помещения в атмосферу, является актуальной задачей, особенно для регионов России с большей продолжительностью низких наружных температур воздуха, и позволяет экономить тепловую энергию на обеспечение микроклимата.

Цель работы. Повышение эффективности работы системы вентиляции свиноводческих помещений с системами рекуперации теплоты в условиях инееобразования в вытяжном канале рекуператора.

Задачи исследования.

1. Разработать методику и математическую модель работы рекуператора в условиях низких наружных температур и при образовании инея в вытяжном канале.
2. Проведение натурных испытаний для подтверждения адекватности предложенной математической модели.
3. Оценить эффективность рекуператора с учётом работы при образовании инея в вытяжном канале.
4. Разработать рекомендации по разработке рекуператоров с возможностью работы оборудования при инееобразовании в вытяжном канале.

Объект исследования. Микроклимат в свиноводческих помещениях при низких наружных температурах.

Предмет исследования. Условия работы рекуператора при инееобразовании в вытяжном канале.

Методика исследования. Представленные в работе теоретические и экспериментальные исследования были проведены на основе фундаментальных законов и положений теории теплопередачи, термодинамики, теоретических основ теплотехники, математического и физического моделирования с использованием компьютерного программирования.

Научная новизна работы. Разработана методика и математическая модель расчета рекуператора и его регенерации при работе его в условиях низких наружных температур и возможного инееобразования в вытяжном канале рекуператора.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что была разработана:

- методика построения математической модели работы рекуператора в условиях работы низких наружных температур и при инееобразовании в вытяжном канале и с регенерацией вытяжного канала рекуператора;
- математическая модель работы рекуператора в условиях низких наружных температур и при инееобразовании в вытяжном канале рекуператора;
- математическая модель регенерации вытяжного канала рекуператора;
- рекомендации по разработке рекуператоров с возможностью работы оборудования при низких наружных температурах и при инееобразовании в вытяжном канале;

- характеристика работы рекуператора в условиях низких наружных температур для последующего расчёта оборудования с системой микроклимата.

Положения выносимые на защиту:

- методика построения математической модели работы рекуператора в условиях низких наружных температур и при инееобразовании в вытяжном канале рекуператора;
- математическая модель работы рекуператора в условиях низких наружных температур и при инееобразовании в вытяжном канале рекуператора;
- результаты натурных испытаний рекуператора для подтверждения адекватности предложенной математической модели;
- результаты оценки эффективности рекуператора с учётом работы при образовании инея в вытяжном канале;
- рекомендации по разработке рекуператоров с возможностью работы оборудования при инееобразовании в вытяжном канале.

Личный вклад. Автором лично сформулированы и составлены задачи исследования на основе опыта разработки и испытаний рекуператоров теплоты на свиноводческих комплексах. Предложена методика построения и составлена математическая модель, подготовлены и проведены испытания на подтверждение адекватности математической модели, проведена обработка результатов испытаний и выполнен анализ данных. Подготовка публикаций проводилась с соавторами, при этом, личный вклад автора, в публикациях включённых в перечень ВАК, был основным.

Апробации результатов работы. Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на: Международной научной конференции посвященной 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова, РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева 2019 г., Международной научной конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 155-летию РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева 2020 г., ежегодном семинаре «Чтения академика В.Н. Болтинского», РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева в 2022 г.

Результаты разработанных решений и рекомендации внедрены на ООО «Куединский мясокомбинат», ООО «Кампоферма», ООО «Агровент-М».

Публикации. Основные результаты работы изложены в 8 работах, в том числе в 4 статьях опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы на 113 источников (18 на иностранном языке) и приложений. Работа изложена на 177 страницах, включая 80 рисунков и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, дана общая характеристика работы.

В первой главе обоснована актуальность применения рекуператоров теплоты, позволяющих снизить затраты на отопление производственных помещений, на свиноводческих комплексах за счёт вторичного использования теплоты от вентиляционного воздуха. Экономия теплоты, при использовании рекуператоров, может достигать до 80 % за отопительный период. Проведённый обзор математических моделей вентиляционных установок показал, что при построении математических моделей процесса теплопередачи функция теплопроизводительности рекуператора рассматривается только в виде линейной зависимости, от температуры и влажности в помещении и наружной температуры. При этом, процесс работы рекуператора рассматривается, как статический процесс, который не меняется во времени. Так же было выявлено, что нет единой модели, которая бы позволяла спрогнозировать работу противоточного рекуператора в холодное время года и прогнозировать процесс теплопередачи при обмерзании вытяжного канала. Кроме этого, было выявлено, что ранее

не делались попытки построить математическую модель процесса регенерации вытяжного канала рекуператора. Сформулированы задачи исследований.

Вопросами микроклимата в сельском хозяйстве занимались: Антонов П.П., Бабаханов Ю.М., Бородин И.Ф., Гулевский В.А. Иванов Ю.Г., Игнаткин И.Ю., Казанцев С.П., Кирсанов В.В., Кокорин О.Я., Мурусидзе Д.Н., Новиков Н.Н., Растимешин С.А., Расстригин В.Н., Рудобашта С.П., Самарин Г.Н., Скляр А.В., Тихомиров Д.А, и др.

Вторая глава посвящена математической модели работы рекуператора в условиях низких наружных температур и при образовании инея в вытяжном канале и при его регенерации.

Математическая модель состоит из 2-х связанных между собой частей:

- 1) математическая модель обмерзания вытяжного канала рекуператора;
- 2) математическая модель регенерации вытяжного канала рекуператора.

Математическая модель обмерзания вытяжного канала рекуператора.

По состоянию воздуха в вытяжном канале рекуператора, в процессе его работы, предлагается разделить процесс теплопередачи на три режима. Режим «сухой» работы. Режим работы «с образованием конденсата», когда в вытяжном канале есть зоны теплообмена с конденсатом и без конденсата. Режим работы «с образованием инея», когда в вытяжном канале есть зоны теплообмена с инеем, с конденсатом и без конденсата. На рисунке 1 показаны зоны теплообмена для режима работы «с образованием инея».



Рисунок 1 – Режимы работы рекуператора «с образованием инея»

Теплообменный канал (длина 1,7 м) разбивался на 170 участков и теплообмен между приточным и вытяжным каналами рассматривался для каждого участка (длина 10 мм).

Величина теплоты переданной на всём протяжении канала теплообмена определяется по формуле:

$$Q_{\text{рек}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_{169} + Q_{170}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{рек}}$ – суммарный тепловой поток через стенку теплообмена рекуператора; $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_{169}, Q_{170}$ – тепловой поток через соответствующий расчётный участок стенки теплообмена рекуператора.

Величина теплового потока на расчётном участке определяется по формуле Ньютона-Фурье:

$$Q_1 = k_1 \cdot F_1 \cdot \Delta t_1, \quad (2)$$

где Q_1 – величина теплового потока через стенку теплообмена на первом участке расчёта, Вт; k_1 – коэффициент теплопередачи для расчетного участка, Вт/(м²·°C); F_1 – площадь теплопередачи первого участка расчёта, м²; Δt_1 – тепловой напор на первом участке расчёта между приточным и вытяжным каналом: $\Delta t_1 = t_{\text{пр1}} - t_{\text{выт1}}, ^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи определяется на основании известных зависимостей теплотехники с учетом применяемых материалов, характеристик воздуха и режимов его движения в приточном и вытяжном каналах теплообмена, их геометрических размеров и формы.

Коэффициент теплоотдачи в приточном и вытяжном канале находится через критерий Нуссельта, теплофизические свойства воздуха и размеры канала:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_3}, \quad (3)$$

где α – коэффициенты теплоотдачи приточного или вытяжного канала, Вт/(м²·°C); Nu – критерий Нуссельта для приточного или вытяжного канала; λ – коэффициент теплопроводности воздуха для соответствующего канала, Вт/(м·°C); d_3 – эквивалентный диаметр приточного или вытяжного канала, м.

Расчёт теплопередачи на режиме «с образованием конденсата». Коэффициент теплоотдачи определяем по выражению:

$$\alpha_{вл} = \alpha + \frac{\beta_p \cdot r \cdot \Delta P}{\Delta t}, \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); Δt – разница температур потока и у стенки, °C; β_p – коэффициент массоотдачи, кг·с/(м²·атм); r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; ΔP – разница парциальных давлений в ядре потока и у стенки, атм.

Расчёт теплопередачи на режиме «с образованием инея». Для определения коэффициента теплоотдачи используем выражение:

$$Nu = 0,038 \cdot Re^{0,8}$$

где Nu, – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса.

Коэффициент теплопроводности и плотность инея находим по выражениям:

$$\lambda_{ин} = 0,0249 \cdot (1 + 10^{-4} \cdot \rho_{ин}^2), \quad \rho_{ин} = \frac{40,9 \cdot \tau^{0,37} \cdot d_v^{0,36} \cdot \alpha_v^{0,25}}{(273,15 - \bar{T}_c)^{0,29}}, \quad (5,6)$$

где τ – время роста инея, ч; d_v – влагосодержание воздуха, г/кг; α_v – коэффициент теплоотдачи воздуха к поверхности инея, Вт/(м²·K); T_c – температура стенки, K.

Массу образующегося инея находим по соотношению Льюиса:

$$G_{ин} = \rho_{ин} \cdot \delta_{ин} = \frac{\alpha_v \cdot (d_v - d(T_{ин}^{пов})) \cdot \tau}{C_v}, \quad (7)$$

где $\rho_{ин}$ – плотность инея, кг/м³; $\delta_{ин}$ – толщина инея, м; α_v – коэффициент теплоотдачи воздуха к поверхности инея, Вт/(м²·K); d_v – влагосодержание воздуха, г/кг; $d(T_{ин}^{пов})$ – влагосодержание воздуха у поверхности инея, г/кг; τ – время роста инея, ч; C_v – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°C).

Толщину инея находим по выражению:

$$\delta_{ин} = \frac{\alpha_v \cdot (d_v - d(T_{ин}^{пов})) \cdot \tau}{C_v \cdot \rho_{ин}}, \quad (8)$$

где α_v – коэффициент теплоотдачи воздуха к поверхности инея, Вт/(м²·K); d_v – влагосодержание воздуха, г/кг; $d(T_{ин}^{пов})$ – влагосодержание насыщенного воздуха у поверхности инея, г/кг; τ – время роста инея, ч; C_v – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°C); $\rho_{ин}$ – плотность инея, кг/м³.

Значения температуры поверхности инея находим из следующих соображений:

$$T_{пов}^{ин} = T_c - (1 \dots 1,5^\circ\text{C}), \quad (9)$$

где $T_{пов}^{ин}$ – температура поверхности инея, °C; T_c – температура стенки, °C.

Схема работы рекуператора на режиме теплопередачи «с образованием инея» приведена на рисунке 2.

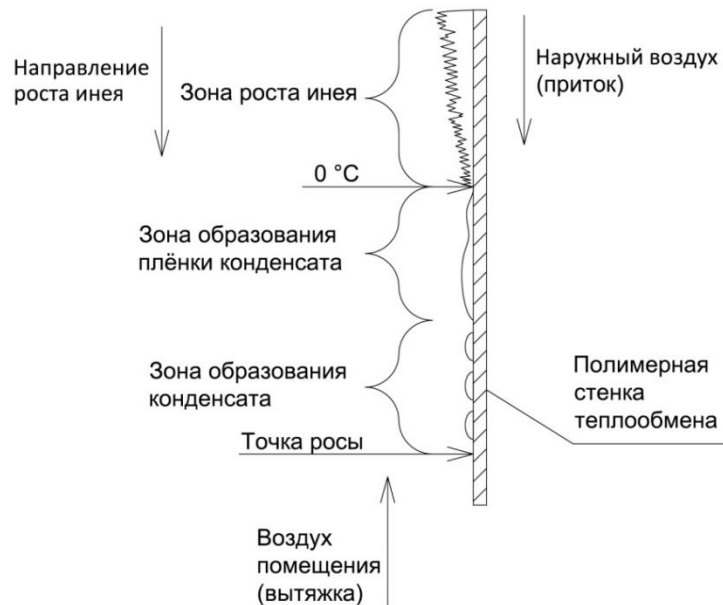


Рисунок 2 – Схема режима теплопередачи «с образованием инея»

Математическая модель регенерации вытяжного канала рекуператора.

Регенерация вытяжного канала производится за счёт подачи теплого воздуха в вытяжной канал. При этом, приточный вентилятор выключается и подача холодного воздуха через приточный канал не осуществляется.

Процесс регенерации разделен на 2 этапа:

- 1-й этап, оттаивание вытяжного канала рекуператора;
- 2-й этап, осушение вытяжного канала рекуператора.

Процесс оттаивания осуществляется последовательно, слоями. Толщина выбираемого оттаиваемого слоя инея определяет количество инея, участвующего в процессе. Оттаивание первого слоя уменьшает количество инея в канале и позволяет перейти к расчету оттаивания следующего слоя такой же толщины (выбрано 0,2 мм). Количество слоёв, которые будут рассчитываться зависит от общей толщины инея в канале, как показано на расчетной схеме рисунок 3.



Рисунок 3 – Схема оттаивания инея по слоям

Масса всего инея будет состоять из масс инея в каждом слое:

$$\sum m_{ин} = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n, \quad (10)$$

где $m_{ин}$ – масса всего инея образовавшегося в рекуператоре, кг; m_1, m_2, m_3, m_n – масса инея в каждом слое, кг; n – количество слоёв.

Количество теплоты необходимой для таяния слоя инея будет складываться из теплоты необходимой для нагрева инея до 0°C и теплоты необходимой для таяния инея. Количество теплоты необходимой для нагрева инея до 0°C :

$$P_{инп} = m_{инп} \cdot c_{ин} \cdot (0 - \Delta t_{ин}), \quad (11)$$

где $P_{инп}$ – количество теплоты необходимое для нагрева n слоя инея до 0°C , Дж; $m_{ин}$ – масса инея в n слое, кг; $c_{ин}$ – удельная теплоёмкость льда, Дж/(кг·К); $c_{ин} = 2,12 \cdot (1 + 0,0037 \cdot \Delta t_{ин}) \cdot 1000$; $\Delta t_{ин}$ – средняя температура инея для расчётного участка, $^\circ\text{C}$ $\Delta t_{ин} = t_{ин\text{ пов}} + t_{ин\text{ стен}}$; $\Delta t_{ин\text{ пов}}$ – температура поверхности инея для расчётного участка, $^\circ\text{C}$; $\Delta t_{ин\text{ стен}}$ – температура поверхности инея у поверхности стенки теплообмена для расчётного участка, $^\circ\text{C}$.

Количество теплоты необходимой для таяния инея:

$$P_{rn} = m_n \cdot r, \quad (12)$$

где P_{rn} – количество теплоты необходимой для таяния n слоя инея, Дж; m_n – масса инея в n слое, кг; r – удельная теплоёмкость плавления льда, Дж/кг; $r = 333000$ Дж/кг.

Масса воздуха необходимая для нагрева и таяния n слоя инея определяется из выражения:

$$m_{вин} = \frac{P_{cn} + P_{rn}}{c_v \cdot t_n}, \quad (13)$$

Время необходимое для таяния n -го слоя инея определяется из выражения:

$$\tau_n = \frac{m_{вин}}{G_{вн}}, \quad (14)$$

где τ_n – время для таяния n слоя инея, с; $m_{вин}$ – масса воздуха для таяния « n » слоя инея, кг; $G_{вн}$ – производительность вытяжного канала при текущей высоте проходного сечения канала, кг/с.

Время на таяния всего инея в вытяжном канале определяется из выражения:

$$\tau_{тая} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n, \quad (15)$$

Время на осушение вытяжного канала рекуператора будет складываться из времени на нагрев стенки теплообмена до 0°C и времени на осушение, они будут определяться по выражениям:

Время на нагрев поликарбоната:

$$\tau_{нагр} = \frac{m_{вп}}{G_v}, \quad \tau_{осуш} = \frac{m_{осуш}}{G_v}, \quad (16, 17)$$

где $\tau_{нагр}$ – время на нагрев стенки теплообмена занятой инеем до 0°C , с; $m_{вп}$ – масса воздуха на нагрев поликарбоната до 0°C , кг; G_v – расход воздуха в вытяжном канале, кг/с; $\tau_{осуш}$ – время на нагрев осушение вытяжного канала, с; $m_{осуш}$ – масса воздуха на испарение всей влаги в вытяжном канале, кг; G_v – расход воздуха в вытяжном канале, кг/с.

Суммарное время на регенерацию вытяжного канала определяется из выражения:

$$\tau_{рег} = \tau_{тая} + \tau_{нагр} + \tau_{осуш}, \quad (18)$$

где $\tau_{рег}$ – время на регенерацию вытяжного канала, с; $\tau_{тая}$ – время на нагрев и таяние инея, с; $\tau_{нагр}$ – время на нагрев стенки теплообмена под инеем до 0°C , с; $\tau_{осуш}$ – время для осушения вытяжного канала, с.

Разработанная методика расчета и математическая модель определения величины теплопередачи на режиме «сухой» работы, режиме «с образованием конденсата» и режиме «с образованием инея» позволяет производить расчет работы рекуператора с условием возможного инееобразования и процесса регенерации рекуператора.

Использование методики позволяет определять время инееобразования до допустимых значений и регенерацию рекуператора, что дает возможность оценить

рабочий цикл работы рекуператора с регенерацией при различных условиях работы системы вентиляции.

Предложен коэффициент характеризующий долю воды, которая останется на стенке вытяжного канала рекуператора после таяния инея и не стечёт в поддон рекуператора:

$$b = \frac{m_{\Sigma} - m_{\text{под}}}{m_{\Sigma}}, \quad (19)$$

где b – коэффициент характеризующий долю воды, которая останется на стенке вытяжного канала и не стечёт в поддон рекуператора; m_{Σ} – суммарная масса воды, которая образовалась в вытяжном канале, кг; $m_{\text{под}}$ – масса воды, которая стечёт в поддон рекуператора, либо будет унесена потоком воздуха в атмосферу, кг.

Третья глава посвящена результатам исследований по разработанным методикам и математическим моделям, их анализу.

В качестве примера расчёт проводился для рекуператора УТ-6000. При наружных температурах ниже $-16,4$ °С рекуператор будет работать на режиме «с образованием инея». При этом, в теплообменном модуле будут присутствовать все три режима работы: режим «сухой» работы, режим «с образованием конденсата» и режим «с образованием инея», рисунок 4. Так как, при работе на режиме «с образованием инея» постоянно растёт иней, то графики температур в приточном и вытяжном канале можно построить только при определённой длительности режима «рекуперация».

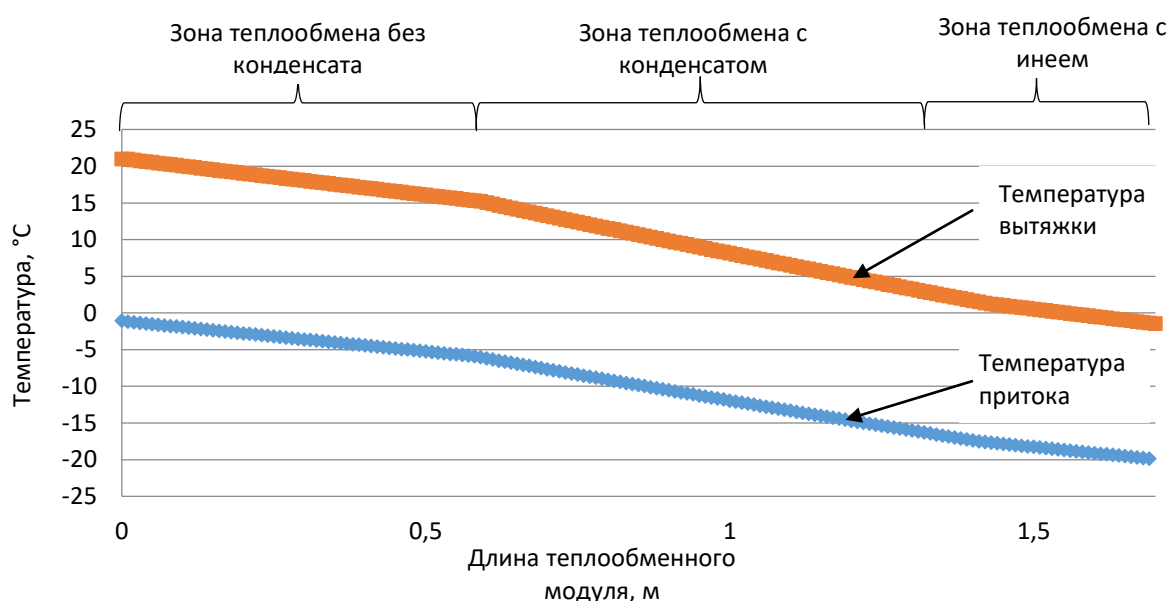


Рисунок 4 – Значения температур в приточном и вытяжном каналах рекуператора на режиме «с образованием инея». Условия: время режима «рекуперация» $\tau_{\text{рек}} = 5$ мин; наружная температура $t_{\text{н}} = -20$ °С

Как видно из рисунка 4, при наружной температуре -20 °С будут присутствовать все 3 режима работы рекуператора: режим «сухой» работы, режим «с образованием конденсата» и режим «с образованием инея». На режиме «с образованием конденсата» углы наклона графиков к оси абсцисс больше, чем на 2-х других режимах, это обуславливается более интенсивной теплопередачей за счёт выделения скрытой теплоты парообразования при конденсации влаги в вытяжном канале. Режим «с образованием инея» появляется при наружной температуре ниже $-16,4$ °С.

Математическая модель позволяет определить динамику роста инея в вытяжном канале (рисунок 5), скорость роста границы инея навстречу теплому потоку воздуха при разных наружных температурах (рисунок 6), и температуру приточного воздуха в

зависимости от наружной температуры и длительности работы рекуператора в режиме «рекуперация» (рисунок 7).

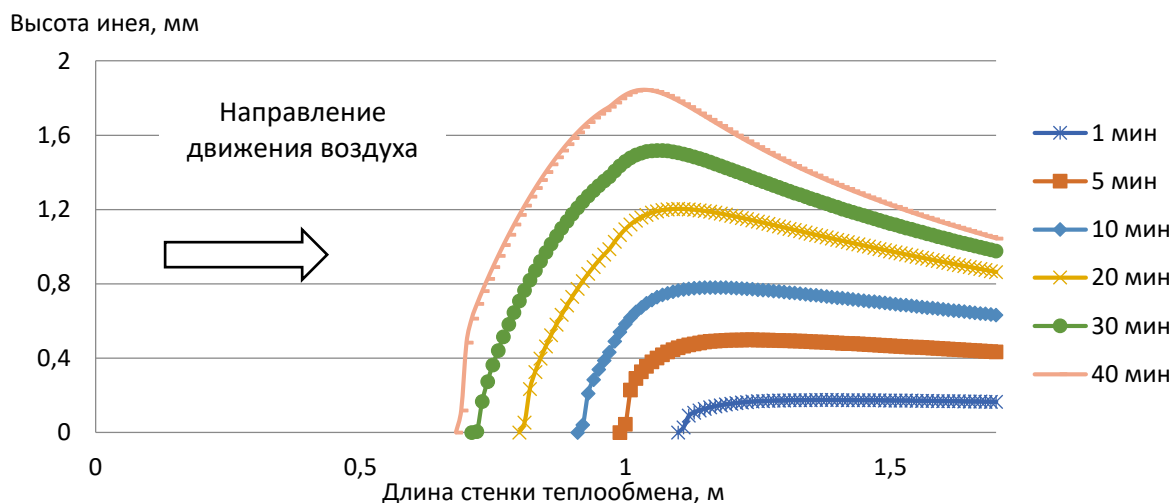


Рисунок 5 – Высота инея при наружной температуре $t_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}$, при разном времени работы рекуператора

Как видно из рисунка 5, при работе на режиме «рекуперация» иней в вытяжном канале растёт на встречу движению теплomu воздуху приводя к уменьшению проходного сечения вытяжного канала и уменьшению производительности рекуператора. Кроме того, образование инея препятствует теплопередаче от вытяжного воздуха к приточному воздуху, приводя к уменьшению возвращаемой теплоты. Интенсивность роста инея, на всём протяжении вытяжного канала от начала роста инея, будет не одинаковая и будет напрямую связана с уменьшением влажности вытяжного воздуха по мере продвижения его по вытяжному каналу. Математическая модель позволяет прогнозировать интенсивность образования инея при наружных температурах до $-40 \text{ }^\circ\text{C}$.

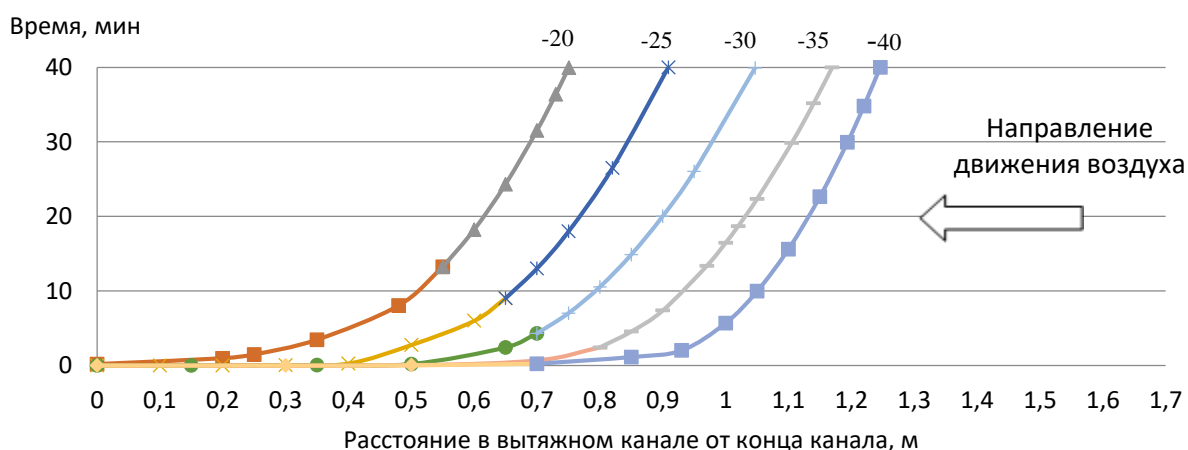


Рисунок 6 – Изменение по времени длины канала с инеем при разных температурах наружного воздуха

Как видно из рисунка 6, граница начала образования инея будет смещаться навстречу теплomu потоку воздуха в процессе работы на режиме «рекуперация». А именно, при уменьшении наружной температуры от $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, иней в вытяжном канале будет более интенсивно образовываться на поверхности вытяжного канала. Так при наружной температуре $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, и длительности работы на режиме «рекуперация» 40 мин,

иней займёт 750 мм длины вытяжного канала, при наружной температуре - 40 °С, и тех же условиях работы, иней займёт 1250 мм длины вытяжного канала.

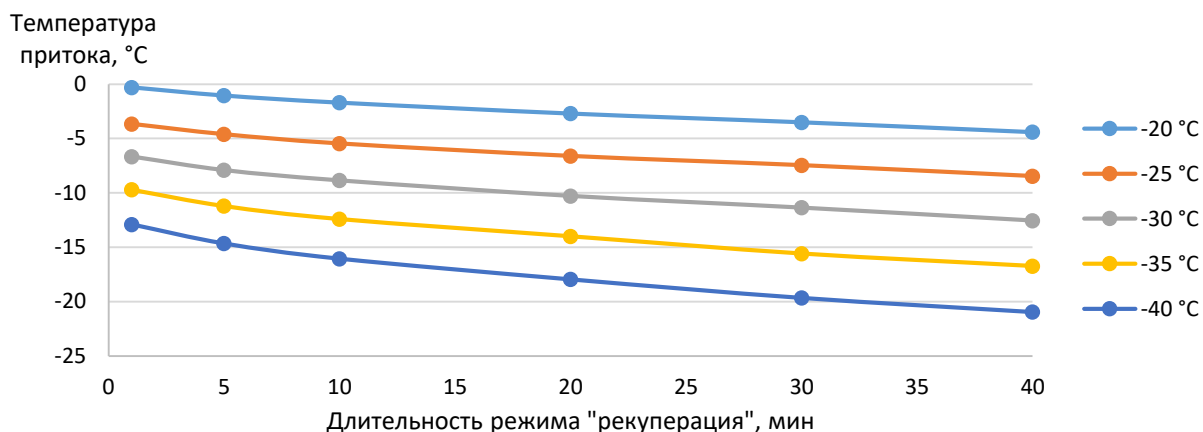


Рисунок 7 – Изменение температуры приточного воздуха для режима «с образованием инея» от времени рекуперации при разных температурах наружного воздуха

Как видно из рисунка 7, в диапазоне наружных температур от - 20 °С до - 40 °С, температура приточного воздуха, при работе рекуператора на режиме «с образованием инея», будет постепенно уменьшаться. Это связано с ростом инея в вытяжном канале, который будет препятствовать передаче теплоты приточному воздуху и, как следствие, температура приточного воздуха будет снижаться с увеличением длительности работы на режиме «рекуперация». При более низкой наружной температуре температура приточного воздуха будет ниже и иней будет расти более интенсивно, что будет приводить к более интенсивному уменьшению температуры приточного воздуха. Так, при наружной температуре - 20 °С, при длительности работы на режиме «рекуперация» от 1 мин до 40 мин, температура приточного воздуха изменится с -0,3 °С до -4,4 °С, а при наружной температуре - 40 °С, при длительности работы на режиме «рекуперация» от 1 мин до 40 мин, температура приточного воздуха изменится с -12,9 °С до -21 °С

Для режима «регенерация» математическая модель позволяет определить длительность режима в зависимости от работы на режиме «рекуперация» (рисунок 8).

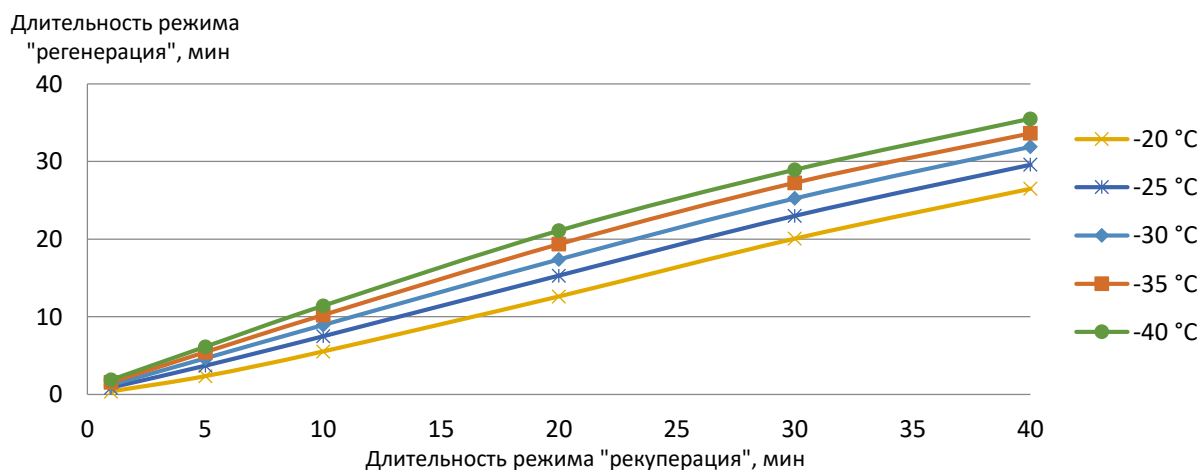


Рисунок 8 – Длительность режима «регенерация» в зависимости от времени работы на режиме «рекуперация» при разных температурах наружного воздуха

Как видно из рисунка 8, длительность режима «регенерация» имеет близкую к линейной зависимость от длительности режима «рекуперация». При уменьшении

наружной температуры длительность режима «регенерация» будет увеличиваться, что связано с большим количеством инея который образуется при более низкой наружной температуре за время работы на режиме «рекуперация», и следовательно, потребуется больше времени для регенерации вытяжного канала.

Математическая модель позволяет определить полную суточную производительность рекуператора по вытяжному каналу при циклической работе рекуператора «рекуперация»-«регенерация» (рисунок 9).

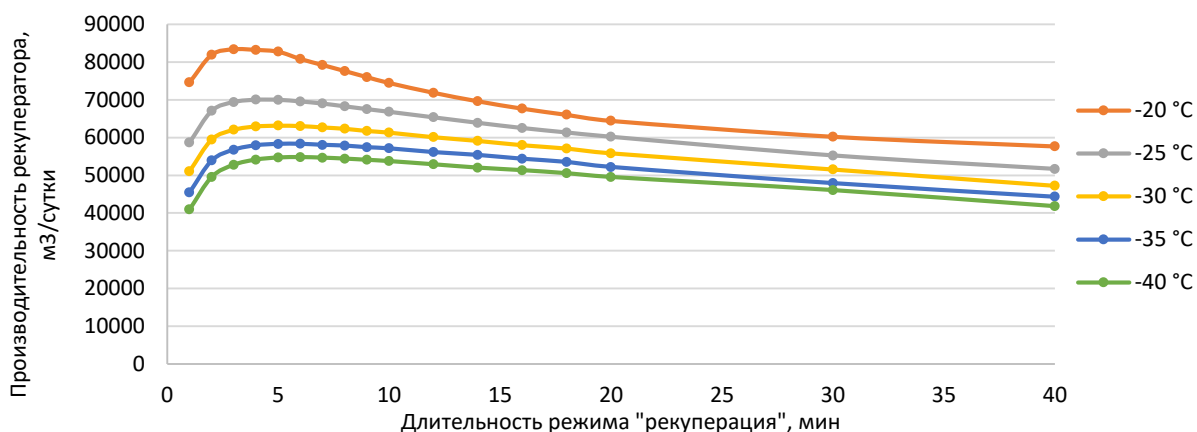


Рисунок 9 – Полная суточная производительность рекуператора по вытяжному каналу работающего в циклическом режиме в зависимости от длительности режима «рекуперация» и от наружной температуры

Как видно из рисунка 9, при увеличении длительности режима «рекуперация» суточная производительность рекуператора будет снижаться, это связано с тем, что при увеличении длительности режима «рекуперация» будет происходить рост инея, приводящий к уменьшению пропускной способности вытяжного канала. Так же, при снижении наружной температуры, интенсивность роста инея будет выше, что отразится на уменьшении пропускной способности вытяжного канала. При длительности режима «рекуперация» от 1 до 5 мин снижение производительности будет обусловлено временем «простоя» рекуператора при смене режима работы «рекуперация» - «регенерация».

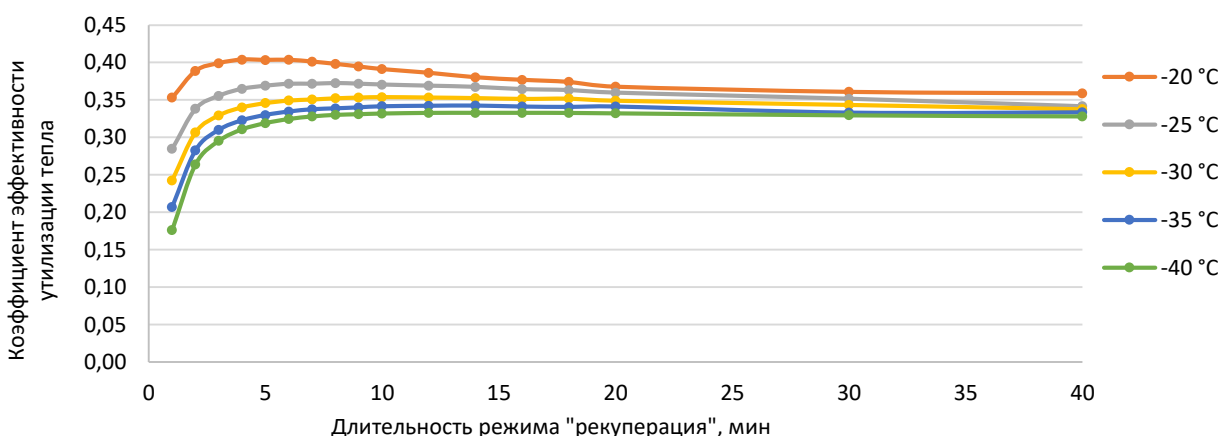


Рисунок 10 – Значения коэффициента эффективности утилизации теплоты в зависимости от длительности режима «рекуперация» при разных температурах наружного воздуха

На основании приведённых выше показателей работы рекуператора математическая модель позволяет спрогнозировать значения коэффициента эффективности утилизации теплоты в зависимости от длительности режима «рекуперация» (рисунок 10).

Как видно из рисунка 10, при циклической работе рекуператора на режимах «рекуперация» - «регенерация» значения коэффициента эффективности утилизации теплоты не будут постоянными и будут меняться от длительности режима рекуперация и от наружной температуры. При увеличении длительности режима «рекуперация» более 5 мин. наблюдается тенденция к снижению значений коэффициента эффективности утилизации теплоты, что обуславливается ростом инея и уменьшением величины теплопередачи приточному воздуху. При более низких наружных температурах, значения коэффициента эффективности утилизации теплоты будут ниже, из-за большей интенсивности инеобразования в вытяжном канале рекуператора. Снижение коэффициента, при небольшой длительности режима «рекуперация» до 4...7 мин, обусловлено временем «простоя» рекуператора при смене режима работы «рекуперация» - «регенерация».

Четвёртая глава посвящена испытаниям для подтверждения адекватности предложенной математической модели и сравнению расчётных с экспериментальными значениями.

Испытания рекуператора УТ-6000 проводились в 2019-2021 г.г. на участке карантина свиноводческого комплекса ООО «Кампоферма» расположенном в пригороде г. Зарайска, Московской области. Участок карантина, это отдельно стоящее здание, состоящее из одного помещения с 8 клетками для содержания 160 голов ремонтного поголовья и подсобным помещением.

Рекуператор УТ-6000 работал в 3-х режимах: режим «рекуперация», режим «регенерация» и режим промывки вытяжного канала (рисунок 11). Внешний вид рекуператора после монтажа представлен на рисунке 12.

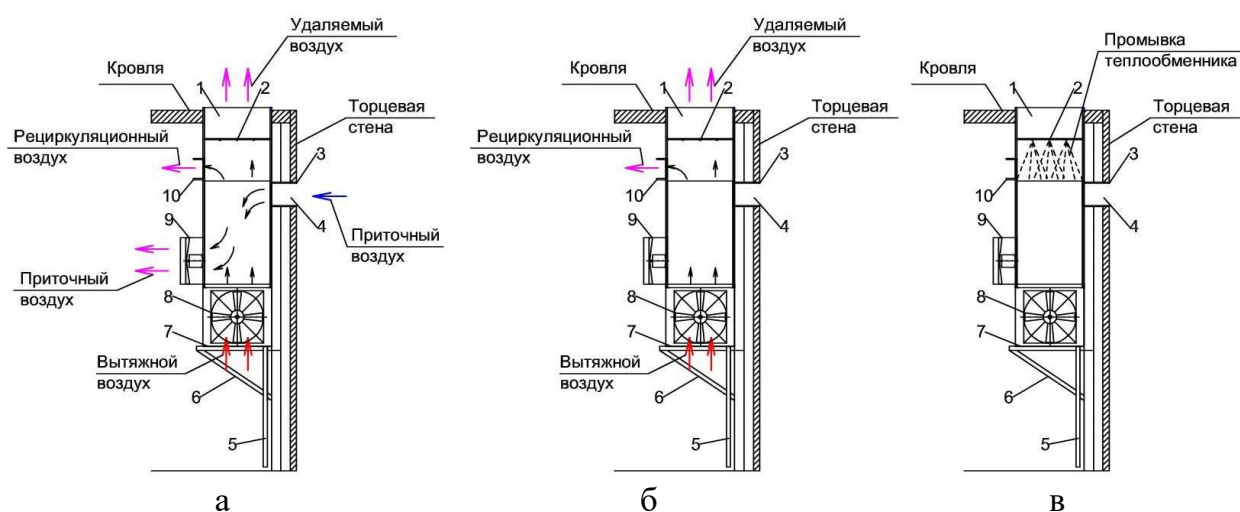


Рисунок 11 – Рекуператор УТ-6000

а – режим «рекуперация»; б – режим «регенерация»; в – режим промывки;

1 – вытяжной воздуховод; 2 – трубопровод с форсунками для промывки; 3 – окно в торцевой стене; 4 – приточный воздуховод; 5 – стальная труба для слива конденсата; 6 – опора энергосберегающей установки; 7 – поддон для сбора конденсата; 8 – вытяжной вентилятор; 9 – приточный вентилятор; 10 – окно рециркуляции.

а) Режим «рекуперация». Вытяжной воздух проходит через теплообменный модуль, нагревая приточный воздух через стенку теплообмена. После теплообменного модуля часть воздуха выбрасывается на улицу, а часть воздуха через окно рециркуляции, поступает обратно в помещение (рисунок 11, а). При снижении наружной температуры воздуха до значений, когда в вытяжном канале начнёт образовываться иней рекуператор начинает работать в циклическом режиме «рекуперация - регенерация».



Рисунок 12 –
Внешний вид рекуператора УТ-6000

б) Режим «регенерация». В режиме «регенерация» вытяжной вентилятор работает с максимальной производительностью, приточный вентилятор не работает и воздух в помещение по приточному каналу не поступает. Одновременно с этим, часть воздуха, прошедшая по вытяжному каналу, возвращается обратно в помещение через окно рециркуляции, за счёт разряжения в помещении (рисунок 11, б). Иней в вытяжном канале, на режиме «регенерация», тает и вода образовавшаяся от инея полностью высыхает. После высыхания всей влаги в вытяжном канале рекуператор переходит на режим работы «рекуперация».

в) Режим промывки. Раз в сутки автоматически включается режим промывки рекуператора. Над вытяжным каналом сверху, через форсунки низкого давления, подаётся вода. Вода стекает через вытяжной канал, собирается в поддон и отводится через трубу для слива конденсата в навозный канал. На этом режиме вентиляторы рекуператора не работают (рисунок 11, в).

На основании результатов испытаний проведена оценка эффективности рекуператора с учётом работы рекуператора при образовании инея в вытяжном канале.

Полученные экспериментальные данные температуры приточного воздуха были сопоставлены с результатами расчёта. На рисунке 13 представлено сопоставление расчётных и экспериментальных данных температуры приточного воздуха для режима «сухой» работы и режима «с образованием конденсата».

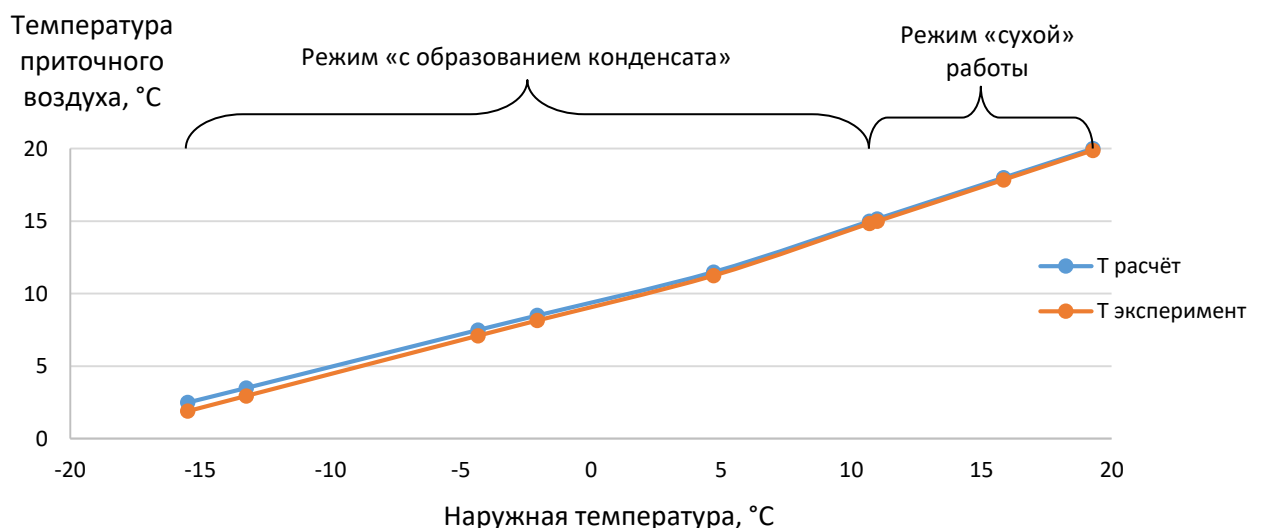


Рисунок 13 – Сопоставление расчётных и экспериментальных данных температуры приточного воздуха в зависимости от наружной температуры

Как видно из рисунка 13, для режима «сухой» работы, для наружной температуры от +10,2 до +20 °С, максимальное отклонение экспериментальных данных от расчётных

до $0,3^{\circ}\text{C}$. Для режима «с образованием конденсата», для наружной температуры от $-16,4$ до $+10,2^{\circ}\text{C}$, максимальное отклонение экспериментальных данных от расчётных до $0,6^{\circ}\text{C}$.

Для режима работы «с образованием инея» при наружной температуре -25°C были получены значения температуры приточного воздуха в зависимости от длительности режима «рекуперация», при условии что рекуператор работал в циклическом режиме «рекуперация – регенерация» (рисунок 14).

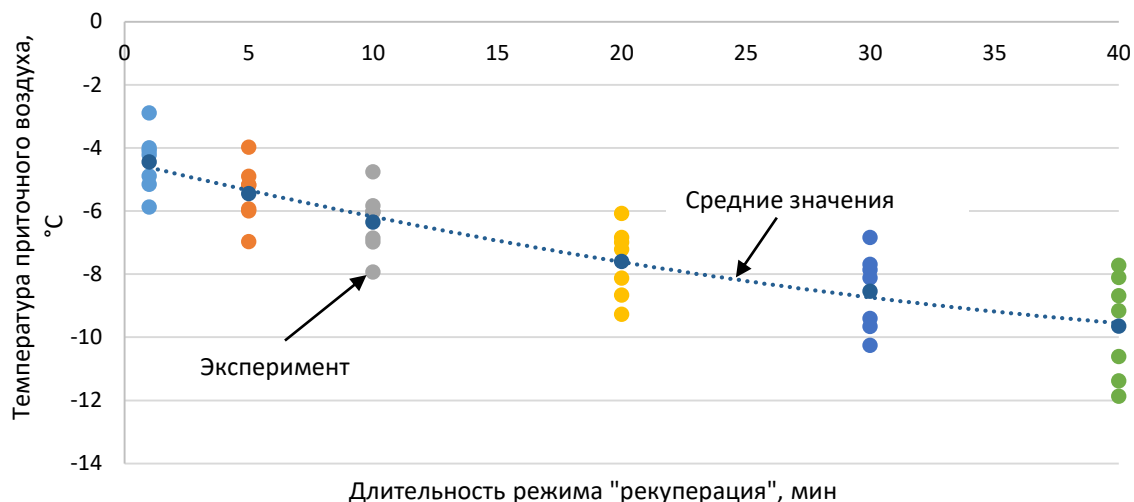


Рисунок 14 – Экспериментальные данные температуры приточного воздуха в зависимости от длительности режима «рекуперация» при работе рекуператора в циклическом режиме «рекуперация – регенерация» при наружной температуре -25°C

Как видно из рисунка 14, уменьшается приточная температуры при более длительном режиме «рекуперация». Это связано с тем, что уменьшается теплопередача от вытяжного воздуха приточному из-за увеличения слоя инея в вытяжном канале. Максимальный разброс экспериментальных значений от среднего значения приточного воздуха при длительности режима «рекуперация» 40 мин составил $4,2^{\circ}\text{C}$.

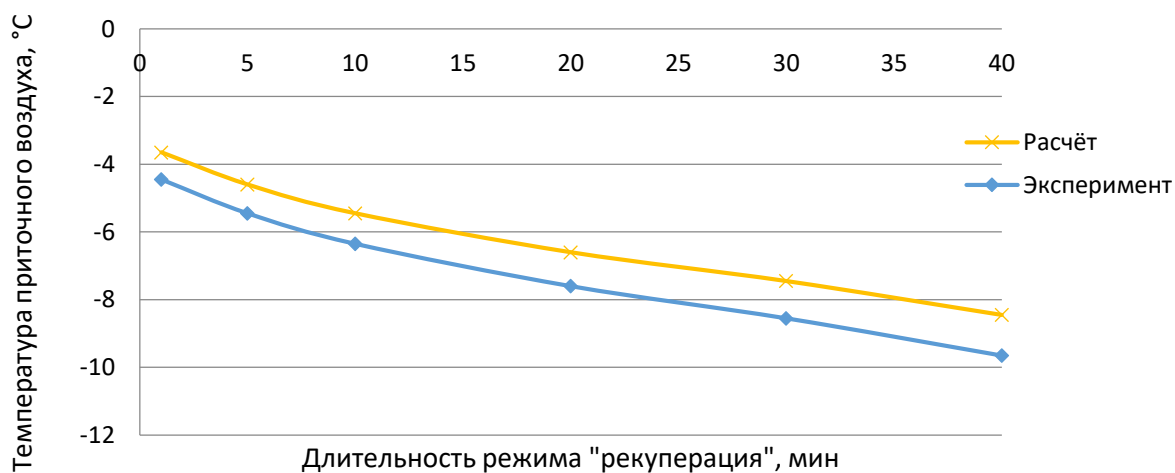


Рисунок 15 – Сопоставление расчётных и экспериментальных значений температуры приточного воздуха в зависимости от длительности режима «рекуперация» при работе рекуператора в циклическом режиме «рекуперация – регенерация» при наружной температуре -25°C

Сопоставление расчётных и экспериментальных значений температуры приточного воздуха при наружной температуре -25°C приведено на рисунке 15.

Как видно из рисунка 15, кривые изменения расчётных и экспериментальных значений температур приточного воздуха имеют идентичный характер изменения и различия между ними составляют от 0,8 °С до 1,2 °С при длительности режима «рекуперация» от 1 до 40 мин соответственно.

Важно отметить, что отклонение результатов расчёта от эксперимента находится в зоне разброса экспериментальных данных.

Оценка эффективности рекуператора была выполнена на основе сопоставления расчётных и экспериментальных значений коэффициента эффективности утилизации теплоты (рисунок 16).

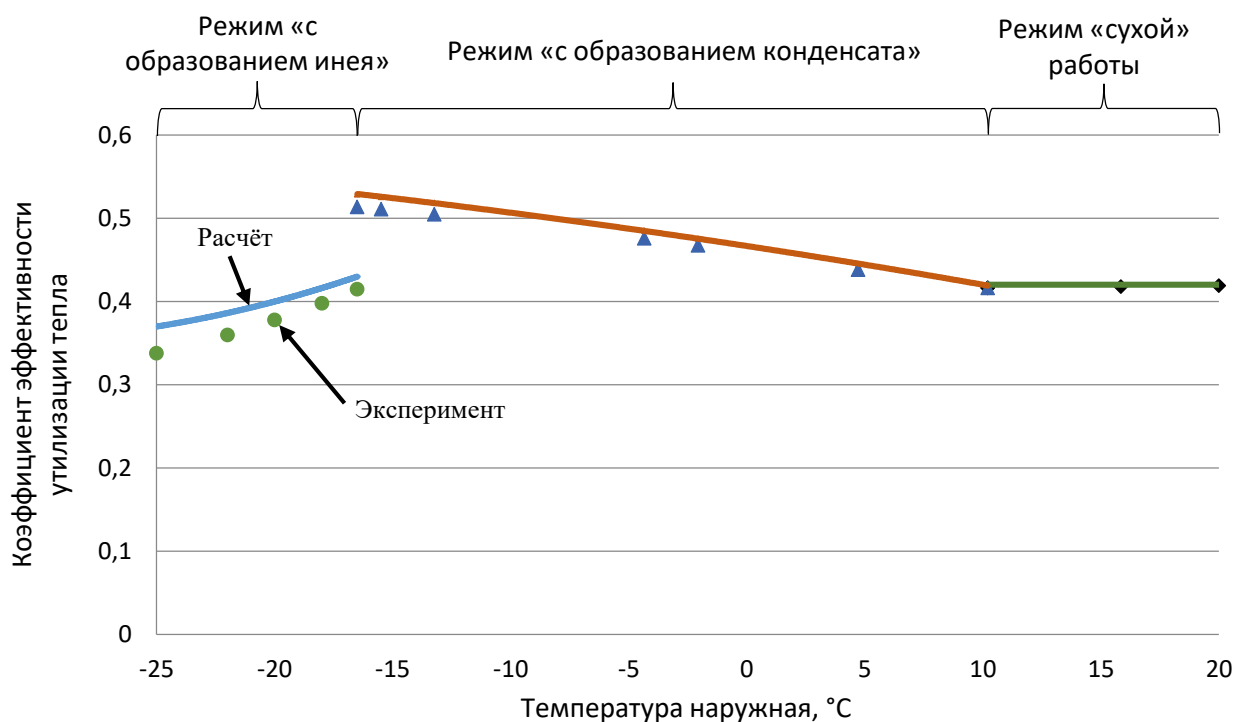


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента эффективности утилизации теплоты в зависимости от наружной температуры: расчётные и экспериментальные значения, условия: $\tau_{рек} = 5$ мин

Как видно из рисунке 16, для всех режимов работы рекуператора экспериментальные значения коэффициента эффективности утилизации теплоты имеют следующие значения: для режима «сухой» работы, для наружной температуры от +10,2 °С до +20 °С, 0,42; для режима «с образованием конденсата» получены наилучшие результаты, для наружной температуры от -16,4 °С до +10,2 °С, от 0,51 до 0,42; для режима «с образованием инея», для наружной температуры от -25 °С до -16,4 °С, от 0,34 до 0,42.

На основании методики расчёта ГИПРОНИСЕЛЬХОЗ и ВНИИМЖ был сделан расчёт тепловлажностного баланса помещения карантина. Средние значения продолжительности температуры воздуха для расчётного региона, были взяты из «Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99». На основании расчёта тепловлажностного баланса была проведена оценка годовой экономии теплоты (рисунок 17).

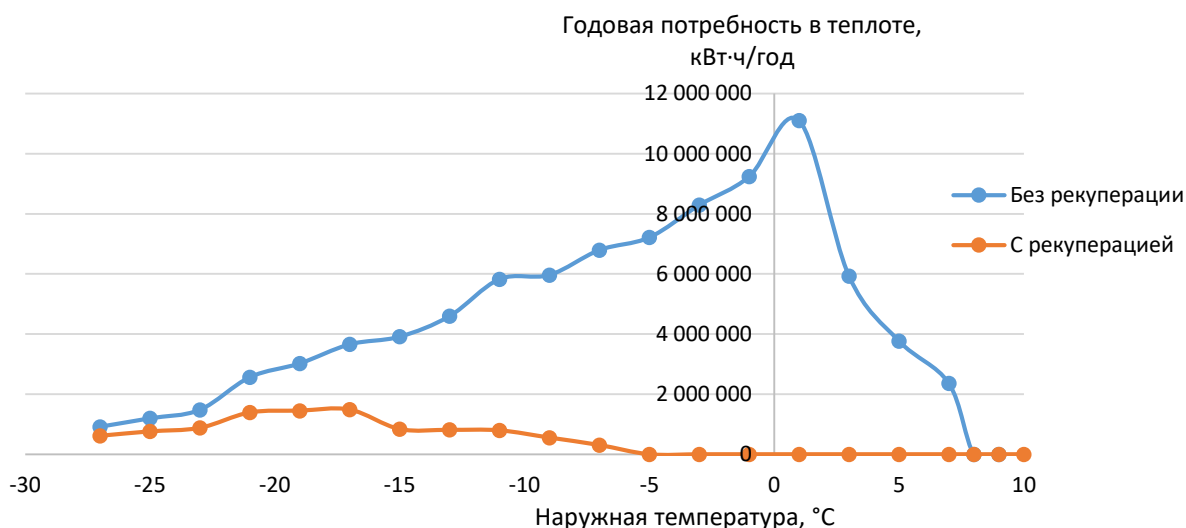


Рисунок 17 – Годовая потребность в теплоте в помещении карантина в зависимости от наружной температуры

Как видно из рисунка 17, площадь под графиками составляет годовую потребность в теплоте помещения карантина «Без рекуперации» и «С рекуперацией». Соответственно, разница площадей этих 2-х графиков показывает экономию теплоты за отопительный период, которая составляет до 88,8 %. Так же из графиков видно, что при наружной температуре выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплоты возвращаемой рекуператором будет хватать для отопления помещения карантина. Расчётные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Потребность в теплоте в помещении карантина

Оснащённость системы отопления и вентиляции	Максимальный теплodeфицит помещения	Годовая потребность в теплоте	Экономия теплоты за отопительный период
	кВт	кВт·ч/год	%
Без рекуператора	43,6	3 659 841,2	-
С рекуператором	29,2	411 058,1	88,8

С учётом полученных результатов даны рекомендации для разработки рекуператоров с возможностью работы при инееобразовании в вытяжном канале. Рекомендации связаны с конструктивными особенностями рекуператора, направлены на выполнение гигиенических требований к оборудованию и направлены на обеспечение эффективности работы рекуператора.

Заключение.

1. Предложена методика построения математической модели работы рекуператора в условиях обмерзания вытяжного канала и его регенерация.

2. Математическая модель рекуператора с регенерацией вытяжного канала позволяет:

- прогнозировать количество теплоты возвращаемой в помещение при работе рекуператора и значения коэффициента эффективности утилизации теплоты на всех режимах работы рекуператора;

- прогнозировать значение наружной температуры, при которой начнётся обмерзание вытяжного канала;

- прогнозировать значения приточного и вытяжного воздуха на выходе из рекуператора;

- прогнозировать количество образовавшегося инея в вытяжном канале и длительность режима регенерации рекуператора;
- прогнозировать производительность рекуператора по вытяжке при работе в условиях обмерзания вытяжного канала.

3. Получены экспериментальные данные значений температуры приточного воздуха, они имеют максимальное отклонение от расчётных:

- режим «сухой» работы, для наружной температуры от +10,2 до +20 °С, до 0,3 °С;
- режим «с образованием конденсата», для наружной температуры от -16,4 до +10,2 °С, до 0,6 °С;
- режима «с образованием инея», при длительности режима «рекуперация» 40 мин, составляет от 1,1 °С до 1,2 °С для наружных температур от -25 °С до -18 °С соответственно.

4. Определены функции изменения фактических значений коэффициента эффективности утилизации теплоты в зависимости от наружной температуры. Для всех режимов работы рекуператора следующие значения:

- режим «сухой» работы, для наружной температуры от +10,2 до +20 °С, 0,42;
- режим «с образованием конденсата», для наружной температуры от -16,4 до +10,2 °С, от 0,51 до 0,42;
- режима «с образованием инея», для наружной температуры от -25 до -16,4 °С, от 0,34 до 0,42.

5. Расчёт тепловлажностного баланса помещения карантина показал, что при использовании рекуператора:

- максимальная потребность в теплоте будет меньше на 14,4 кВт и составит 29,2 кВт, против 43,6 кВт без использования рекуператора;
- расчётная годовая экономия газа при использовании рекуператора составит 3 248 783,1 кВт·ч, что будет соответствовать экономии газа до 88,8 %;
- при наружной температуре выше -5 °С, теплоты возвращаемой рекуператором будет хватать для отопления помещения карантина.

6. Полученные в работе результаты исследований могут являться основой для проектирования и создания рекуператоров, предназначенных для работы в условиях низких наружных температур.

7. Полученные в работе результаты исследований могут являться основой для разработки алгоритма автоматического управления процессом регенерации рекуператора с учётом производительности рекуператора, величины наружной и внутренней температуры, частоты промывки рекуператора и других влияющих факторов.

8. С учётом полученных результатов работы даны рекомендации по:

- конструктивным особенностям рекуператора;
- выполнению гигиенических требований;
- обеспечению эффективности работы рекуператора.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Создание автоматизированной системы управления процессами рекуперации и регенерации для обеспечения работы рекуператора теплоты в условиях работы при отрицательных температурах по критериям оптимизации.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Пуган, А. А. Установка утилизации тепла с системой оттаивания / А. А. Пуган, О. П. Андреев // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 2. – С. 76-85. – DOI 10.34286/1995-4646-2020-71-2-76-85. – EDN FLCKKL.

2. Пуган, А. А. Установка утилизации тепла с возможностью работы при низких температурах / А. А. Пуган // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 2(117). – С. 27-40. – DOI 10.24411/2227-9407-2021-10013. – EDN VTDDUR.
3. Пуган, А. А. Математическая модель работы рекуператора тепла для животноводства в условиях низких температур / А. А. Пуган, С. Н. Девянин // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 3. – С. 69-79. – DOI 10.34286/1995-4646-2021-78-3-69-79. – EDN QBWWRU.
4. Пуган, А. А. Требования к рекуператорам для свиноводства, способным работать в условиях низких температур / А. А. Пуган, С. Н. Девянин // Сельский механизатор. – 2021. – № 12. – С. 22-23. – EDN VMYALF.

В прочих изданиях:

5. Опыт внедрения системы рекуперации тепла вентиляционного воздуха в систему поддержания микроклимата в свинарнике ООО "Фирма "Мортадель" / И. Ю. Игнаткин, А. М. Бондарев, М. Г. Курячий [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4(9). – С. 256-261. – EDN ТАОТГТ.
6. Пуган, А. А. Управление параметрами микроклимата в свиноводческих помещениях при использовании рекуператора тепла / А. А. Пуган, А. В. Архипцев // Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 293, Москва, 02–04 декабря 2020 года. – Москва: РГАУ, 2021. – С. 632-635. – EDN GBVLJH.
7. Архипцев, А. В. Впереди зима! Как улучшить работу системы вентиляции и отопления? / А. В. Архипцев, И. В. Ильин, А. А. Пуган // Эффективное животноводство. – 2018. – № 8(147). – С. 62-63. – EDN YNRFLN.
8. Курячий, М. Г. Технологические решения, обеспечивающие снижение потерь кормов и повышение сохранности поголовья / М. Г. Курячий, И. Ю. Игнаткин, А. А. Пуган [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 5(10). – С. 124-128. – EDN ТАQPDB.