

На правах рукописи



ОСИПОВ Евгений Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И
ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДСТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Научный руководитель: **Гулевский Вячеслав Анатольевич**
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Игнаткин Иван Юрьевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева».

Никулин Николай Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры теплогоснабжения и вентиляции Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

Защита диссертации состоится «28» июня 2023 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе Воронежского государственного технического университета, по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, корпус 2, ауд. 2226а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте <http://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «21» апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.286.02,
к.т.н., доц.



С.В. Чуйкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Оборудование подземных трансформаторных подстанций, спроектированных и построенных в 40-60 гг., не может удовлетворять современным требованиям, что связано с ростом пассажиропотоков и интенсивности движения поездов. Установка же на подстанциях трансформаторов более высокой мощности приводит к значительному росту тепловыделений. Температура воздуха в технических помещениях метрополитена достигает при этом 35-40 °С, что крайне затрудняет работу персонала и ухудшает условия эксплуатации оборудования. Данной проблеме посвящены труды таких ученых, как: Анохин В.А., Гаев Д.В., Гольдштейн Р.Н., Гулевский В.А., Кобылин Р.А., Макаровец Н.А., Свиридов Е.Б., Шацкий В.П., Шестопалов А.С. и др.

Согласно техническим условиям критической температурой воздуха при работе тяговых и понижающих трансформаторов является $t = 37^{\circ}\text{C}$. При такой температуре автоматически должно сниматься напряжение с тяговых трансформаторов и выпрямителей во избежание аварийной ситуации. В подобных условиях крайне актуальной является задача по обеспечению необходимого температурного режима помещений в котором расположено трансформаторное оборудование. В последние десятилетия в связи со значительным повышением летней температуры и увеличением интенсивности расписания движения электропоездов существующие циркуляционные системы охлаждения воздуха на подстанциях не справляются с ростом температуры, которая достигает в отдельные дни более 40°С. Основываясь на опыте европейских стран, необходимо отметить, что при строительстве и модернизации электроподстанций определяющими критериями, предъявляемыми к вентиляционным системам, а также системам охлаждения воздуха являются ресурсосбережение и экологическая безопасность, отсутствие «паразитного» тепла.

Этим критериям полностью отвечают водоиспарительные косвенно-рекуперативные охладители. По причине отсутствия достаточной теоретической базы по определению наиболее рациональных геометрических параметров и режимов их работы применение таких охладителей ограничено. Поэтому создание необходимой теоретической базы, позволяющей определить параметры охладителей в комплексе с исследованиями, обуславливающими наиболее рациональные режимы их работы для охлаждения электроподстанций метрополитена с целью создания регламентированных условий для работы тяговых и понизительных трансформаторов является актуальной проблемой.

Степень разработанности проблемы.

Вопросами вентиляции и охлаждения технических помещений метрополитена занимались: Анохин В.А., Арбузов Г.В., Гулевский В.А., Дубовый В.К., Калинушкин М.П., Кобылин Р.А., Макаровец Н.А., Молчанов В.С., Петров Н.Н., Поправко А.К., Рымкевич А.А., Свиридов Е.Б., Сидоров В.М., Славин Б.Е., Ушаков К.А., Шацкий В.П.

В работах этих авторов отмечается, что существующие на станциях глубокого залегания системы вентиляции после установки на них более мощных и, как следствие, выделяющих значительно больше теплоты трансформаторов не способны поддерживать требуемые значения температуры и для гарантированного поддержания температурного режима электроподстанций метрополитена необходимо применение дополнительного охлаждения воздуха.

Исследованиям по изучению различных типов охладителей посвящены работы: Анохина В.А., Гаева Д.В., Гольдштейна Р.Н., Гулевского В.А., Идельчика И.Е., Игнаткина И.Ю., Кобылина Р.А., Макаровца Н.А., Никулина Н.Ю., Петрова Ю.С., Рубина Э.М., Свиридова Е.Б., Сидорова В.М., Терехова В.И., Шацкого В.П., Шестопалова А.С., Яковенко И.В. и др.

Анализ этих исследований показал, что в предполагаемых условиях работы на станциях глубокого залегания наиболее перспективными являются водоиспарительные косвенно-рекуперативные агрегаты охлаждения воздуха.

Объект исследования: трансформаторные подстанции метрополитена, оборудованные водоиспарительными косвенно-рекуперативными агрегатами охлаждения воздуха.

Предмет исследования: закономерности изменения теплового состояния воздушной среды трансформаторных подстанций; теплофизические процессы, протекающие в каналах и основных элементах агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения, а также критерии эффективности их работы, необходимые для создания оптимальных конструкций.

Целью диссертационной работы является нормализация теплового режима воздушной среды трансформаторных подстанций метрополитена с использованием водоиспарительных охладителей косвенно-рекуперативного действия.

Идея работы состоит во включении агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения в систему вентиляции трансформаторных подстанций с целью создания регламентированных температурных условий для работы оборудования и технического персонала.

Задачи исследования:

1. Обосновать выбор водоиспарительного косвенно-рекуперативного охлаждения трансформаторных подстанций метрополитена;

2. Построить математическую модель теплового баланса воздушной среды подземных подстанций при включении в их систему вентиляции косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения воздуха и определить наиболее рациональные режимы работы косвенно-рекуперативных охладителей.

3. Построить математическую модель тепло-физических процессов в косвенно-рекуперативных охладителях водоиспарительного принципа действия, учитывающую аэродинамические характеристики агрегатов охлаждения.

4. Провести экспериментальные исследования для проверки адекватности математических моделей и работоспособности предлагаемых агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения.

5. Разработать методику оптимизации геометрических параметров и режимов работы агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения, учитывающую их аэродинамические сопротивления, предложить конструктивно-технологические решения по проектированию агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения и дать технико-экономическую оценку их работы.

Научная новизна работы:

1. Предложена схема охлаждения трансформаторных подстанций с включением в существующую систему вентиляции агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения.

2. Предложена, учитывающая наличие полубесконечной стенки, математическая модель теплового баланса воздушной среды подземных подстанций, оснащенных охладительными комплексами.

3. Получена математическая модель теплофизических процессов в агрегатах косвенно-рекуперативного охлаждения, учитывающая продольно-поперечную теплопроводность пластин.

4. Разработаны конструктивно-технологические решения по проектированию агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения, основанные на методике оптимизации их геометрических и режимных параметров, базирующейся на совместном решении математических моделей теплофизических процессов в каналах охладителя и его аэродинамических сопротивлений.

Теоретическая значимость заключается в предложенной и обоснованной методике расчета наиболее рациональных геометрических параметров и режимов работы агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения с максимальной холодопроизводительностью, основанной на совместном решении уравнений, описывающих процессы тепло-массопереноса и аэродинамические сопротивления агрегата охлаждения.

Практическая значимость заключается в предложенных технических решениях совершенствования систем нормализации температурно-влажностного состояния воздушной среды электроподстанций, методиках для расчета и проектирования агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения, полученных результатах экспериментальных исследований, которые могут использоваться при проектировании новых и модернизации существующих систем вентиляции и охлаждения трансформаторных подстанций метрополитена.

Методология и методы исследования.

Необходимая глубина анализа и достоверность выводов достигается применением общенаучных методов и приемов – монографического, аналитического, экономико-математического, статистического, графического.

Эмпирическая база исследования включает обработанные данные, полученные в результате проведения лабораторных экспериментов и опытно-производственных испытаний.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель теплового баланса (нестационарного распределения температуры) подземных трансформаторных подстанций, система вентиляции которых оборудована водоиспарительными охладителями.

2. Математическая модель теплофизических процессов в агрегатах косвенно-рекуперативного охлаждения, учитывающая продольно-поперечную теплопроводность пластин.

3. Методика определения наиболее рациональных геометрических параметров и режимов работы агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения, учитывающая процессы тепло-массопереноса и аэродинамические сопротивления в каналах теплообменников.

4. Технические решения и предложения по проектированию агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения для модернизации существующих и оснащения новых трансформаторных подстанций метрополитена.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на международной научной конференции «Наука и образование в современных условиях» (Воронеж, 2016 г.), на международной научно-практической конференции «Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Воронеж, 2018 г.), на национальной научной конференции «Наука, образование и инновации в современном мире» (Воронеж, 2019 г.), на международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе» (Воронеж, 2019 г.), на международной научной конференции "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production" (Ростов, 2020 г.), на национальной научно-практической конференции «Теория и практика инновационных технологий в АПК» (Воронеж, 2022 г.).

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются использованием в ходе ее выполнения общепризнанных законов тепло-массообмена и способов определения теплофизических характеристик воздуха, согласованностью данных полученных в ходе теоретических и экспериментальных, в том числе производственных, исследований, а также корректной статистической обработкой полученных результатов.

Внедрение результатов. Основные положения предложенной методики оптимизации геометрических параметров и режимов работы агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения и предложенные конструктивно-технологические решения по проектированию агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения применяются в проектировании и разработке указанных агрегатов в московском метрополитене фирмой «Яуза-Моторс». Разработанные при участии автора агрегаты охлаждения воздуха установлены и работают на тягово-понижительных станциях «Рижская» и «Алексеевская» московского метрополитена.

Личный вклад автора заключается в его непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования, в том числе в определении цели, постановке задач исследования и определении возможных способов их

решения; в построении математических моделей и проведении теоретических расчетов теплового баланса подстанций глубокого залегания, а также теплофизических процессов в каналах косвенно-рекуперативных охладителей воздуха; в проведении лабораторных и производственных испытаний агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения; в разработке технических решений, а также методики оптимизации параметров и режимов работы предлагаемых агрегатов охлаждения воздуха.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 2 в изданиях Scopus и WoS, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 монографии, 2 патента на изобретение, 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Объем и структура диссертации: диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 149 источников и приложений. Работа изложена на 151 странице, в том числе 113 страниц основного текста, включающие 45 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены аргументы, доказывающие актуальность работы, сформулирована цель работы, а также задачи, которые необходимо выполнить для ее достижения, показана научная новизна положений, выносимых на защиту, описаны теоретическая и практическая значимость работы, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена характеристика электроподстанций, схемы подстанций, перечень оборудования на них, его тепловыделения при номинальных и пиковых нагрузках, дано описание вентиляционных систем и систем охлаждения воздуха тяговых, понизительных и тягово-понижительных подстанций. Представлен анализ тепловых режимов их работы. Дана характеристика современных способов охлаждения воздуха, приведены аргументы в пользу выбора водоиспарительных косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения, определены направления исследования.

Во второй главе на основе теплового баланса тягово-понижительной станции (СТП), в системе вентиляции которой, предусмотрено охлаждение воздуха с его циркуляцией получена формула для определения температуры воздуха в помещении:

$$T_{ном} = T_{охл} + \frac{Q_{т}}{C \rho G_{в}}, \quad (1)$$

где $T_{охл}$ – температура охлажденного воздуха, °C; $Q_{т}$ – теплопритоки технологического оборудования, Вт; $G_{в}$ – расход воздуха, м³/с; C – теплоемкость воздуха, ρ – плотность воздуха, кг/м³.

С учетом того, что тепловыделения от расположенного на СТП оборудования в штатном режиме составляют 60 кВт, построена зависимость, иллюстрирующая возможности существующих систем вентиляции и охлаждения при различных расходах воздуха (рис.1). Как видно из графика, представленного на этом рисунке, даже при достаточно низкой расчетной тем-

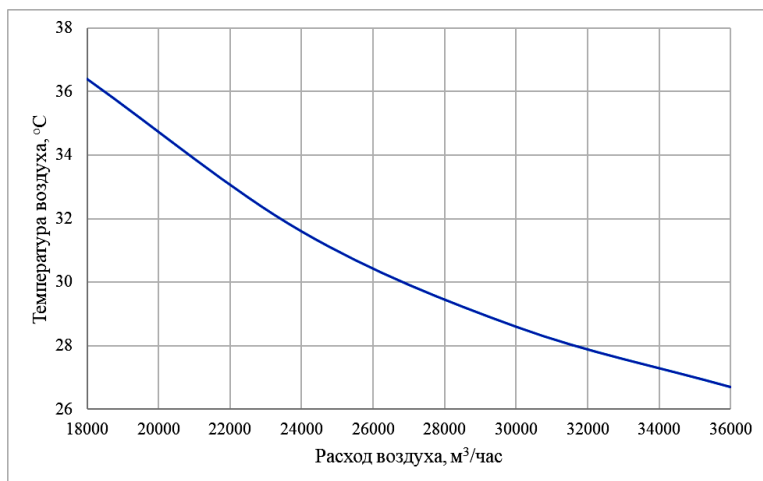


Рисунок 1.

тает до 130 кВт температура в рабочей зоне будет приближаться к критическим значениям $T_{\text{пом}} = 35\text{--}37^\circ\text{C}$.

Рассматривая тепловой баланс СТП, система охлаждения которой дополнена предлагаемым агрегатом косвенно-испарительного охлаждения рекуперативного принципа действия (рис. 2), находим формулу для определения установившейся температуры в помещении:

$$T_{\text{пом}} = \frac{\frac{Q}{C\rho} + G_{\text{м}}(kT_{\text{с}} + T_{\text{н}}) - G_{\text{в}}T_{\text{охл}}}{(k+1)G_{\text{м}} + G_{\text{в}}}, \quad (2)$$

а также зависимость температуры воздуха в помещении от времени:

$$V \frac{dT(\tau)}{d\tau} = \frac{Q}{C\rho} - (k+1)G_{\text{м}}T(\tau) + G_{\text{м}}(kT_{\text{с}}(\tau) + T_{\text{н}}) - G_{\text{в}}(T(\tau) - T_{\text{охл}}) - \frac{\alpha [T(\tau) - T_0] \cdot e^{H^2\alpha\tau} \operatorname{erfc}(H\sqrt{\alpha\tau}) \cdot F_{\text{озр}}}{C\rho}. \quad (3)$$

Замечая, что формулы (2) и (3) содержат ряд величин – расход воздуха через «мокрые» каналы агрегата охлаждения ($G_{\text{м}}$), температура охлажденного «су-

хого» воздуха ($T_{\text{с}}$), а также коэффициент перераспределения потоков по «сухому» и «мокрому» каналам (k) – значения которых на данном этапе исследований неизвестны, переходим к математическому моделированию физических и аэродинамических процессов в агрегатах охлаждения.

Работа водоиспарительных агрегатов косвенно-рекуперативного охлаждения, принципиальная схема рабо-

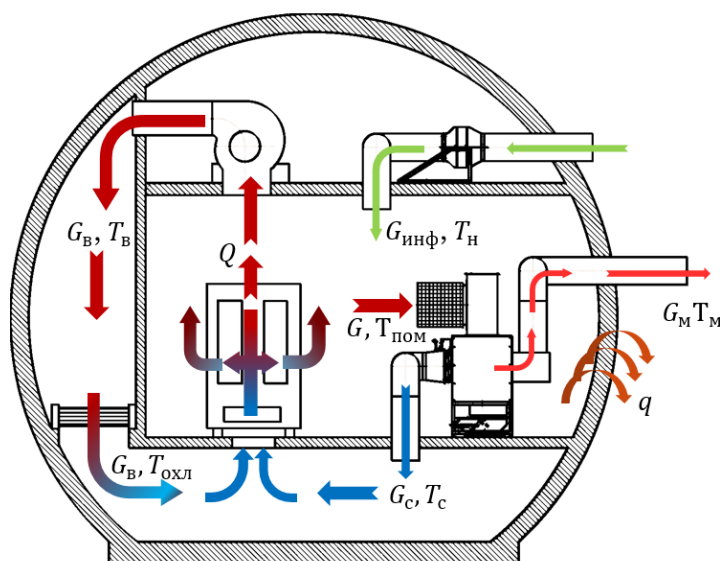


Рисунок 2.

ты которых указана на рис. 3, основана на процессе тепло-массопереноса энергии в каналах и пластинах охладителя. Охлаждаемый поток воздуха входит в «сухие» каналы и за счет теплообмена с их стенками – «сухой» стороной пластин – охлаждается с $T_{\text{вх}}$ до $T_{\text{вых}}$. Затем одна часть охлажденного «сухого» воздуха направляется в помещение, а вторая разворачивается и поступает в «мокрые» каналы охладителя, в которых за счет испарения воды с их стенок охлаждается и тем самым охлаждает «мокрую» сторону пластин, что в свою очередь ведет к охлаждению всего сечения пластин, включая их «сухую» часть. При моделировании теплофизических процессов учтем тот факт, что температура воздуха на входе в «мокрые» каналы равна $T_{\text{вых}}$, заранее неизвестна и должна определяться в процессе решения.

Предлагаемая модель включает в себя ряд уравнений, которые описывают следующие тепло-физические процессы:

- энергообмен в основном - «сухом» и вспомогательном - «мокрым» каналах охладителя соответственно:

$$-\rho \cdot V_T(x, y) \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L), y \in (H_p, H_p + H),$$

$$-\rho \cdot V_t(x, y) \cdot C \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L), y \in (-h, 0);$$

- массообмен во вспомогательном - «мокрым» канале охладителя:

$$V_t(x, y) \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D(T) \frac{\partial W}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L), y \in (-h, 0);$$

- распределение температуры по длине и поперечному сечению пластин охладителя:

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} = 0, \quad x \in (0, L), y \in (-H_p, H_p).$$

Решение представленной системы уравнений основано на ряде начальных условий:

- значения температуры и относительной влажности воздуха на границах «сухих» и «мокрых» каналы:

$$T|_{x=L} = T_{\text{вх}}, \quad y \in (H_p, H_p + H),$$

$$t|_{x=0} = T_{\text{вых}}, \quad W|_{x=0} = \varphi_{\text{вх}} \cdot W_{\text{нас}}(t_{\text{вх}}), \quad y \in (-h, 0);$$

- четность (симметричность теплофизических процессов в каналах) относительно осей симметрии каналов

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H_p+H} = 0, \quad x \in (0, L), \quad \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=-h} = 0, \quad x \in (0, L), \quad \left. \frac{\partial W}{\partial y} \right|_{y=-h} = 0, \quad x \in (0, L)$$

- теплоизолированность на торцах пластин охладителя:

$$\left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad y \in (0, H_p); \quad \left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad y \in (0, H_p);$$

- равенство тепловых потоков на границах воздушного потока и канала, а также равенство их температур:

$$\begin{aligned}
T \Big|_{y=H_p} &= T_p \Big|_{y=H_p}, \quad x \in (0, L); & t \Big|_{y=0} &= T_p \Big|_{y=0}, \quad x \in (0, L); \\
\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} &= \lambda_{nz}(T_p) \frac{\partial T_p}{\partial y}, \quad y = H_p, \quad x \in (0, L); \\
\varepsilon R(t) D \frac{\partial W}{\partial y} &= \lambda_{nz}(T_p) \frac{\partial T_p}{\partial y} - \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y}, \quad y = 0, \quad x \in (0, L); \\
V(x, y) &= V_{ex} \left[1,5 - \frac{1,5 y^2}{h^2} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\cos \left(\frac{g_n y}{h} \right)}{\cos(g_n)} \right) e^{\left(-4 \frac{g_n^2 v x}{v_{ex} h^2} \right)}}{g_n^2} \right],
\end{aligned}$$

где g_n – положительные корни уравнения $tg(x) = x$; v – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; h – половина сечения канала, м ; $V_{\text{вх}}$ – входная скорость воздушного потока, $\text{м}/\text{с}$; W – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\lambda_{\text{пл}}$ – теплопроводность пластины, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.



Рисунок 3.

В связи с наличием в косвенно-рекуперативных агрегатах охлаждения воздуха встречных воздушных потоков в основном и вспомогательном каналах, решение предлагаемой математической модели не допускает пошагового движения по направлению тока воздуха в одном из каналов и ее реализация осуществлялась путем решения конечно-разностных аналогов уравнений, описывающих процессы тепло- массопереноса.

Расчеты, проведенные по предложенной модели позволили определить температуру воздуха на всем пути его движения (рис. 4), дать оценку влияния коэффициента k на эффективность работы агрегата охлаждения по его холодопроизводительности (рис. 5).

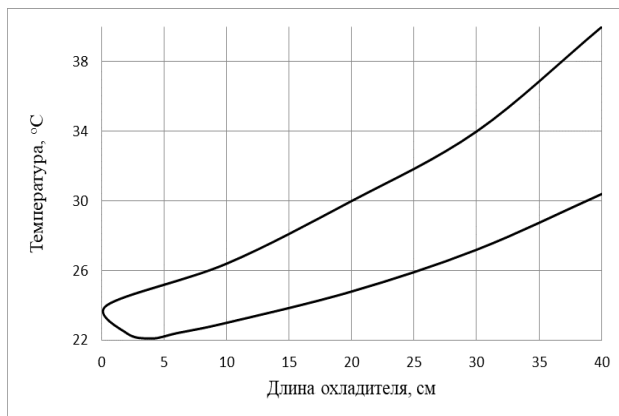


Рисунок 4.

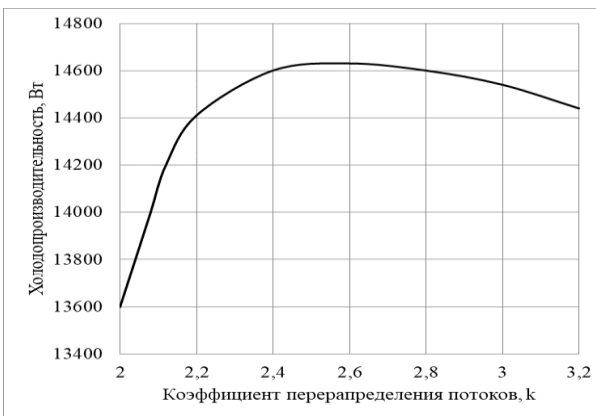


Рисунок 5.

Вместе с тем, для определения расходных характеристик работы агрегатов охлаждения и определения оптимальных по холодопроизводительности геометрических параметров охладителей, возникла необходимость изучения аэродинамики косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения.

Общее аэродинамическое сопротивление агрегата охлаждения представляется в виде:

$$\Delta P_{\text{охл}} = \xi_{\text{отв}} \cdot \rho \cdot V_{\text{отв}}^2 + \xi_{\text{ф}} \cdot \frac{\rho \cdot V_{\text{ф}}^2}{2} + \xi_{\text{м}} \cdot \frac{\rho \cdot V_{\text{общ}}^2}{2} + 217 \cdot \frac{L \cdot V_{\text{общ}}}{h_c^2} \cdot 10^{-6}.$$

Аппроксимируя расходно-напорную характеристику применяемого вентилятора, можно получить функциональную зависимость: $\Delta P_{\text{вент}} = \Delta P_{\text{вент}}(G)$. Тогда, решение уравнения $\Delta P_{\text{охл}}(G) = \Delta P_{\text{вент}}(G)$, позволяет получить значение общего расхода воздуха в зависимости от геометрических параметров агрегата охлаждения.

Аппроксимация расходно-напорной характеристики одного из вентиляторов, рекомендуемых для применения в агрегатах охлаждения рекуперативного принципа действия представляет собой зависимость потери напора от расхода воздуха:

$$\Delta P_{\text{вент}}(G) = 636 \cdot 2 - 96 \cdot 63 G + 87 \cdot 7 G^2 - 60 \cdot 45 G^3.$$

Реализация совместной математической модели аэродинамических сопротивлений и процессов тепло-массопереноса в агрегатах охлаждения поз-

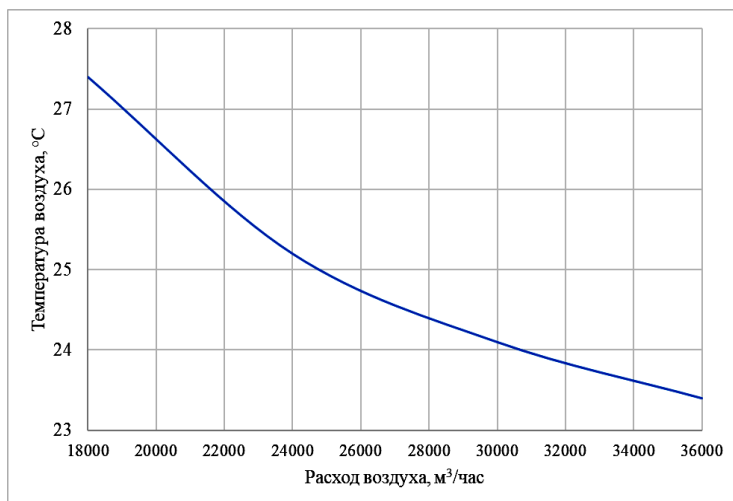


Рисунок 6.

воляет определить наиболее рациональные параметры и режимы их работы. На рис. 6 представлены результаты расчета для рассматриваемой ранее электроподстанции в систему вентиляции которой установлены 2 агрегата охлаждения, обеспечивающие температуру охлажденного воздуха 19°C, и расход 7700 м³/час каждый.



Рисунок 7.

следований целью которых являлась проверка адекватности предложенных математических моделей, а также проверка работоспособности предлагаемых агрегатов охлаждения. Для этих целей на базе АО «НПО «СПЛАВ» был изготовлен ряд экспериментальных образцов агрегатов охлаждения с различными геометрическими параметрами. (рис. 7).

Результаты эксперимента показали, что погрешность расчетов по пред-

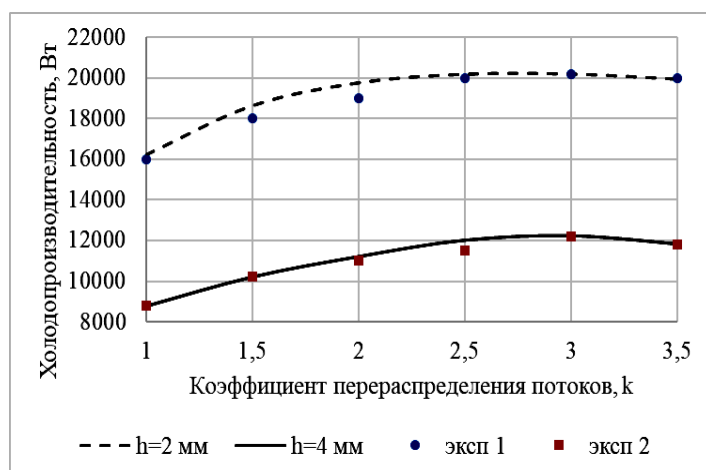


Рисунок 8.

ложенной модели аэродинамических сопротивлений составляет не более 4%, а по модели тепло- массопереноса – не более 3%, что подтверждает адекватность предложенных моделей.

Кроме того, экспериментально подтверждено наиболее рациональное соотношение потоков воздуха в «сухих» и «мокрых» каналах $k=2,5-2,6$ (рис. 8). Установлено, что при

увеличении длины охладителей с $L=0,4$ м до $L=0,5$ м материалоемкость увеличивается на 25%, аэродинамические сопротивления на 14-18%, вследствие чего холодопроизводительность охладителя увеличивается всего на 3,9% с 22 кВт до 22,86 кВт, в связи с чем наиболее рациональной длиной каналов предлагается $L=0,4$ м.

В четвертой главе базируясь на полученных ранее математических моделях тепло- массопереноса и аэродинамических сопротивлений в агрегатах охлаждения, а также с учетом предложенного теплового баланса СТП, представлена методика расчета параметров и режимов работы агрегатов охлаждения в зависимости от конкретных условий рассматриваемого помещения СТП (рис. 9)



Рисунок 9.

На основе предложенной методики приведено проектирование параметров и режимов работы агрегатов охлаждения для СТП на станции метро «Рижская» и станции метро «Алексеевская» Московского метрополитена.

В первом случае в качестве силового оборудования с большими тепловыделениями присутствуют: 4 понижающих трансформатора модификаций ТСЗП-1600/10МНУЗ, ТСЗП-2500/10МНУЗ и 4 кремниевых выпрямителя УВКМ-6. Система охлаждения организована по рециркуляционной схеме с охлаждением воздуха артезианской водой. Количественные характеристики, необходимые для расчета: тепловыделения на подстанции: 60-128 кВт, температура воздуха в тоннеле: 25 °С. расход вентиляции: 18000-36000 м³/час.

По результатам проведенных расчетов сделан вывод о целесообразности изготовления четырех агрегатов охлаждения с общей холодопроизводительностью 76,8 кВт, которые обеспечивая подачу охлажденного воздуха температурой 18°С через коллекторный этаж к понижающим трансформаторам, гарантируют температуру в помещении СТП не более 27°С, что удовлетворяет условиям нормальной работы силового оборудования СТП.

Вторая рассматриваемая электроподстанция расположена на станции метро «Алексеевская». В качестве силового оборудования с большими тепловыделениями здесь присутствуют 3 понижающих трансформатора марки ТСЗП-2500/10МНУЗ, работающие с 3 кремниевыми выпрямителями УВКМ-6. Система охлаждения организована по рециркуляционной схеме с охлаждением воздуха поверхностными охладителями с артезианской водой. По результатам проведенных расчетов сделан вывод о целесообразности изготовления 2 агрегатов охлаждения с общей холодопроизводительностью 57,8 кВт, которые, обеспечивая подачу охлажденного воздуха не более 19°С через кол-

литорный этаж к понижающим трансформаторам, обеспечат в помещении СТП температуру воздуха не более 27 °С. Основываясь на приведенных ранее методиках и предложенных математических моделях, на трансформаторных подстанциях Московского метрополитена смонтированы и запущены агрегаты охлаждения воздуха моделей АОВ-1000, АОВ-5000, АОВ-5000-02 и АОВ-5000АКЕ (рис. 10, 11).



Рисунок 10.



Рисунок 11.

В настоящее время с помощью агрегатов охлаждения воздуха поддерживаются комфортные условия для работы персонала и эксплуатации трансформаторов на СТП "Тверская", "Проспект Мира", "Рижская", "Алексеевская" и "ВДНХ".

На основе имеющегося теоретического и практического опыта разработана линейка агрегатов охлаждения с производительностью от 100 до 10 000 м³/час (Таблица 1).

Таблица 1.

Параметр	Наименование агрегата охлаждения						
	АОВ-100	АОВ-300	АОВ-500	АОВ-1000	АОВ-3000	АОВ-5000	АОВ-10000
Общий расход воздуха, м³/час	150	450	750	1500	4500	8800	16300
Производительность по охлажденному воздуху, м³/час	100	300	500	1000	3000	5000	9500
Перепад температуры между исходным и охлажденным воздухом, °С в зависимости от влагосодержания воздуха	от 6 до 15						
Холодопроизводительность, кВт в зависимости от влагосодержания воздуха	0,2 – 0,5	0,7 – 1,6	1,1 – 2,7	2,2 – 5,4	6,5–16,3	11–27,2	21,7–54,3
Потребляемая мощность, кВт	0,067	0,2	0,25	1,1	3,5	5,5	7
Расход воды, не более, кг/час	0,25	1,1	1,8	10	30	40	60

Проведена технико-экономическая оценка работы агрегатов охлаждения, результаты которой показали, что сокращение работы собственной системы охлаждения тягово-понижительной станции, работа которой основана на применении артезианской воды до 2-4 часов в сутки, позволяет получить экономический эффект от экономии артезианской воды, затрачиваемой на охлаждение вентилируемого воздуха в размере 1 682 650 руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа существующих способов и технических средств охлаждения воздуха, а также с учетом требований, предъявляемых к температурно-влажностным параметрам воздушной среды при работе трансформаторов, обоснован выбор косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения воздуха для нормализации температуры трансформаторных подстанций метрополитена.

2. Получена математическая модель теплового баланса воздушной среды подземных подстанций при включении в их систему вентиляции косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения воздуха, а также с учетом наличия в помещении полубесконечной стенки. В результате исследования температурного баланса воздушной среды рассматриваемых технических помещений определены наиболее рациональные режимы работы предлагаемых косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения. В частности, установлено, что при теплоступлениях от оборудования $Q = 16,5$ кВт и температуре внешнего воздуха 27°C , температура охлажденного потока воздуха на выходе из каналов косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения должна составлять 19°C , тогда при общем расходе 7700 м³/час, температура в помещении будет стабилизироваться на значении $27,4^{\circ}\text{C}$.

3. Предложена математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса в косвенно-рекуперативных агрегатах охлаждения воздуха, учитывающая продольно-поперечную теплопроводность пластин. Разработан метод реализации предложенной модели, основанный на её конечно-разностном аналоге. Установлена зависимость эффективности работы косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения воздуха от температурно-влажностных параметров обрабатываемого воздуха, а также геометрических параметров агрегата. Доказано, что одним из важнейших условий повышения эффективности работы косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения является перераспределение расходов «сухого» и «мокрого» потоков воздуха - k . Установлено, что максимальная холодопроизводительность соответствует значению величины $k = 2,5-2,6$.

4. Соответствие результатов экспериментальных исследований и теоретических расчётов доказывает адекватность описания теплофизических процессов в каналах косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения предложенной математической моделью. Доказано, что при определении эффективности работы косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения необходимо учитывать аэродинамические сопротивления. В частности, установлено,

что при увеличении длины каналов агрегата с $L=0,4$ м до $L=0,5$ м материалоемкость увеличивается на 25%, а его холодопроизводительность увеличивается всего на 3,9% с 21,8 кВт до 22,6 кВт, в связи с чем наиболее рациональной длиной каналов предлагается $L=0,4$ м.

5. Предложены конструктивно-технологические решения по проектированию косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения воздуха (Патенты №2356751, №2376533), основанные на методике оптимизации их геометрических и режимных параметров (Свидетельство на программу для ЭВМ № 2022660449), базирующейся на решении уравнений тепло-массопереноса и уравнений, описывающих аэродинамические сопротивления в их каналах. Анализ техно-экономической оценки показал возможный годовой экономический эффект от экономии артезианской воды, затрачиваемой на охлаждение вентилируемого воздуха, в размере 1 682 650 руб.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в разработке и обосновании усовершенствованных конструктивно-технологических и технических решений по проектированию косвенно-рекуперативных агрегатов охлаждения воздуха, предусматривающих включение в предлагаемую систему вентиляции второго контура охлаждения в целях исключения использования артезианской воды на охлаждение поступающего воздуха.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, WoS:

1. Gulevsky V.A., Comparative evaluation of flow-through and counter-flow indirect-evaporative air coolers and their influence on the heat balance of transformer underground substations / Gulevsky V.A., Shatskiy V.P., Osipov E.N. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production" 2021. С. 012117.

2. Osipov E.N., Water-evaporative cooling of sealed volumes / Shatskiy V.P., Gulevsky V.A., Osipov E.N. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production" 2021. С. 012118.

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК:

3. Осипов Е.Н. Охлаждение технических объектов с помощью водо-испарительных охладителей / В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2020. – №2(58). – С. 20-28.

4. Гулевский В.А. Сравнительная оценка прямоточных и противоточных косвенно-испарительных охладителей воздуха и их влияние на тепловой баланс трансформаторных подстанций метрополитена / В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 11 (731). – С. 43-51.

5. Гулевский В.А. Влияние аэродинамических сопротивлений на эффективность работы рекуперативных косвенно-испарительных охладителей

воздуха // В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий. Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 10 (730). – С. 44-53.

6. Осипов Е.Н. К вопросу о перераспределении потоков воздуха в пластинчатых водоиспарительных охладителях рекуперативного принципа действия / Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий, Н.Г. Спирина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 1 (685). – С. 51-57.

Патенты:

7. Пат. 2356751 Рос. Федерация, МПК В60Н 1/00. Охладитель Вентилируемого воздуха / Макаровец Н.А., Кобылин Р.А., Костин В.Е., Ерохин В.Е., Осипов Е.Н., Соколов А.С.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Государственное научно-производственное предприятие «Сплав». – №2008120083/11; заявл. 22.05.2008 г.; опубл. 27.05.2009 – 9 стр.

8. Пат. 2376533 Рос. Федерация, МПК F24F 3/14. Конструкция тепло-массообменной ячейки установки охлаждения воздуха. / Кобылин Р.А., Костин В.Е., Свиридов Е.Б., Осипов Е.Н.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Государственное научно-производственное предприятие «Сплав». – № 2008124043/061; заявл. 19.06.2008 г.; опубл. 20.12.2009 – 6 стр.

Свидетельство на программу для ЭВМ:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022660449 Рос. Федерация, Программа расчета работы агрегата косвенно-рекуперативного охлаждения воздуха. / Шацкий В.П., Гулевский В.А., Осипов Е.Н. заявитель и правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU). - № 2022660032; заявл. 03.06.2022 г.; опубл. 22.06.2022 г. – 1 стр.

Монографии:

10. Косвенно-испарительная система охлаждения воздуха. Материалы, конструкция, технология применения: монография / Н.А. Макаровец, Р.А. Кобылин, Е.Б. Свиридов, В.Е. Костин, Е.Н. Осипов. - Тула: Гриф и К., 2011. – 256 с. – Текст: непосредственный.

11. Проблема охлаждения воздуха в свете современных климатических и экологических вызовов (новое поколение охладителей воздуха косвенно-испарительного типа): монография / В.А. Анохин, Е.Н. Осипов. - Тула: Гриф и К, 2011. – 156 с. – Текст: непосредственный.

Прочие публикации:

12. Анохин В.В. Охладитель воздуха для машиниста поезда метро / В.В. Анохин, Е.Н. Осипов, Т.А. Лазарева // Интеграл. – 2010. – № 2. – С. 40-41.

13. Гулевский В.А. Системы охлаждения трансформаторных подстанций метрополитена / В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий В.П. // Материалы национальной научно-практической конференции «Теория и практика инновационных технологий в АПК». – Воронеж. – 19–21 апреля 2022 года. – С. 71-76.

14. Гулевский В.А. Моделирование режимов работы рекуперативных водоиспарительных охладителей / В.П. Шацкий, В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2016. – № 4 (32). – С. 88-92.

15. Гулевский, В.А. Водоиспарительное охлаждение герметичных объектов / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий // В сборнике Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 339-344.

16. Гулевский, В.А. Расчетная формула определения температуры в водоиспарительном охладителе / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий В.П., Е.Н. Осипов // В сборнике: Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж. – 2020. – С. 350-355.

17. Осипов Е.Н. Энергоэффективные охладители воздуха косвенно-испарительного принципа действия / Н.Г. Спирина, Е.Н. Осипов, Белоглазов В.А., Гулевский В.А. // В сборнике: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж. – 2019. – С. 261-265.

18. Осипов Е.Н. О нагревании и охлаждении подземного помещения / В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий // В сборнике: Наука, образование и инновации в современном мире (НОИ-2019). Материалы Национальной научной конференции Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I. – 2019. – С. 110-114.

19. Осипов Е.Н. Сравнение эффективности работы косвенного и рекуперативного охладителей воздуха / В.А. Белоглазов, Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий // В сборнике: Наука, образование и инновации в современном мире (НОИ-2019). Материалы Национальной научной конференции Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I. – 2019. – С. 63-67.

20. Осипов Е.Н. Сравнение эффективности работы рекуперативного и прямоточного косвенного охладителей / В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий // В сборнике: Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 20-25.

21. Осипов Е.Н. Нестационарное одномерное температурное поле в полугораниченной среде с граничным условием третьего рода / М.Б. Цудиков, Е.Н. Осипов, Е.В. Бурмистрова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 9. – С. 571-575.

22. Осипов Е.Н. Моделирование физических процессов в косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителях / Е.Н. Осипов // В сборнике: Наука и образование в современных условиях. материалы международной научной конференции. ФГБОУ ВО "Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I". – 2016. – С. 117-124.

23. Федулова Л.И. Об определении расхода воздуха в водоиспарительных охладителях / В.П. Шацкий, Л.И. Федулова, Е.Н. Осипов // Материалы

XII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий». – Белгород. – 2016. – С. 130-134.

24. Шацкий В.П. О реализации математической модели тепло-массообмена в косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителях / Е.Н. Осипов, В.П. Шацкий, Н.Г. Спирина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. Т.3. №8-4 (19-4). – С. 205-208.

25. Шацкий В.П. Пластинчатые охладители воздуха водоиспарительного принципа действия / В.П. Шацкий, В.А. Гулевский, Е.Н. Осипов // Птицеводство. – 2013. – № 12. – С. 35-37.

26. Шацкий В.П. Реализация модели тепло-массообменных процессов в косвенных водоиспарительных охладителях / В.П. Шацкий, Е.Н. Осипов, Л.И. Федулова // Современные тенденции развития науки и технологий. Периодический научный сборник по материалам X Международной научно-практической конференции. – г. Белгород. – 31 января 2016 г. – №1. – С.73-76.

ОСИПОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ
ВЕНТИЛЯЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПОДСТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.04.2023 г. Формат 60x80¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ № 24343.

Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.