

Разработка конструкции и эксперимен- тальные исследования электродного пароувлажнителя

Рецензия эксперта на статью получена
17.12.2024 [The expert review of the article
was received on December 17, 2024]

Увлажнение воздуха широко применяется в системах кондиционирования воздуха для поддержания требуемых параметров микроклимата в общественных зданиях и на промышленных предприятиях. Изменение влагосодержания возможно при контакте приточного воздуха с водой, смоченной поверхностью и насыщенным паром. Увлажнение воздуха необходимо для реализации технологических процессов, хранения ценностей и т.д. Параметры микроклимата производственного помещения влияют на качество производимой продукции, например, в микроэлектронике. Необходимость увлажнения воздуха в так называемых «чистых производственных помещениях» (ЧПП) электронной промышленности связана с тем, что при низкой влажности воздуха происходит накопление электростатического заряда, который может повредить электронные части или оборудование. Снятие заряда происходит при относительной влажности воздуха выше 60 %.

В настоящее время на рынке климатического оборудования России наблюдается нехватка изотермических увлажнителей на электродном нагреве, работающих в широком диапазоне паропроизводительности. Разработка конструкции нагревателя пароувлажнителя электродного типа является актуальной задачей, которая реализуется в рамках импортозамещения западного оборудования. На кафедре тепломассообменных процессов и установок (ТМПУ) Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») в 2022 году уже проводились экспериментальные исследования отечественных пароувлажнителей ORVO [1]. Выработка пара в таких аппаратах осуществлялся с помощью трубчатых электронагревателей (ТЭНов).

После успешных испытаний и внесения изменений в конструкцию данные пароувлажнители были запущены в серийное производство индустриальным партнёром. Однако потребитель привык работать с пароувлажнителями электродного типа, поэтому работы по разработке конструкции пароувлажнителя электродного типа были продолжены.

На рынке климатического оборудования России наблюдается нехватка изотермических увлажнителей на электродном нагреве, работающих в широком диапазоне паропроизводительности. Поэтому разработка конструкции нагревателя пароувлажнителя электродного типа является актуальной задачей

Увлажнение воздуха в холодный период года

Проектирование и подбор оборудования систем кондиционирования ЧПП проводится на основании расчётных параметров наружного воздуха [2].

Наружный воздух в холодный период года характеризуется низким влагосодержанием, которое не меняется при использовании установки приточной вентиляции. Для изменения влагосодержания необходимо использовать секцию увлажнения. Увлажнить воздух можно с помощью непосредственного контакта приточного воздуха с водой, то есть реализовать процесс адиабатического увлажнения воздуха. Установки с адиабатическим увлажнением воздуха являются наиболее экономичными, однако использование их в ЧПП невозможно.

УДК 628.84. Научная специальность: 2.1.3.

Разработка конструкции и экспериментальные исследования электродного пароувлажнителя

М. С. Францышин, генеральный директор ООО «Орво»; **М. В. Горелов**, к.т.н., доцент, кафедра тепломассообменных процессов и установок (ТМПУ), Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); **Г. Р. Симанков**, магистр, кафедра ТМПУ, НИУ «МЭИ»; **Н. В. Авдокунин**, ведущий инженер, кафедра ТМПУ, НИУ «МЭИ»; **Е. М. Горячева**, старший преподаватель, кафедра ТМПУ, НИУ «МЭИ»

Работа посвящена разработке основных элементов пароувлажнителя системы кондиционирования воздуха: группы электродов и парового цилиндра. По результатам анализа литературы и вывода формулы для определения геометрического коэффициента электрода была определена теоретическая паропроизводительность аппарата. На основании сконструированных элементов был произведён пароувлажнитель, который был испытан в лабораторных условиях. Полученные результаты эксперимента были сопоставлены с теоретическим, что позволило внести корректировки в формулу определения геометрического коэффициента электрода.

Ключевые слова: системы кондиционирования, пароувлажнение приточного воздуха, изотермическое увлажнение, парогенератор электродного типа, паровой цилиндр, электрод.

UDC 628.84. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Design development and experimental studies of an electrode steam humidifier

M. S. Frantsyshin, General Director of "Orvo", LLC; **M. V. Gorelov**, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations (TMPU), National Research University "MEI" (NRU "MEI"); **G. R. Simankov**, Master, the Department of TMPU, NRU "MEI"; **N. V. Avdokunin**, Senior Engineer, Department of TMPU, NRU "MEI"; **E. M. Goryacheva**, senior lecturer, the Department of TMPU, NRU "MEI"

The work is devoted to the development of the main elements of the steam humidifier of the air conditioning system: a group of electrodes and a steam cylinder. Based on the results of the analysis of the literature and the derivation of the formula for determining the geometric coefficient of the electrode, the theoretical steam capacity of the device was determined. Based on the designed elements, a steam humidifier was produced, which was tested in laboratory conditions. The obtained experimental results were compared with the theoretical one, which made it possible to make adjustments to the formula for determining the geometric coefficient of the electrode.

Keywords: air conditioning systems, steam humidification of supply air, isothermal humidification, electrode-type steam generator, steam cylinder, electrode.

Попавшие в помещение капли или элементы содового увлажнителя (при неудовлетворительном обслуживании) способны при контакте с электронной продукцией вызвать повреждения и даже привести к короткому замыканию. Кроме того, для увлажнения воздуха должна применяться только полностью обессоленная вода, поскольку примеси кальция и магния в воде могут повредить электронные компоненты. Также системы увлажнения на рециркуляционной воде опасны с точки зрения образования болезнетворных бактерий [3]. Поэтому единственным, по сути, вариантом увлажнения воздуха в ЧПП является увлажнение водяным паром. Такой процесс ещё называется изотермическим увлажнением воздуха, так как луч процесса идёт с небольшим отклонением вверх от изотермы на $h-d$ -диаграмме.

Наибольшее распространение получил аппарат электродного нагрева проводников второго рода. Материал, находясь между электродами, нагревается за счёт протекания в нём электрического тока. По сути, нагреваемое вещество является средой, в которой электрическая энергия превращается в тепловую.

При рассмотрении пароувлажнителей в качестве нагреваемого тела используется водопроводная вода.

Такой способ преобразования энергии имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами нагрева тел. Электродный нагрев представляет собой наиболее простой и экономичный способ. При использовании такого устройства не требуются ни трансформаторы, ни специальные нагреватели из дорогостоящих сплавов. Важной особенностью является то, что температура поверхности электрода такая же, как и у воды в паровом цилиндре. Это заметно снижает скорость образования накипи на токоподводящих элементах. Также такой нагрев характе-



Рис. 1. Разработанная группа электродов пароувлажнителя

ризуется быстрым выходом на рабочий режим и высокой скоростью регулирования нагрузки.

Целью, которую перед собой ставили авторы, заключалась в разработке нагревателя пароувлажнителя электродного типа и парового цилиндра на основе доступных в литературе образцов и экспериментальное определение паропроизводительности полученного увлажнителя.

Расчёт производительности пароувлажнителя

Химически чистая вода практически не проводит электрический ток. Её проводимость обусловлена наличием растворённых кислот, щелочей и солей, которые диссоциируют в воде на ионы. Электропроводность воды также зависит от температуры — с её увеличением степень диссоциации молекул солей на ионы и их подвижность возрастает. Это приводит к снижению сопротивления воды до мо-

мента начала активного парообразования. После наступления парообразования проводимость воды сильно зависит от концентрации солей и щелочей. При работе в режиме отбора пара нарастание солей происходит так быстро, что требует частой продувки. Перед продувкой солесодержание достигает 2–3 г/кг.

В процессе нагрева происходят сложные электрохимические реакции, результатом которых может стать разделение воды на водород и кислород. Во избежание данного явления ограничивают плотность тока до допустимого значения. Недопустимо использовать электроды из алюминия и оцинкованной стали. Лучшими материалами для электродов являются титан, графит и нержавеющая сталь. Для технологических нужд выбирают чёрную сталь, а для нагрева воды, употребляемой в пищу, используют титан. Для проектирования электродной группы настоящего пароувлажнителя была выбрана нержавеющая сталь.

Размеры нагревателя, необходимые для достижения определённого значения сопротивления, могут быть рассчитаны аналитически при наличии известных зависимостей, описывающих электрическое поле между электродами. Обычно электрическое поле в области нагрева является сложным и многомерным. Аналитическое описание полей в более простой форме возможно только в некоторых случаях [4], когда можно заменить реальные многомерные поля двумерными плоскопараллельными полями без значительной погрешности.

В качестве типа электродной системы для разрабатываемого электродного пароувлажнителя была выбрана система из трёх электродов, изогнутых под 120° (рис. 1). Данное расположение электродов позволяет более эффективно использовать паровое пространство котла. Также такая электродная группа используется передовым производителем электродных котлов — компанией HYGROMATIK [5]. Единичный электрод представляет собой пластину из нержавеющей стали, изогнутую под углом 120° , которая условно разделена на два участка: прямой участок и конечный участок с усечением (рис. 1).

Основной характеристикой пароувлажнителя независимо от конструкции является определение паропроизводительности, поэтому первая задача, которая была решена в рамках исследований, — это определение расхода пара в зависимости от геометрических характеристик парового цилиндра и электродной группы. Для этого были использованы подходы, отражённые в [4, 6].



Далее будут представлены основные зависимости для определения паропроизводительности. Расход пара [кг/ч]:

$$G_{\text{теор1}} = \frac{\left(3 \frac{U_{\Phi}^2}{R_{\Phi 1}} + 3 \frac{U_{\Phi}^2}{R_{\Phi 2}}\right) \eta}{r + c_p (100 - t_{\text{вх}})}, \quad (1)$$

где U_{Φ} — межфазное напряжение, В; R_{Φ} — межфазное сопротивление, Ом; η — КПД пароувлажнителя; c_p — теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C); r — теплота парообразования при атмосферном давлении, кДж/кг; $t_{\text{вх}}$ — температура подаваемой воды в пароувлажнитель, °C.

Межфазное сопротивление R_{Φ} [Ом] определялось по формуле (2) с учётом геометрического коэффициента K_g :

$$R_p = \frac{\rho_{\text{см}}}{h} K_g, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{см}}$ — удельное сопротивление пароводяной смеси, Ом·см; K_g — межфазное сопротивление; h — КПД пароувлажнителя; c_p — теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C); r — теплота парообразования при атмосферном давлении, кДж/кг; $t_{\text{вх}}$ — температура подаваемой воды в пароувлажнитель, °C.

Геометрический коэффициент K_g зависит от взаимного расположения электродов и их формы. В спроектированном парогенераторе использованы три электрода с изменяемой формой. Коэффициент K_{g1} угловой части электродов определялся по методике, приведённой в [5]:

$$K_{g1} = \frac{1}{\frac{b}{2l} + \frac{1}{2 \tan(60^\circ)} + 0,7}, \quad (3)$$

где b — ширина одного крыла электрода, см; l — расстояние между электродами, см; выражение $1/[2 \tan(60^\circ)]$ обеспечивает учёт краевого эффекта в одном межэлектродном промежутке; 0,7 — учёт прохождения тока в центральной зоне.

Для определения расстояния между электродами руководствуются допустимой напряжённостью поля, которая принималась $E_{\text{доп}} = 125$ В/см:

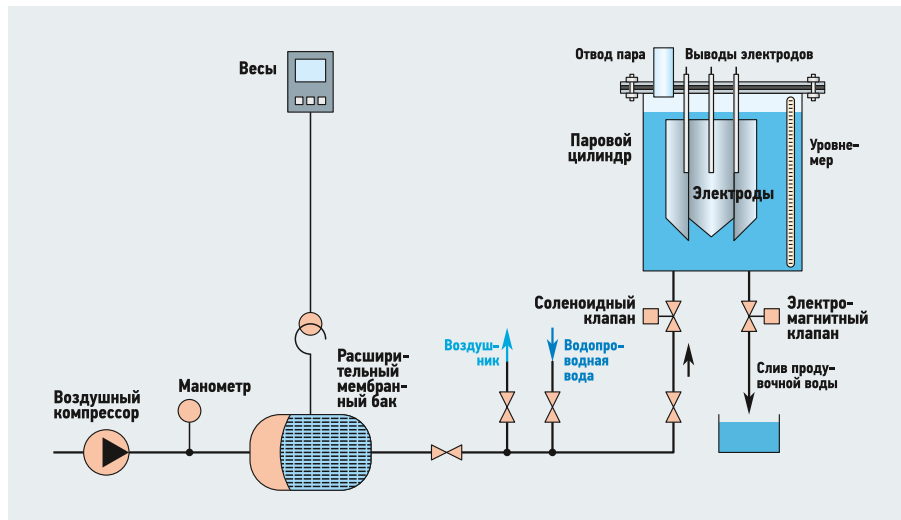
$$l = \frac{U_{\Phi}}{E_{\text{доп}}}. \quad (4)$$

Геометрический коэффициент K_{g2} прямоугольной части электродов:

$$K_{g2} = \frac{1}{\frac{b}{l} + \frac{1}{2 \tan(60^\circ)} + 0,7}, \quad (5)$$

Сопротивление воды $\rho_{\text{в}}$ [Ом·см] при температуре t [°C] определялось по формуле, измеренное значение проводимости воды $\rho_{20} = 4950$ Ом·см:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{\rho_{20}}{1 + 0,025(t - 20)}. \quad (6)$$



■ Рис. 2. Экспериментальный стенд для испытания пароувлажнителя

Удельное сопротивление пароводяной смеси $\rho_{\text{см}}$ [Ом·см] определялось с учётом поправок (коэффициенты сопротивления $\beta_1 = 1,2$, $\beta_2 = 1,3$).

Теоретический расход, определённый по формуле (1), составил 11 кг/ч. Данный полученный расход соответствует режиму, когда электроды полностью погружены в воду.

Экспериментальные исследования пароувлажнителя с разработанной группой электродов

Разработанная группа электродов и паровой цилиндр были интегрированы в корпус парогенератора ORVO с установленной автоматикой для проведения экспериментальных исследований для определения реального значения паропроизводительности аппарата.

Для проведения экспериментальных исследований и получения корректных результатов был создан экспериментальный стенд, схематическое изображение которого представлено на рис. 2.

Процесс работы пароувлажнителя условно состоял из двух периодов: прогрева и стационарных режимов. Для выхода воздухоувлажнителя подавалось напряжение и открывался соленоидный клапан для подачи некоторого объёма воды в паровой цилиндр. Затем через некоторое время в аппарат заливалось ещё столько же воды, после каждой подачи вода нагревалась электродами, но не испарялась.

Процесс работы пароувлажнителя условно состоял из двух периодов: прогрева и стационарных режимов. Для выхода воздухоувлажнителя подавалось напряжение и открывался соленоидный клапан для подачи воды в паровой цилиндр

Электроды работали непрерывно во время всего эксперимента. Время залива и объём залитой воды зависит от установленной паропроизводительности. Стационарный режим наступал при неизменном уровне воды в паровом цилиндре и начале процесса испарения содержимого парового цилиндра, который контролировался визуально. Уровень воды в паровом цилиндре определялся уровнем поплавкового типа. Спустя час после работы установки открывался электромагнитный клапан и проводилась продувка агрегата. Спускался весь объём воды, содержащейся в цилиндре. Цикл работы агрегата был завершён и начинался заново.

Для измерения параметров работы пароувлажнителя были использованы дополнительные приборы: токоизмерительные клещи duwi M266, трёхфазный счётчик «Меркурий 234», измеритель жёсткости воды TDS&EC. Данные измерительные приборы были калиброваны в условиях лаборатории.

В эксперименте измерялись следующие величины: паропроизводительность (масса потреблённой воды), электрическая мощность аппарата, электропроводность продувочной воды, уровень воды в цилиндре, фазный ток.

При измерении расхода воды изначально использовались тахометрические счётчики, но по причине низкого мгновенного потребления воды парогенератором по запрограммированному алгоритму от использования таких приборов отказались. Для измерения расхода воды или паропроизводительности было принято решение использовать весовой метод. Мембранный расширительный бак заполнялся водой с контролем внутреннего давления, внутри бака в любой момент эксперимента давление поддерживалось от 1 до 2 атм. Этого было достаточно для подпитки парового цилиндра.

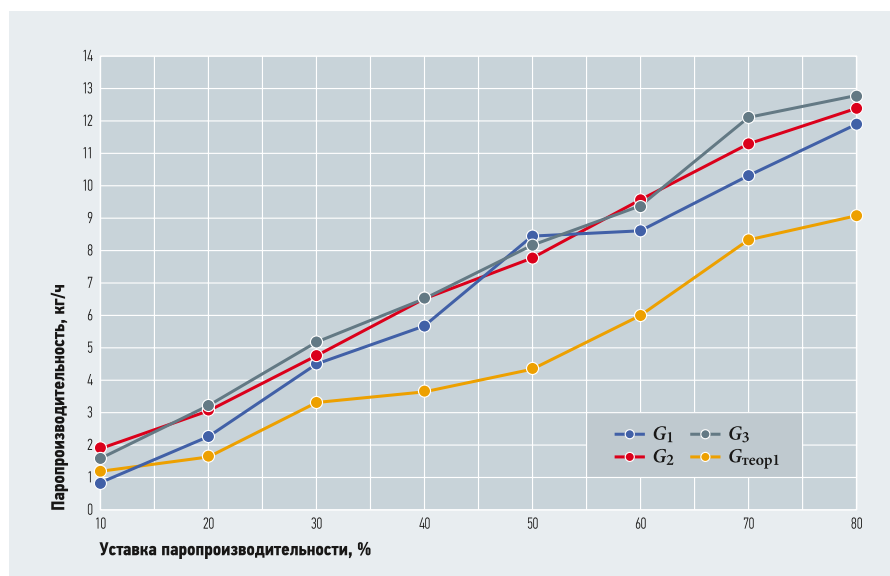


Рис. 3. Изменение паропроизводительности в зависимости от нагрузки парогенератора [G_1 — расход пара, определённый весовым методом, кг/ч; G_2 — расход пара, определённый на основании потребляемой мощности, кг/ч; G_3 — расход пара, определённый на основании количество затраченной электрической энергии, кг/ч; $G_{теор1}$ — расход пара, рассчитанный по формуле (1), кг/ч]

При выходе на рабочий режим аппарат потреблял воду напрямую из водопровода, мембранный бак был отключён от питающего парового цилиндра трубопровода. На стационарном режиме паровой цилиндр вручную переключался к расширительному баку. Количество воды, потреблённой установкой за период эксперимента, который обычно длился около 40–50 минут, определялось показанием весов. Взвешивание мембранного бака проводилось до подключения его к нагнетательному трубопроводу для подпитки парового цилиндра и после отключения аппарата (завершение эксперимента).

Перед проведением каждого эксперимента заранее устанавливалась мощность аппарата, измеряемая в процентах от максимальной. Было проведено десять

испытаний с шагом паропроизводительности в 10 %. Установлено, что при уставке паропроизводительности в 90 и 100 % парогенератор работал нестабильно. Это означает, что уставка в 80 % является максимальной, для работы аппарата на более высокой мощности требуется изменение габаритных размеров парового цилиндра. Все полученные величины относятся к стационарному режиму работы. Результаты эксперимента представлены в виде графиков, которые приведены на рис. 3.

Проанализировав данные рис. 3, был сделан вывод о том, что теоретически рассчитанный расход $G_{теор1}$ несколько меньше расхода, полученного на основании эксперимента. С целью уточнения значения $G_{теор1}$ были подобраны коэффициенты β для прямоугольной и угловой частей

электродов. Новые значения $G_{теор1}$ определены при значениях коэффициентов $\beta_1 = 1,05$, $\beta_2 = 1,1$. Скорректированные значения теоретической паропроизводительности представлены на рис. 4.

Заключение

При проведении данной научно-исследовательской работы был выполнен анализ литературы о проектировании и расчёте электродных водонагревателей, на основании чего разработаны нагревательные электроды и паровой цилиндр, которые были произведены ООО «Орво».

Паровой цилиндр с группой разработанных электродов был смонтирован в пароувлажнителе ORVO, который был испытан в лаборатории ТМПУ НИУ «МЭИ». Для получения экспериментальных данных был разработан и смонтирован экспериментальный стенд, который позволил определить расход пара на основании измерения количества потреблённой воды из источника водоснабжения (мембранный расширительный бак), подведённой мощности системы электроснабжения и потреблённого количества электрической энергии за период испытания. Полученные результаты были сравнены с теоретическими значениями, полученные на основании формулы, которая в конечном варианте была уточнена.

Испытания проводились на всех доступных режимах работы пароувлажнителя, устойчивыми режимами оказался диапазон 10–80 % от номинальной электрической мощности. Паропроизводительность пароувлажнителя была подтверждена расчётами на основании потреблённой мощности и значений фазных токов. Разработанный типоразмер электродного пароувлажнителя позволяет генерировать пар в диапазоне расходов от 0,9 до 11,9 кг/ч, а расчётная формула позволяет разработать линейку аппаратов с паропроизводительностью до 130 кг/ч.

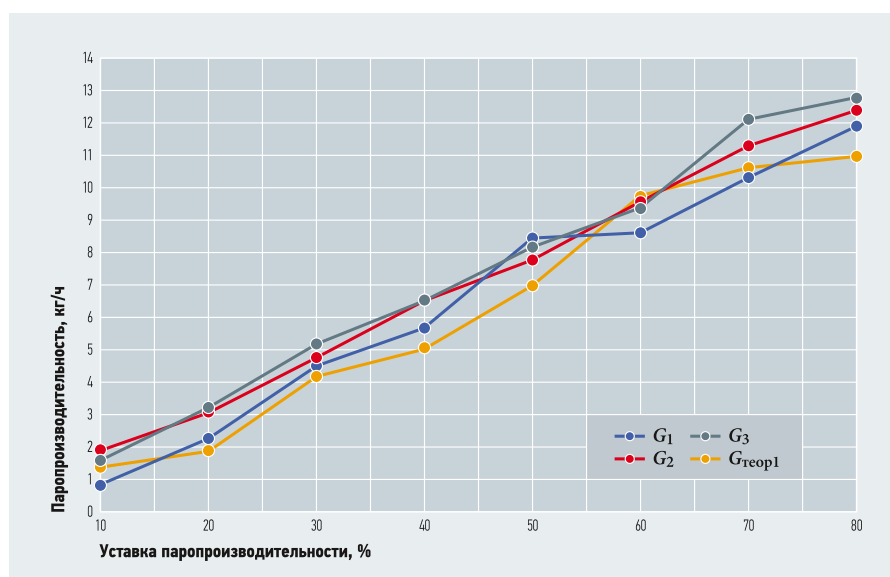


Рис. 4. Изменение паропроизводительности в зависимости от нагрузки парогенератора [G_1 — расход пара, определённый весовым методом, кг/ч; G_2 — расход пара, определённый на основании потребляемой мощности, кг/ч; G_3 — расход пара, определённый на основании количество затраченной электрической энергии, кг/ч; $G_{теор1}$ — расход пара, рассчитанный по формуле (1) с учётом скорректированных коэффициентов β , кг/ч]

1. Учёные МЭИ работают над созданием отечественных парогенераторов [Электр. текст]. Минобрнауки России от 04.05.2022. Режим доступа: minobrnauki.gov.ru. Дата обращ.: 12.11.2024.
2. СП 131.13330.2020. Строительная климатология [СНиП 23-01-99*] (с Изм. №1, 2) / Дата введ.: 25.06.2021.
3. Ефремов М.Н. Legionella: меры предосторожности при проектировании и эксплуатации инженерных систем зданий // АВОК, 2014. №3. С. 40–44.
4. Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А. Электрический нагрев и электротехнология: учеб. пособие. — М.: Колос, 1975. 384 с.
5. HygroMatik. Системные решения для увлажнения воздуха [Электр. текст]. HygroMatik GmbH. Режим доступа: hygromatik.com/ru. Дата обращ.: 12.11.2024.
6. Каган Н.Б., Кауфман В.Г., Пронько М.Г., Яневский Г.Д., Электротермическое оборудование для сельскохозяйственного производства. — М.: Энергия, 1980. 192 с.

References — see page 80.

Design development and experimental studies of an electrode steam humidifier.
Pp. 50–53.

Mikhail S. Frantsyshin, General Director of “Orvo”, LLC; **Mikhail V. Gorelov**, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations (TMPU), National Research University “MEI” (NRU “MEI”); **Georgy R. Simankov**, Master, the Department of TMPU, NRU “MEI”; **Nikita V. Avdokunin**, Senior Engineer, Department of TMPU, NRU “MEI”; **Elena M. Goryacheva**, senior lecturer, the Department of TMPU, NRU “MEI”

1. *Uchenye MJeI rabotajut nad sozdaniem otechestvennykh parogeneratorov* [Scientists of the Moscow Power Engineering Institute are working on the creation of domestic steam generators]. *Ministry of Education and Science of the Russia Federation of May 4, 2022*. Web-source: minobrnauki.gov.ru. Access date: November 12, 2024. [In Russian]
2. *SP 131.13330.2020* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 131.13330.2020]. *Stroitel'naja klimatologija [SNIIP 23-01-99*] (s Izm. №1, 2)* [Construction climatology (Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-01-99*) (with Amendments No. 1, 2)]. Date of impl.: June 25, 2021. [In Russian]
3. M.N. Efremov. *Legionella: mery predostorozhnosti pri proektirovanii i jekspluatatsii inzhenernykh sistem zdaniy* [Legionella: precautions for the design and operation of engineering systems of buildings]. *AVOK* [Journal of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)]. 2014. No. 3. Pp. 40–44. [In Russian]
4. I.F. Kudryavtsev, V.A. Karasenko. *Jelektricheskij nagrev i jelectrotekhnologija: ucheb. posobie* [Electric heating and electrical technology: A tutorial]. Moscow. Kolos [“A filled ear” Publishers]. 1975. 384 p. [In Russian]
5. HygroMatik. We humidify the air. HygroMatik GmbH. Web-source: hygromatik.com/en. Access date: November 12, 2024.
6. N.B. Kagan, V.G. Kaufman, M.G. Pronko, G.D. Yanevsky. *Jelektrotermicheskoe oborudovanie dlja sel'skokhozjajstvennogo proizvodstva* [Electrothermal equipment for agricultural production]. Moscow. *Jenergija* [“Energy” Magazine]. 1980. 192 p. [In Russian]