

Электродные водонагреватели и парогенераторы — физика работы и управление

Карелин А. Н., канд. техн. наук

Филиал ГОУ ВПО СПбГМУ — Севмашвуз, Северодвинск

Рассмотрены преимущества и недостатки электродных водоподогревателей и парогенераторов при эксплуатации, электротермические режимы их работы. Описаны схемы автоматизации систем управления водонагревателями.

Ключевые слова: электронагревательные установки, теплоснабжение, управление, автоматизация, эффективность.

Электронагревательные установки широко используют в качестве универсальных источников тепловой энергии в сельскохозяйственном производстве при обработке материалов, регулировании параметров микроклимата, искусственного холода. Электродкотлы применяются для генерации пара в относительно небольших количествах в пищевой промышленности и для бытовых нужд. Они отличаются удобством и простотой эксплуатации, гигиеничностью и экологичностью, дешевле, чем ТЭН, но дороже, чем котлы, работающие на ископаемом топливе.

Парогенераторы используют для очистки и быстрой дезинфекции поверхностей, очистки объемов со сложной геометрией (например, подкапотного пространства автомобиля). Температурные параметры пара (95 – 120 °С), а также давление и влажность обеспечивают возможность проведения дезинфекции без синтетических моющих средств и позволяют в сотни раз снизить количество потребляемой воды. Для очистки текстиля применяют сухой пар, для удаления грязи — увлажненный. Известно, что из 1 л воды получается 1673 л пара.

Электрические электродные парогенераторы предназначены для выработки насыщенного водяного пара (от 10 до 250 кг/ч избыточным давлением от 0,01 МПа до 0,55 МПа и температурой от 105 до 160 °С) в производстве строительных материалов, пищевой промышленности, сельском хозяйстве, легкой, целлюлозно-бумажной, химической, фармацевтической, косметической, металлургической, табачной промышленности, медицине, топливном хозяйстве, на автозаправочных станциях. Так, в топливном хозяйстве они используются для разогрева горючесмазочных материалов, пропарке емкостей, цистерн и трубопроводов.

Водонагреватели электродного типа применяют для прямого нагрева жидких теплоносителей до температуры ниже температуры

точки кипения в системах отопления открытого типа с целью обогрева индивидуальных домов, дач, коттеджей, магазинов, гаражей, хозяйственных блоков, складских помещений, нагрева воды для хозяйственных нужд. Наиболее простое и оригинальное конструктивное решение в проточных нагревателях воды — применение нержавеющей пластинок-электродов, закрепленных на диэлектрической основе.

Электротермические установки используют в животноводческих и птицеводческих помещениях, сушильных камерах, водонагревательных и аккумулирующих устройствах, индукционных и дуговых печах, электрических печах сопротивления, электрокалориферах, установках диэлектрического нагрева, ультразвуковых установках и др.

На основе технического анализа конструктивные и эксплуатационные параметры, определяющие долговечность, надежность и качество электродных котлов или проточных нагревателей, можно подразделить по критериям:

плотности рабочих токов, протекающих через электроды;

надежности пускорегулирующей аппаратуры электротехнических устройств;

точности и качества применяемых температурных датчиков;

конструктивных особенностей, обеспечивающих удобство монтажа и обслуживания.

Электродные водонагреватели характеризуются высокой степенью надежности. Нагрев воды происходит при непосредственном протекании тока через воду. Отсутствует проблема перегорания нагревательного элемента — “сухого хода” (попадания воздуха в зону нагрева). Режим “сухого хода” в системе наблюдается, если из системы отопления протекает теплоноситель и электродный котел отключается из-за размыкания цепи (предотвращается аварийная ситуация).

По мере нагрева воды электропроводность плавно варьируется и обеспечивается “мягкая” пусковая характеристика. Уникальными особенностями электродных нагревателей, отличающими их от теплогенераторов других типов, являются высокая компактность и защита от перелива. Для них характерны оптимальные технико-экономические показатели, низкая стоимость установочного киловатт-часа, относительно небольшие затраты на изготовление по сравнению с электронагревателями аналогичной мощности. КПД электродных парогенераторов гораздо выше, чем КПД парогенераторов на органическом топливе, и достигает 98 % затраченной энергии.

В соответствии с “Правилами устройства и безопасной эксплуатации электрических котлов и электродных” ПБ-10-575-03 (утверждены постановлением Госгортехнадзора России № 89 от 11.06.2003 г.) парогенераторы объемом менее 25 л неподведомственны Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзору) [1 – 3].

Недостатки электродных водонагревателей: растворение (износ) электродов, особенно центрального (но их замена дешевле, чем замена ТЭН в нагревателях, что определяется конструкцией блока);

солевой состав воды в значительной степени определяет разброс параметров водонагревателя по номинальной мощности (солевые отложения на электродах);

невозможно применение в качестве теплоносителя незамерзающих жидкостей.

Недостатки электродных парогенераторов: необходимость в проведении регламентных работ, связанных с нарастанием проводимости (при повышении давления в котле расстояние между молекулами воды сокращается и проводимость увеличивается);

затруднительный расчет реальной производительности из-за колебаний нагрузки;

использование электродного принципа нагрева воды возможно только в замкнутых системах отопления, где нет прироста солей и проводимость теплоносителя одинакова, особенно когда применяются стойкие к коррозии материалы (металлопластиковые трубы, алюминиевые радиаторы).

Особенностью при монтаже водонагревателя, подключении к электрической сети и установке устройств защитного отключения (регистрирует ток утечки 3040 мА) является наличие тока утечки нагревателя (2040 мА). Поэтому водонагреватели подключают через автоматический выключатель. Токи утечки могут достигать 25 % номинального тока.

Безопасность работы электродного водонагревателя (ГОСТ 2757.18–89, ГОСТ 12.2.007.7–83, ГОСТ 27570.0–87) обеспечивается конструктивными требованиями (реле – регулятор давления, трансформатор тока с электронной платой управления от превышения мощности, предохранительный клапан по пару), отключением нулевого и фазного проводов через электромагнитный пускатель или электронный блок, наличием релейной или электронной защиты от обрыва нулевого провода, влагобрызгозащищенного корпуса блока управления.

Степень защиты ящика управления – IP41 по ГОСТ 14254–80. Система управления электродными водонагревателями обеспечивает функционирование по определенной циклической программе с помощью реле времени и термовыключателя.

Систему управления можно реализовать на базе микроконтроллера производства “Texas Instruments” или одноканального измерителя-регулятора ОВЕН ТРМ201 – аналога ОВЕН ТРМ1 с интерфейсом RS-485. Функциональные возможности измерителя-регулятора ОВЕН ТРМ201: универсальный вход для подключения широкого спектра датчиков температуры, давления, влажности и др.; регулирование входной величины: двухпозиционное (релейное) регулирование, аналоговое П-регулирование; цифровая фильтрация и коррекция входного сигнала, масштабирование шкалы для аналогового входа; регистрация измеренной величины при установке на выходе ЦАП 4 – 20 мА (модификация ТРМ201-Х.И); вычисление и индикация квадратного корня измеряемой величины (например, для регулирования мгновенного расхода); встроенный интерфейс RS-485 (протокол ОВЕН, Modbus ASCII/RTU*); конфигурирование на персональный компьютер (ПК) или с лицевой панели прибора.

Измеритель-регулятор применяется для измерения, регистрации или регулирования температуры теплоносителей и различных сред в холодильной технике, сушильных шкафах, печах разного назначения, пастеризаторах и ином технологическом оборудовании, а также для измерения других физических параметров (веса, давления, влажности и др.). Функциональная схема автоматизации контроля с помощью ТРМ201 приведена на рис. 1.

Для визуализации процесса контроля и регистрации данных на ПК используется SCADA-система, поставляемая в комплекте с приборами ОВЕН, и состоящая из двух компонент: Owen Process Manager и Owen Report Viewer, позволяющих фиксировать и архивировать значения температуры и времени. В

настоящее время наиболее широко применяемым законом регулирования одних параметров системы в зависимости от изменения и состояния других является пропорциональный закон (П-регулятор).

Для схемы управления нагревателем можно использовать одноканальный измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ201-Щ1.И щитового исполнения с выходом управления в виде цифроаналогового преобразователя “параметр — ток $4 \div 20$ мА”. Для управления нагрузкой через тиристорные ключи применяется промышленно изготавливаемый блок управления симисторами и тиристорами ОВЕН БУСТ [4 – 6].

В паровом котле теплота, выделяющаяся при протекании электрического тока через воду, представляющую активное сопротивление, идет на ее нагрев и испарение.

Печи сопротивления характеризуются активно-реактивной нагрузкой, поэтому устанавливаются дополнительно системы компенсации реактивной мощности (статические компенсаторы).

С целью повышения эффективности функционирования электродные водонагреватели (как и ТЭН) используют в системах отопления с циркуляционным насосом (насос, электромагнитный клапан, фильтр) с оптимальными показателями производительности при низких начальных скоростях циркуляции (для уменьшения солеотложения). Существуют специализированные разработки в системах с гравитационной циркуляцией (режим теплового насоса). Данный принцип нагрева благодаря оригинальному конструкторскому решению применяли в автономных отопительных системах обогрева различного специального назначения (подводные лодки, подземные командные пункты МО СССР). Повышенное солеобразование уменьшается вследствие обеспечения точного контроля температуры в области нагрева (с учетом инерционности).

Рассмотрение физических процессов, протекающих в нагревательных установках при использовании электронагрева переменным электрическим током, необходимо для повышения эффективности функционирования электроустановок. В основе работы котлов или проточных нагревателей используется физическое свойство воды — водопроводная вода (удельное сопротивление — $9,75 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, температура — $70 \text{ }^\circ\text{C}$) проводит переменный электрический ток (благодаря растворенным минералам) и нагревается. Вода не является проводником (превращает растворенные химические вещества в ионы). Удельное электросопротивление дистиллированной воды —



Рис. 1. Функциональная схема автоматизации управления электродным водонагревателем

$104 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (диэлектрик). Проводящая способность характеризуется химической, а не электронно-дырочной проводимостью, как у металлов или полупроводников.

Принцип работы электродного водонагревателя основан на безопасной ионизации воды (расщеплении молекул теплоносителя на положительно и отрицательно заряженные ионы, которые движутся к отрицательному и положительному электродам, выделяя энергию), колебании ионов с промышленной частотой 50 Гц без электролиза (разложения воды на кислород и водород), переносе материала и разрушении электрода.

Электролиз — весьма энергоемкий процесс по сравнению с ионообразованием. С возрастанием температуры увеличиваются степень электролитической диссоциации молекул солей воды на ионы и их подвижность. Термическая ионизация (образование положительных и отрицательных ионов, электронов из электрически нейтральных атомов и молекул) также обусловлена первоначальной затратой энергии при столкновении частиц (ионизационным потенциалом частицы), повышением температуры и скорости движения молекул. Ударная ионизация происходит за счет электронов из электродов, отрицательных ионов, термоионизации (появления электронов и ионов за счет теп-

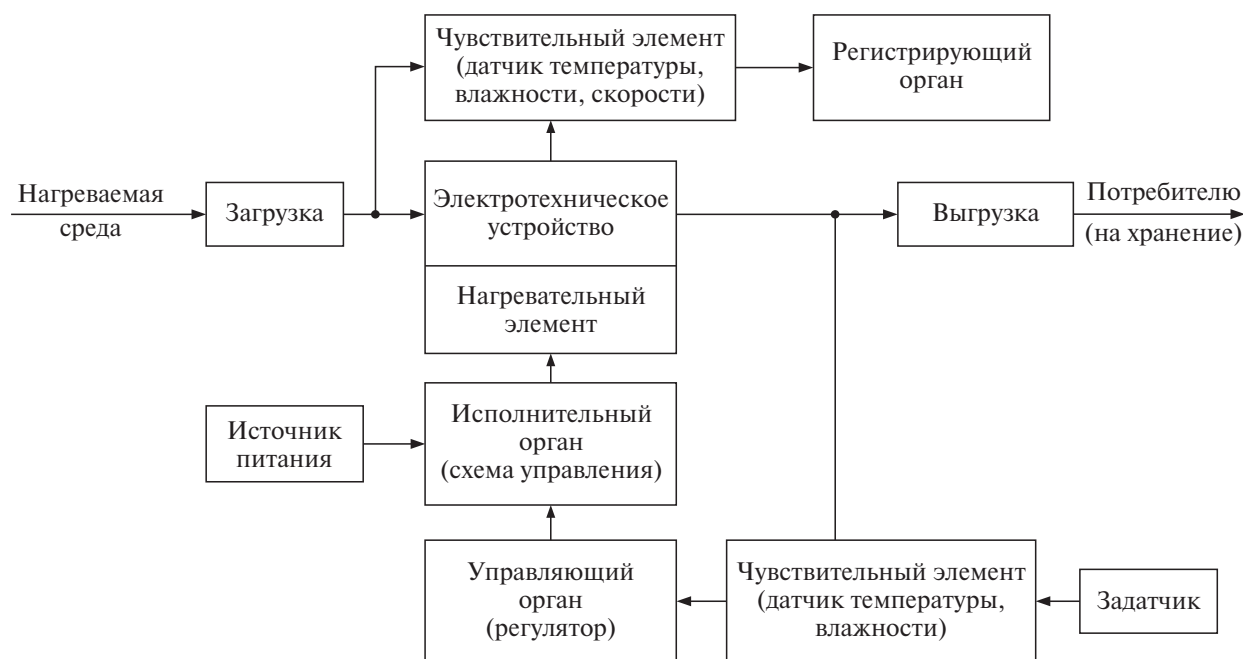


Рис. 2. Структурная схема электротермических режимов установок

ловой энергии). Электрон ускоряется в жидкости на протяжении межмолекулярного расстояния. Прямое преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется непосредственно в теплоносителе при прохождении через него электрического тока путем ионизации молекул. Температура теплоносителя и его проводимость повышаются, увеличивается электрический ток, идущий от электрода к электроду, и котел быстро выходит на номинальную мощность. За счет небольших размеров ионизационного блока происходят резкий разогрев теплоносителя и повышение его давления (до 2 кгс/см^2). Поэтому в ряде электродных котлов циркуляционные насосы не применяют. Сами электроды током практически не нагреваются. Экономия потребления энергии (от 40 до 60 %) достигается за счет быстрого действия электродных котлов. Они экономичнее ТЭН на 20 – 30 %.

Вода в электродных водонагревателях является и теплоносителем, и элементом электросети. Поэтому ее параметры характеризуются как определенной проводимостью, так и сопротивлением. Дистиллированная вода не используется из-за малой электропроводности, а, например, тосол (солевые присадки для уменьшения коррозии) — из-за большой электропроводности.

Разрабатываются электродные водонагреватели, запускаемые при замерзшем теплоносителе. При значительном риске замерзания в контуре циркуляции используется теплоноситель — вода с добавкой гликоля.

На рис. 2 показаны направления движения нагреваемого материала (среды), поступления энергии, регулирующего воздействия.

Для теплового расчета установки определяют ее тепловую мощность, тепловой КПД, конструктивные размеры, температуру отдельных элементов конструкции, параметры тепловой изоляции. На основе этих данных с учетом назначения установки, вместимости, производительности разрабатывают эскизный проект и находят основные конструктивные размеры. Форму и внутренние размеры определяют по условиям размещения нагреваемого материала, нагревательных элементов, контрольно-измерительной аппаратуры.

Целевая функция теплового КПД — минимизация удельной ограждающей поверхности, количества преобразователей электрической энергии (трансформаторов, высокочастотных устройств), а также сложности их элементной базы.

При проектировании важны выбор применяемых теплоизоляционных материалов для снижения теплопотерь, определение геометрии, многослойности, толщины, а также учет их вида, стоимости, температурных режимов, санитарно-гигиенических условий, механической прочности, электро- и теплопроводности. Основные параметры проектируемых нагревателей: число фаз и электродов, их размеры и материал, расстояние между электродами, электрическая схема соединения (“звезда”, “треугольник” и др.). Материалы электродов должны быть электрически ней-

тральными (инертными) относительно нагреваемой среды (титан, нержавеющие стали, электротехнический графит). Применение углеродистой (черной) стали приводит к образованию в воде соединений тяжелых металлов.

Парогенераторы конструктивно различаются по назначению:

при наличии у потребителя системы центрального водоснабжения — работа без насоса, плавное регулирование мощности за счет варьирования количества подаваемой воды (удельного сопротивления);

при отсутствии у потребителя системы центрального водоснабжения — работа по замкнутому циклу с возвратом отработавшего пара в виде конденсата (необходимы высокотемпературный нагнетательный насос с защитой от “сухого хода”, блок контроля и поддержания температуры конденсата подпиточной водой).

Бесшумность и быстродействие (выход на рабочий режим) парогенератора обеспечиваются простотой конструкции и технологии генерирования пара, что позволяет устанавливать его рядом с технологическим оборудованием.

Особенность электродного нагревателя заключается в том, что если электроды не экранируются, то стенки нагревателя являются элементами электродной системы. Температура поверхности кожуха электроводонагревателя не должна превышать 35 °С. Электропитание котлов малой мощности осуществляется от однофазной (220 В) или трехфазной (380 В) сети. Для эксплуатации котлов мощностью более 12 кВт используется трехфазная сеть.

Расчет мощности и тока нагревателя и параметров электродов основывается на вычислении объема V бака (объема цилиндра и сферы) и массы воды m :

$$V = V_{\text{ц}} + V_{\text{сф}} = \pi \frac{d^2}{4} l + \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{4};$$

$$m = V/\gamma,$$

где $\gamma = 990 \text{ кг/м}^3$ — плотность горячей воды.

Мощность нагревателя, кВт,

$$P = \frac{mc(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})k \cdot 0,00028}{\eta \tau},$$

где $c = 4,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}$ — теплоемкость воды; $t_{\text{н}} = 15 \text{ °С}$ — начальная температура воды; $k = 1,1$ — коэффициент запаса; $\eta = 0,75$ — КПД нагревателя; $\tau = 6 \text{ ч}$ — время нагрева воды в нагревателе от начальной до конечной $t_{\text{к}}$ температуры.

Фазный ток электродов нагревателя (соединение по схеме “звезда с нулевым проводом”)

$$I_{\text{ф}} = P/(\sqrt{3}U_{\text{с}}).$$

Фазное сопротивление

$$R_{\text{ф}} = U_{\text{ф}}/I_{\text{ф}}.$$

Площадь электродов вычисляется по формуле

$$S = \rho \frac{\lambda}{R_{\text{ф}}} = 500 \frac{2}{2,083} = 480 \text{ см}^2,$$

где λ — расстояние между электродами; $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ — удельное электросопротивление хозяйственно-питьевой воды.

Если у электродов квадратная форма, то сторона электрода $a = \sqrt{S}$.

Расчетная мощность и ток потребителя рассчитываются по коэффициенту использования установленной мощности $k_{\text{и}}$ для промышленных электроводонагревательных установок (равен 0,6):

$$P_{\text{расч}} = k_{\text{и}} P_{\text{уст}}; \quad I_{\text{расч}} = P_{\text{расч}}/(\sqrt{3}U_{\text{с}}).$$

При $\cos \varphi = 1$ расчетная мощность установки будет чисто активной.

Выводы

1. Электродные водоподогреватели (водонагреватели) и парогенераторы представляют собой сложные инженерно-технические установки, которые характеризуются наличием специфических физико-химических режимов, что необходимо учитывать при проектировании, монтаже и эксплуатации.

2. Управление данными объектами возможно с помощью современной вычислительной техники.

Список литературы

1. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. — М.: Энергосервис, 2003.
2. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. — М.: Энергосервис, 2003.
3. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации электрических котлов и электродных ПБ 10-575-03. — М.: ПИО ОБТ, 2003.
4. **Тиристоры**: Справочник. — М.: Радио и связь, 1990.
5. **Блок** управления тиристорами и симисторами БУСТ. ТУ 4389-002-46526536-02. Руководство по эксплуатации.
6. **Измеритель-регулятор** одноканальный ТРМ201. ТУ 4211011465265362004. Руководство по эксплуатации.