УДК 631.3:621.3.036.6
DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-2-155-162

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХКОНТУРНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ

И. Т. Алдибеков, Н. С. Тойшиев, А. Б. Болат, А. Е. Беймуратова

В статье рассматривается задача расширения функциональных возможностей электродных водонагревателей. Приведены описание конструкции и анализ режимов работы двухконтурного водонагревателя со встроенными теплообменниками, приспособленного для подключения двух теплоиспользующих установок при необходимости одновременного и раздельного нагрева технологических вод для систем горячего водоснабжения и отопления. Рассмотрены различные схемы подключения системы отопления к водонагревателю, в зависимости от которых может иметь место прямой электродный или косвенный нагрев теплоносителя. Обоснована возможность ступенчатого регулирования мощности водонагревателя путем переключения схемы подключения системы отопления и плавного саморегулирования, основанного на изменении уровня котловой воды в межэлектродном пространстве в соответствии с динамикой изменения тепловой нагрузки теплоиспользующих установок. Приведена математическая модель, описывающая работу системы отопления при прямом электродном нагреве теплоносителя и позволяющая оптимизировать конструктивные параметры основных ее элементов и водонагревателя. Предложенная двухконтурная конструкция водонагревателя обеспечивает сравнительно высокие коэффициенты его использования и загрузки, а также простоту регулирования мощности, что способствует повышению эффективности его применения в системах теплоснабжения.

Ключевые слова: горячее водоснабжение, отопление, электродные водонагреватели, электродные системы, теплообменники, регулирование мощности.

В системах децентрализованного теплоснабжения сельскохозяйственных объектов в основном используются низковольтные элементные и электродные установки (водонагреватели и парогенераторы) малой и средней мощности [1, 2].

В степных сельских районах Казахстана источниками водоснабжения являются артезианские скважины, вода в которых характеризуется сравнительно высоким солесодержанием (от 100 мг до нескольких граммов на 1 кг). Это негативно влияет на работу водогрейных установок, особенно элементных водонагревателей, и приводит к преждевременному выходу из строя ТЭНов из-за интенсивного образования накипи.

Поэтому в условиях сельского хозяйства республики широкое использование электродных водонагревателей наряду с элементными представляется целесообразным, так как по мере осаждения накипи на поверхности электродов установка продолжает надежно функционировать, но только с меньшей мощностью.

Известные электродные водонагреватели, как правило, одноконтурные и характеризуются ограниченной функциональной возможностью, заключающейся в том, что вода, нагретая электродным способом, по качеству пригодна для применения только в системе отопления [1, 2]. Невозможность получения качественной горячей воды для санитарно-гигиенических и технологических нужд непосредственно от одноконтурных водонагревателей и сравнительно низкие коэффициенты использования и загрузки, обусловленные непродолжительным временем эксплуатации в системах отопления, в конечном итоге снижает эффективность их применения в системах теплоснабжения.

В целях экономии электроэнергии и повышения срока службы пусковой аппаратуры в большинстве случаев в электродных водонагревателях применяют регуляторы мощности для приведения ее в соответствие с энергетической потребностью объекта. Преимущественное распространение получило ручное регулирование мощности за счет изменения площади активной поверхности электродов, которое достигается введением в межэлектродные пространства диэлектрических экранов или путем смещения электродов относительно друг друга. Однако наличие подвижных частей регулятора в межэлектродных пространствах негативно влияет на надежность работы [1, 3].

Значительный интерес представляют гидравлический и тиристорный способы регулирования мощности электродных водонагревателей, описанные в работах [4] и [5].

Целью данной работы является разработка двухконтурного электродного водонагревателя с регулируемой мощностью, обладающего более широкой функциональной возможностью и улучшенными технико-экономическими показателями, что отвечает актуальным задачам повышения эффективности использования в сельском хозяйстве теплогенерирующих установок, в том числе электротепловых установок.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является двухконтурный электродный водонагреватель, отличающийся от известных установок рядом конструктивных особенностей.

На рисунке 1 а показана его конструкция, а на рисунке 1 б схема его подключения к теплоиспользующим системам.

Водонагреватель имеет центральную внутреннюю и кольцевую камеры 4, 5 соответственно, разделенные друга от друга в верхней части цилиндрическим нулевым электродом-теплообменником 3 и сообщающиеся между собой через нижнюю часть корпуса 1. В верхней части внутренней камеры установлен змеевиковый теплообменник 6, вход которого соединен с расположенным в нижней центральной части камеры герметичным трубчатым нулевым электродом-теплообменником меньшего диаметра. При этом между цилиндрическим 3 и трубчатым 8 электродами размещены по окружности три дугообразных фазных электрода 7, разделенных друг от друга тремя радиально расположенными диэлектрическими перегородками 9. Эквивалентной электрической схемой соединения электродов является «двойная звезда».

Водонагреватель оборудован компенсационным бачком 22, установленным выше крышки 2 и соединенным с верхней частью кольцевой камеры 5. Корпус 1 и крышка 2 имеют несколько водоотводящих 12, 15, 16, 18, 19 и водоподводящих патрубков 13, 14. Также предусмотрены воздухоотводчики 17, контрольно-измерительные приборы 20, 21, 27, 29, 38 и щит управления 37.

Предметом исследования являются электротепловые и теплообменные процессы, происходящие в самом водонагревателе и в подключенных к нему теплоиспользующих установках.

В работе использованы общепринятые методы системного анализа, математического моделирования и вычислительного эксперимента. Математическое моделирование режимов работы водонагревателя базируется на общеизвестных законах электротехники, теплотехники, термодинамики и гидродинамики.

Результаты и обсуждения

Из рисунков 1 а и 1 б следует, что предложенная конструкция обеспечивает образование в водонагревателе двух нагревательных контуров. Первый контур подключают к системе горячего водоснабжения (ГВС), а второй – к системе отопления (СО). Поэтому водонагреватель может работать в следующих режимах:

– в режиме нагрева теплоносителя (воды) СО;

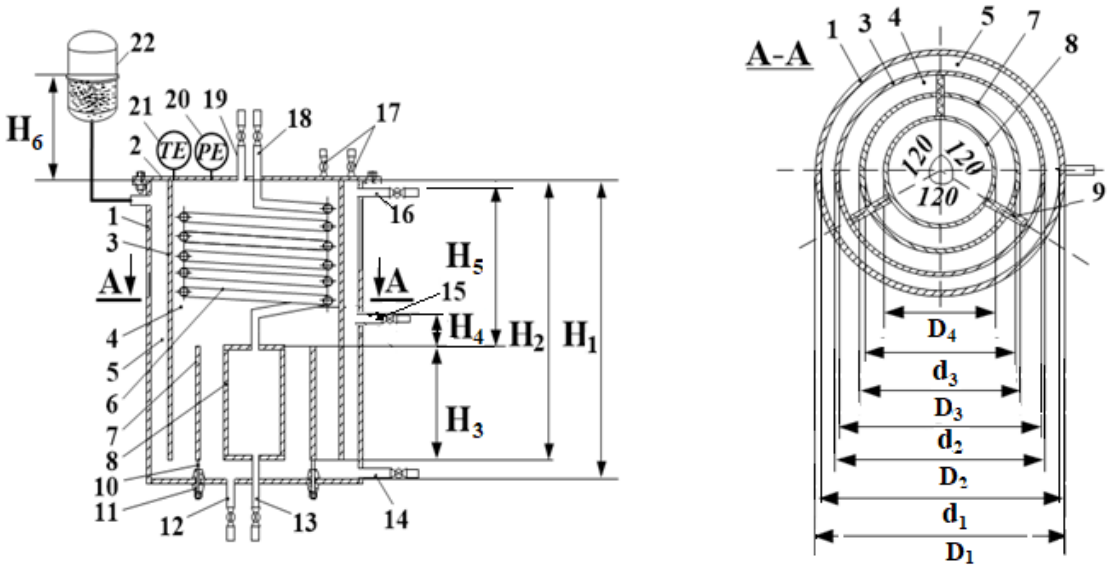
– в режиме нагрева воды в накопительном баке системы ГВС;

– в режиме одновременного нагрева вод систем ГВС и СО.

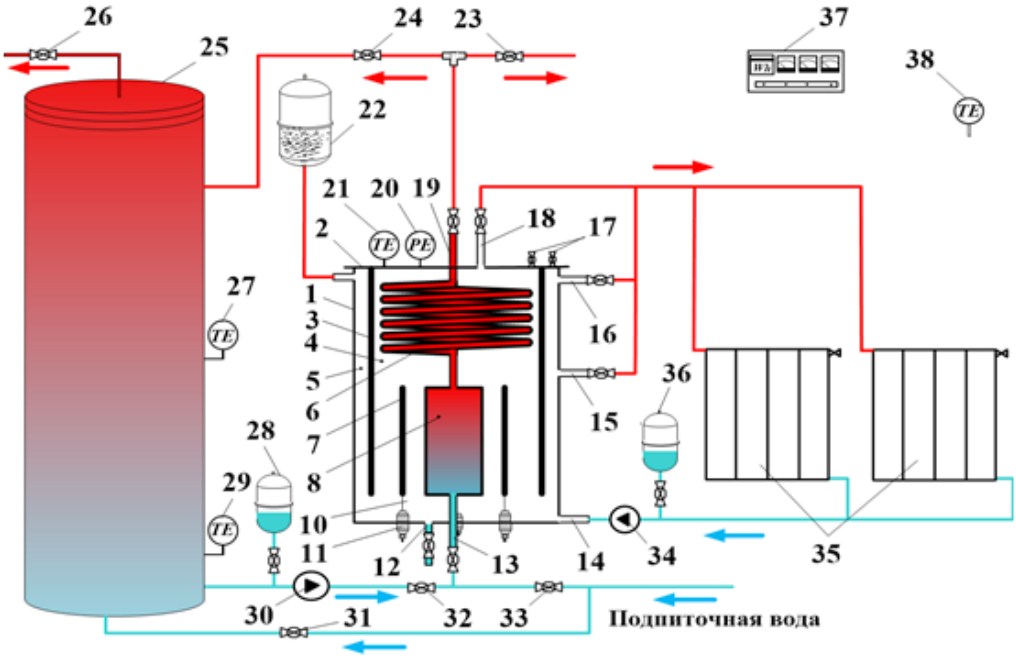
Первый нагревательный контур, предназначенный для получения качественной горячей воды для системы ГВС, включает соединенные между собой водоподводящий патрубок 13, герметичный трубчатый электрод-теплообменник 8 и змеевиковый теплообменник 6 (рис. 1 а). Данный контур может быть использован как для нагрева воды в накопительном баке 25 (вентили 24 и 32 открыты, а вентили 23 и 33 закрыты), так и для нагрева проточной водопроводной воды (вентили 24 и 32 закрыты, а вентили 23 и 33 открыты).

Второй нагревательный контур водонагревателя, к которому подключают подающий и обратный трубопроводы СО, имеет внутри корпуса два параллельных канала и три водоотводящих патрубка (рис. 1 б). В этом случае возможны три схемы подключения СО к водонагревателю.

Если подающий трубопровод СО подключают к патрубку 18 (в дальнейшем назовем первой схемой подключения) при закрытых вентилях патрубков 15 и 16, то нагреваемая вода движется по первому каналу через водоподводящий патрубок 14 с открытым вентилем, затем через межэлектродные пространства во внутренней камере 4 и водоотводящий патрубок 18 с открытым вентилем. При такой схеме подключения СО нагреваемая вода в межэлектродных пространствах подвергается прямому нагреву,



а



б

Рис. 1. Конструкция двухконтурного электродного водонагревателя (а) и схема его подключения к теплоиспользующим системам (б)

благодаря проходящему через нее электрическому току, т. е. имеет место режим прямого электродного нагрева воды и передачи наибольшей тепловой мощности.

В случае подключения подающего трубопровода СО к патрубку 16 (в дальнейшем – вторая схема подключения) при закрытых вентилях патрубков 15 и 18 нагреваемая вода проходит по второму каналу, т.е. через кольцевую камеру 5 и подвергается косвенному нагреву благодаря тепловому потоку, передаваемому от кипящей котловой воды и пара во внутренней камере 4 через стенку цилиндрического теплообменника 3 (в дальнейшем – первый теплообменник ТО1).

Поскольку в данном случае нагреваемая вода в кольцевой камере 5 проходит сравнительно длинный путь и соприкасается со всей активной поверхностью ТО1, то величина тепловой мощности, передаваемой теплообменником ТО1 нагреваемой воде, определяется размером всей площади теплообменной поверхности.

Если подающий трубопровод СО подключают к патрубку 15 (в дальнейшем – третья схема подключения) при закрытых вентилях патрубков 16 и 18, то нагреваемая вода проходит в кольцевой камере 5 сравнительно короткий путь, соприкасаясь с теплообменной поверхностью меньшей площади. В этом случае величина тепловой мощности, передаваемой теплообменником ТО1 нагреваемой воде, будет значительно меньше, чем в предыдущем случае.

Из вышеописанного следует, что в зависимости от того, по какой схеме подключен СО к водонагревателю (т. е. через какой патрубок отводится нагретая вода из водонагревателя), величина тепловой мощности, передаваемой СО, будет разной. Наибольшее значение мощности имеет место при первой схеме подключения, наименьшее – при третьей схеме.

Таким образом, при работе водонагревателя в режиме нагрева теплоносителя СО имеется возможность заблаговременного выбора соответствующей ступени мощности в зависимости от величины отопительной нагрузки.

Как известно, тепловая нагрузка ($Q_{со}$) объекта изменяется в течение отопительного периода в зависимости от температуры наружного воздуха и ее наибольшее значение определяется при расчетной зимней температуре. При этом значение $Q_{со}$ может быть равным или значительно меньше значения номинальной электрической $P_{эвн.н}$ (тепловой $Q_{эвн.н}$) мощности водонагревателя.

Значительный интерес представляет вопрос о влиянии ступенчатого регулирования тепловой мощности, передаваемой теплообменником ТО1 нагреваемой воде СО, на характер потребления электрической мощности $P_{эвн}$ электродными группами и, соответственно, генерируемой ими тепловой мощности $Q_{эвн}$.

В случаях, когда $Q_{со}$ значительно меньше $Q_{эвн.н}$ и система отопления подключена к водонагревателю по второй или третьей схеме, происходит закипание котловой воды во внутренней камере с парообразованием из-за избытка тепловой мощности, выделяемой в межэлектродных пространствах. В дальнейшем протекают термодинамические и гидродинамические процессы, приводящие к расширению объема накопившегося пара в верхней части внутренней камеры 5 и вытеснению котловой воды из межэлектродных пространств в компенсационный бачок 22. В результате уровень котловой воды в межэлектродном пространстве понижается, а следовательно, уменьшается $P_{эвн}$ ($Q_{эвн}$) до величины, обеспечивающей установление равенства $Q_{эвн}$ и $Q_{со}$.

Таким образом, в режиме косвенного нагрева теплоносителя СО реализуется гидравлический способ автоматического регулирования мощности установки в соответствии с потребной мощностью системы отопления. Достигается также ручное ступенчатое регулирование тепловой мощности, передаваемой теплообменником ТО1 нагреваемой воде, путем выбора соответствующей схемы (второй или третьей) подключения.

В случаях, когда значения $Q_{эвн.н}$ и $Q_{со}$ сравнительно близки и система отопления подключена по первой схеме, циркулирующая в СО вода при прохождении через межэлектродные пространства подвергается прямому электродному нагреву. Дальше нагретая вода через патрубок 18 и подающий трубопровод поступает в радиаторы СО помещения, где ее тепловая энергия используется для поддержания заданной температуры внутреннего воздуха и компенсации тепловых потерь через ограждающие конструкции.

Для описания динамики теплообменных процессов в данном режиме и установления зависимостей между общей площадью радиаторов, конструктивных параметров электродной

системы водонагревателя, расхода теплоносителя, объема и отопительной характеристики помещения и температур внутреннего и наружного воздуха необходимо составить математическую модель на основе теплового баланса для каждой отдельной области: *ev* – электродный водонагреватель; *v* – внутренняя камера водонагревателя; *e* – электродная система; *r* – радиаторы отопления; *p* – помещение.

При этом приняты следующие допущения: температура потока теплоносителя принимается одинаковой по всему сечению труб, внутренние источники тепла в теплоносителях отсутствуют, теплоемкость всех элементов и теплоносителей постоянна, теплообмен между элементами системы характеризуется средними значениями коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Приняты во внимание также следующие обстоятельства: система автоматики, снабженная датчиком температуры воды в водонагревателе и датчиком температуры воздуха в помещении, отключает водонагреватель от электрической сети при температуре воды выше 95 °С (или при средней температуре воды во внутренней камере водонагревателя 82,5 °С), с целью недопущения ее кипения и при превышении температуры воздуха над заданным расчетным значением.

Нестационарные тепловые процессы в системе отопления могут быть описаны следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dt_{\text{в}}^{v}}{d\tau}=\frac{1}{C_{\text{мк}}^{ev}}\cdot\left\{\frac{\delta\cdot U_{\text{л}}^{2}\cdot H_{3}\cdot\gamma_{20}\cdot\left[1+\alpha\cdot\left(t_{\text{в}}^{v}-20\right)\right]}{K_{\text{гк}}^{e}}-\right.$$
$$\left.-c_{\text{в}}\cdot G_{\text{в}}^{r}\cdot\left(t_{\text{в}}^{v}-t_{\text{в}}^{r}\right)-K_{\text{из}}^{ev}\cdot F_{\text{из}}^{ev}\cdot\left(t_{\text{в}}^{v}-t_{\text{воз}}^{p}\right)\right\}; \quad (1)$$

$$\frac{dt_{\text{в}}^{r}}{d\tau}=\frac{1}{C_{\text{мк}}^{r}}\cdot\left[c_{\text{в}}\cdot G_{\text{в}}^{r}\cdot\left(t_{\text{в}}^{v}-t_{\text{в}}^{r}\right)\right]-K_{r}\cdot F_{r}\cdot\left(t_{\text{в}}^{r}-t_{\text{воз}}^{p}\right); \quad (2)$$

$$\frac{dt_{\text{воз}}^{p}}{d\tau}=\frac{1}{C_{\text{воз}}^{p}}\cdot\left[K_{r}\cdot F_{r}\cdot\left(t_{\text{в}}^{r}-t_{\text{воз}}^{p}\right)-\right.$$
$$\left.-q_{\text{р}}\cdot V_{\text{р}}\cdot\left(t_{\text{воз}}^{p}-t_{\text{нв.р}}\right)\right], \quad (3)$$

где

$$t_{\text{в}}^{v}=\frac{t_{\text{в.вых}}^{v}+t_{\text{в.вх}}^{v}}{2};\ t_{\text{в}}^{r}=\frac{t_{\text{в.вых}}^{r}+t_{\text{в.вх}}^{r}}{2};$$

$$\delta=\begin{cases}1,\text{ если } t_{\text{в}}^{v}<82{,}5\,°\text{C и } t_{\text{воз}}^{p}<t_{\text{воз.р}}^{p};\\ 0,\text{ если } t_{\text{в}}^{v}\geq 82{,}5\,°\text{C или } t_{\text{воз}}^{p}\geq t_{\text{воз.р}}^{p}.\end{cases}$$

Начальные условия:

$$t_{\text{в}}^{v}\left(\tau=0\right)=t_{\text{в.0}}^{v},\ t_{\text{в}}^{r}\left(\tau=0\right)=t_{\text{в.0}}^{r},\ t_{\text{воз}}^{p}\left(\tau=0\right)=t_{\text{воз.0}}^{p}.$$

Здесь $t_{\text{в}}^{v}$, $t_{\text{в}}^{r}$ – среднее значение температуры воды во внутренней камере водонагревателя и радиаторах соответственно, °С;

$t_{\text{воз}}^{p}$ – среднее значение температуры воздуха в помещении, °С;

δ – коэффициент, значение которого равно 1 или 0 в зависимости от состояния («включено» или «отключено») водонагревателя;

$U_{\text{л}}$ – линейное напряжение, В;

γ_{20} – удельная проводимость котловой воды при температуре 20 °С, 1/(Ом·м);

α – температурный коэффициент электрической проводимости воды, 1/°С;

H_{3} – полная высота электродной системы, м;

$K_{\text{гк}}^{e}$ – геометрический коэффициент электродных групп, соединенных по схеме «двойная звезда»;

K_{r}, $K_{\text{из}}^{v}$ – коэффициенты теплопередачи через стенку радиатора и через теплоизоляцию корпуса водонагревателя соответственно, Вт/м²·°С;

F_{r}, $F_{\text{из}}^{ev}$ – площади поверхности теплообмена радиаторов и теплоизоляции корпуса водонагревателя, соответственно, м²;

$G_{\text{в}}^{r}$ – расход воды, циркулирующей в системе отопления, кг/с;

$C_{\text{мк}}^{ev}$ – полная теплоемкость металлоконструкции корпуса водонагревателя, Дж/°С;

$C_{\text{мк}}^{r}$ – полная теплоемкость металлоконструкции радиаторов, Дж/°С;

$C_{\text{воз}}^{p}$ – полная теплоемкость внутреннего воздуха в помещении, Дж/°С;

$c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, 4190 Дж/кг·°С;

$V_{\text{р}}$ – объем помещения, м³;

$q_{\text{р}}$ – удельная отопительная характеристика помещения, Вт/м³·°С;

$t_{\text{в.вх}}^{v}$, $t_{\text{в.вых}}^{v}$ – температуры воды на входе внутренней камеры и на выходе из нее соответственно, °С;

$t_{\text{в.вх}}^{r}$, $t_{\text{в.вых}}^{r}$ – температуры воды на входе радиаторов и на выходе из них соответственно, °С;

$t_{\text{воз.р}}^{p}$ – заданная расчетная температура воздуха в помещении, °С;

$t_{нв.р}$ – расчетная зимняя температура наружного воздуха, °С;

τ – время, с.

Первый член в скобке в правой части уравнения (1) определяет электрическую мощность P_{ev} электродного водонагревателя при средней температуре $t_в^v$ воды, проходящей через межэлектродное пространство, а второй и третий члены – тепловые мощности, расходуемые на изменение энтальпии потока воды, движущегося в межэлектродном пространстве, и на компенсацию теплопотерь через теплоизоляцию корпуса водонагревателя. Геометрический коэффициент $K_{гк}^e$ электродной системы определяется с учетом формы, конструктивной схемы, геометрических размеров электродов и эквивалентной электрической схемы их соединения [1].

Второй член в скобке в правой части уравнения (2) определяет теплоотдачу радиаторов воздушной среде в помещении, а второй член в правой части уравнения (3) – теплоотдачу окружающему помещение наружному воздуху [6].

Решение системы дифференциальных уравнений (1), (2) и (3) осуществлено численным методом при помощи математического пакета Matcad.

Предложенная математическая модель была использована для исследования теплообменных процессов в системе отопления сельскохозяйственного помещения. Основные элементы водонагревателя имеют следующие параметры: D_1 = 0,236 м; D_2 = 0,21 м; d_2 = 0,204 м; D_3 = 0,15 м; d_3 = 0,142 м; D_4 = 0,088 м; H_1 = = 0,39 м; H_2 = 0,35 м; H_3 = 0,098 м; H_5 = 0,25 м; γ_{20} = 0,067 1/(Ом·м); α = 0,025 1/°С; $K_{гк}^e$ = 0,097; $C_{мк}^{ev}$ = 8911 Дж/°С; $P_{эвн.н}$ = 25 кВт.

Характеристики помещения, радиаторов и другие исходные данные: $V_р$ = 540 м³; $q_р$ = = 0,5 Вт/м³·°С; $C_{воз}^p$ = 664 804,4 Дж/°С; K_r = = 10 Вт/м²·°С; F_r = 26,42 м²; $C_{мк}^r$ = 432 432 Дж/°С; $G_в^r$ = 0,4 кг/с; $K_{из}^{ev}$ = 0,5 Вт/м²·°С; $t_{воз.р}^p$ = 15 °С; $t_{воз.0}^p$ = 14,5 °С; $t_{в.0}^r$ = 36,8 °С, $t_{в.0}^v$ = 36,9 °С при $t_{нв.р}$ = –15 °С; $t_{воз.0}^p$ = 14,5 °С; $t_{в.0}^r$ = 49,3 °С, $t_{в.0}^v$ = 49,4 °С, $Q_{со}$ = 11 610 Вт при $t_{нв.р}$ = –28 °С; $U_л$ = 380 В.

На рисунках 2 и 3 приведены графики, описывающие динамики изменения электрической мощности P_{ev} и температур $t_в^v$, $t_{воз}^p$ при работе системы автоматики и при разных значениях температуры наружного воздуха.

Анализ графиков показывает, что при вышеприведенных параметрах электродных групп, радиаторов и расхода теплоносителя система отопления обеспечивает в холодный период года поддержание температуры воздуха в помещении в заданных пределах (14,5…15,5 °С) путем периодического включения и отключения водонагревателя. Причем чем ниже температура наружного воздуха, тем выше потребляемая мощность и меньше продолжительность отключенного состояния водонагревателя.

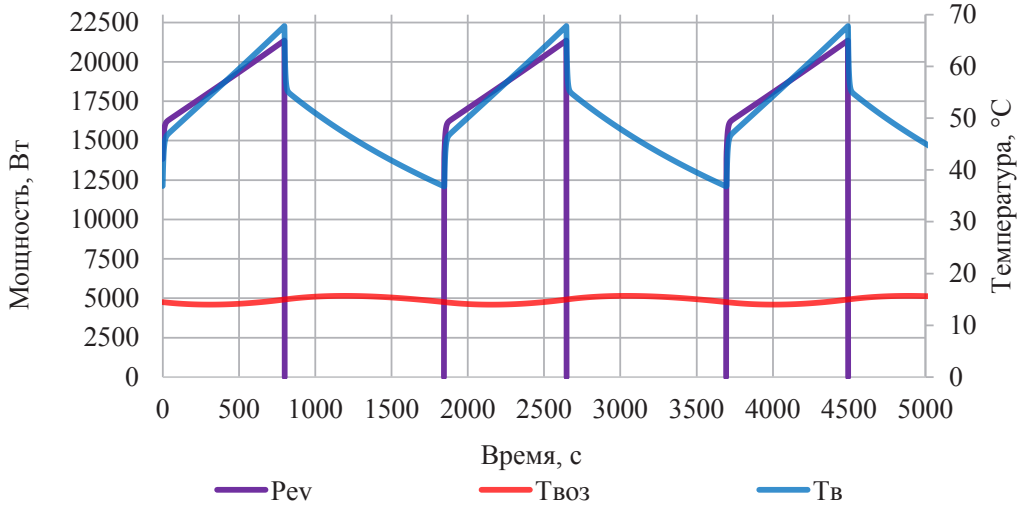
В рабочем интервале с течением времени по мере роста средней температуры воды в межэлектродном пространстве происходит плавное повышение мощности от первоначального значения, что отличает электродные водонагреватели от элементных, мощность которых всегда постоянная и не зависит от температуры воды в зоне нагрева.

Происходящее сравнительно часто периодическое включение и отключение водонагревателя при его работе в режиме прямого электродного нагрева теплоносителя СО обусловлено тем, что тепловая нагрузка ($Q_{со}$ = 11 610 Вт) СО помещения существенно меньше номинальной мощности ($P_{эвн.н}$ = 25 000 Вт) водонагревателя. В таких случаях представляется целесообразным переход к режиму косвенного нагрева теплоносителя путем подключения СО к водонагревателю по второй или третьей схеме. Более подробный анализ работы водонагревателя в режиме косвенного нагрева теплоносителя будет представлен в последующих статьях.

Выводы

Двухконтурный электродный водонагреватель со встроенными теплообменниками обладает более широкой функциональной возможностью, благодаря чему достигается в одном устройстве одновременное и раздельное получение горячей воды для систем отопления и горячего водоснабжения. Это способствует повышению коэффициентов использования и загрузки установки. В данной установке также достигается простота регулирования мощности.

Предложенная математическая модель позволяет проследить динамику электрических и теплообменных процессов в системе отопления при прямом электродном нагреве теплоно-



P_{ev} – мощность; $T_{воз}$ – температура воздуха в помещении ($t^{p}_{воз}$);
$T_{в}$ – средняя температура воды во внутренней камере водонагревателя ($t^{v}_{в}$)

Рис. 2. Изменение мощности P_{ev} и температур $t^{v}_{в}$, $t^{p}_{воз}$ при $t_{нв.р} = -15$ °С

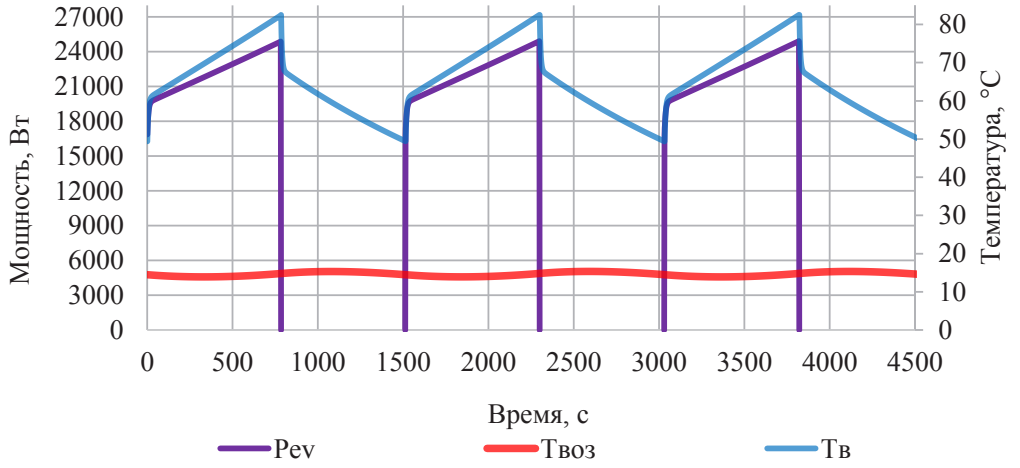


Рис. 3. Изменение мощности P_{ev} и температур $t^{v}_{в}$, $t^{p}_{воз}$ при $t_{нв.р} = -28$ °С

сителя и может быть использована для оптимизации конструктивных параметров основных элементов еще на стадии проектирования.

Список литературы

1. Электротермическое оборудование для сельскохозяйственного производства / Н. Б. Каган, В. Г. Кауфман, М. Г. Пронько, Г. Д. Яневский. М. : Энергия, 1980. 192 с.

2. Борисов С. А. Технические средства нагрева воды, применяемые в сельском хозяйстве // Вестник НГИЭИ. 2011. № 2 (3). Режим доступа : https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskie-sredstva-nagreva-vody-rimenyaemye-v-selskom-hozyaystve (дата обращения: 24.01.2022).

3. Кешуов С. А., Алдибеков И. Т., Барков В. И. Ресурсосберегающие системы и установки для электротеплообеспечения в малом молочном животноводстве. Алматы : Нұр-ДиАс, 2012. 320 с.

4. Электродный водонагреватель / В. Ф. Калинин, А. М. Шувалов, В. Ф. Гудухин, О. В. Терентьев // Техника в сельском хозяйстве. 2002. № 2. С. 43–44.

5. Калинин Ц. И., Горшенин В. Г. Системы электропитания и управления электродными

водонагревателями // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 3 (65). С. 82–87.

6. Захаров А. А. Применение теплоты в сельском хозяйстве. М. : Агропромиздат, 1986. 288 с.

Алдибеков Исабай Танирбергенович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева».
E-mail: ait_53@mail.ru.

Тойшиев Нурсултан Сапарбаевич, ассистент, кафедра «Энергосбережение и автоматика», Казахский национальный аграрный исследовательский университет.
E-mail: toyshiev@yandex.ru.

Болат Алпамыс Бауыржанулы, магистрант, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева».
E-mail: bolat.alpamys@gmail.com.

Беймуратова Аниса Ерсаиновна, магистрант, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева».
E-mail: arstananissa@gmail.com.

* * *