

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-83

А. В. БУБНОВ
А. Н. ЧУДИНОВ
В. А. ЕМАШОВ

Омский государственный
технический университет

АЛГОРИТМ РАБОТЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ЧАСТОТНО- ФАЗОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРИЛОЖЕНИИ SIMULINK ПАКЕТА ПРОГРАММ MATLAB

В статье разработан и реализован в приложении Simulink пакета программ Matlab алгоритм работы компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора. Получены временные зависимости и построены фазовые портреты работы компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора.

Ключевые слова: импульсный частотно-фазовый дискриминатор, электропривод с фазовой синхронизацией, нелинейный элемент.

При анализе динамических процессов в электроприводе с фазовой синхронизацией (ЭПФС) используют модель импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД), реализованную на основе многозначной статической нелинейности [1 – 2], имеющей z линейных участков в соответствии с количеством меток импульсного датчика частоты вращения электродвигателя. Однако при исследовании ЭПФС методом компьютерного моделирования возникают трудности, связанные с отсутствием стандарт-

ного блока ИЧФД в библиотеке приложения Simulink пакета программ Matlab.

Целью статьи являются разработка эффективного алгоритма работы компьютерной модели ИЧФД и его реализация в приложении Simulink пакета программ Matlab.

На рис. 1 представлены модель ИЧФД в виде характеристики многозначной статической нелинейности и возможные траектории движения рабочей точки по характеристике нелинейного элемента (НЭ),

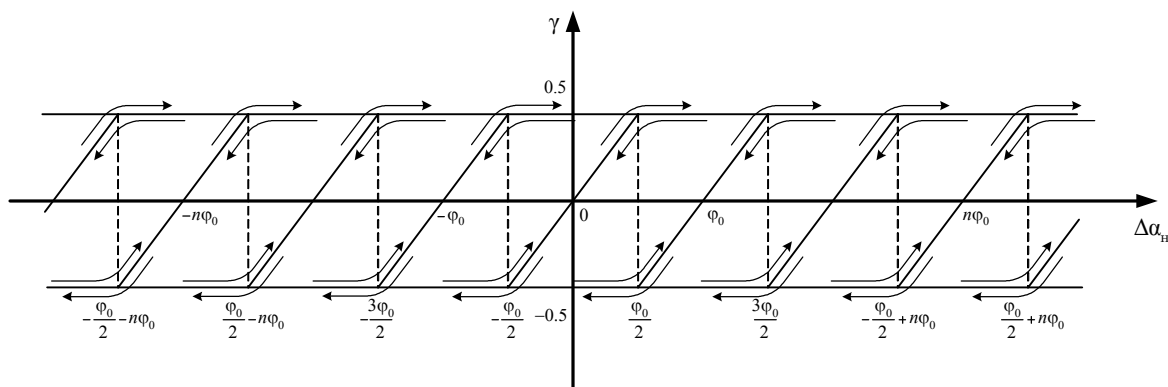


Рис. 1. Траектории движения рабочей точки по характеристике многозначной статической нелинейности

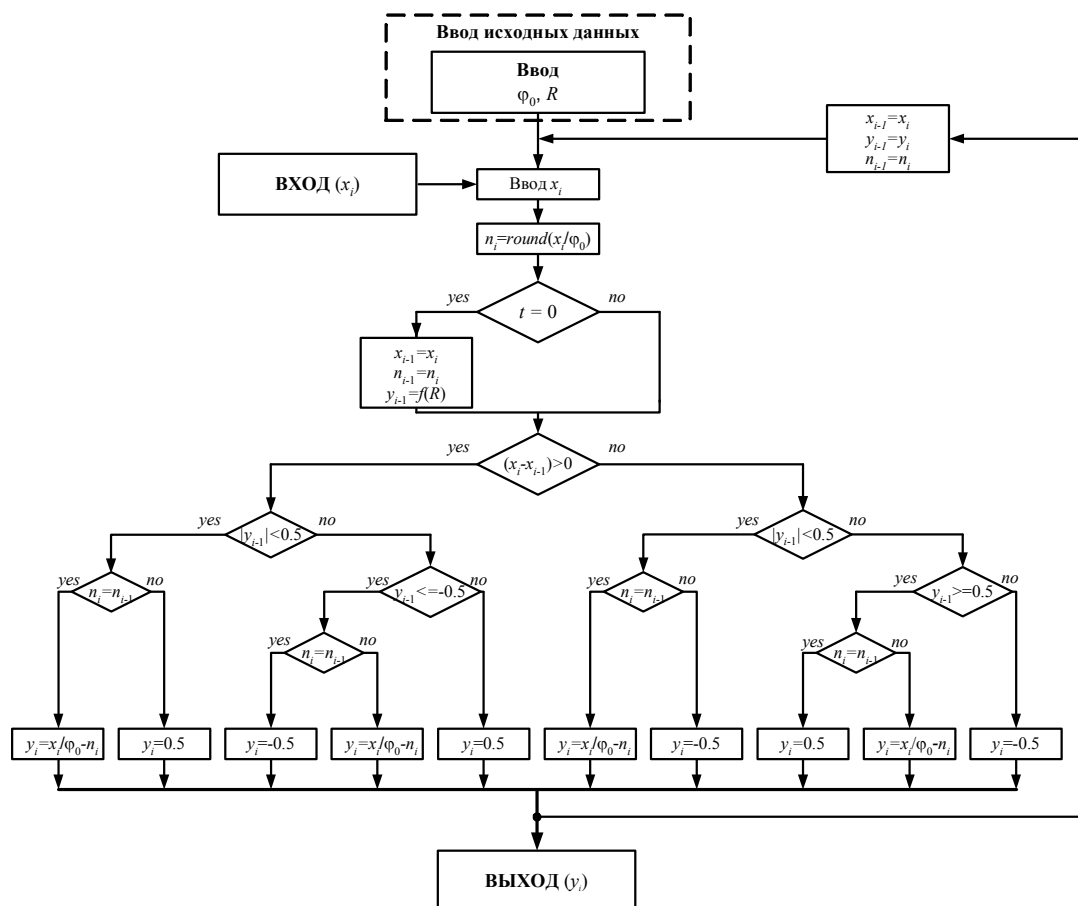


Рис. 2. Блок-схема работы многозначной статической нелинейности

где γ — выходной сигнал ИЧФД, $\Delta\alpha_n$ — сигнал угловой ошибки электропривода.

Разработанный в [3–4] алгоритм компьютерной модели ИЧФД представлен в виде блок-схемы (рис. 2). Входная величина x соответствует сигналу угловой ошибки $\Delta\alpha_n$; выходная величина y соответствует выходному сигналу ИЧФД γ ; n — номер участка характеристики НЭ, на котором находится рабочая точка (определяется как округленное значение x/φ_0 где $\varphi_0 = 2\pi/z$ — угловое расстояние между соседними метками импульсного датчика частоты); R — параметр, определяющий режим работы электропривода в момент запуска программы. Индексы i и $(i-1)$ определяют значение переменной в настоящий момент времени и предыдущее ее значение соответственно.

Работа блок-схемы происходит в два этапа. На первом этапе (до запуска программы) задаются два пара-

метра: φ_0 , характеризующий ширину линейного участка характеристики НЭ, и R , характеризующий режим работы ИЧФД в момент запуска программы (насыщение при разгоне электропривода, фазового сравнения импульсов входных частот или насыщения при торможении).

Второй этап начинается непосредственно в момент запуска программы моделирования ($t = 0$), когда на вход блок-схемы поступает первое значение x_i , соответствующее абсциссе рабочей точки (рис. 1) и рассчитывается номер участка характеристики НЭ n_i , на котором рабочая точка находится. Величинам x_{i-1} и n_{i-1} присваиваются значения величин x_i и n_i соответственно. Значение y_{i-1} принимается равным 0,5, нулю или минус 0,5 в зависимости от режима работы электропривода R (режим разгона с максимальным ускорением, режим синхронизации или режим

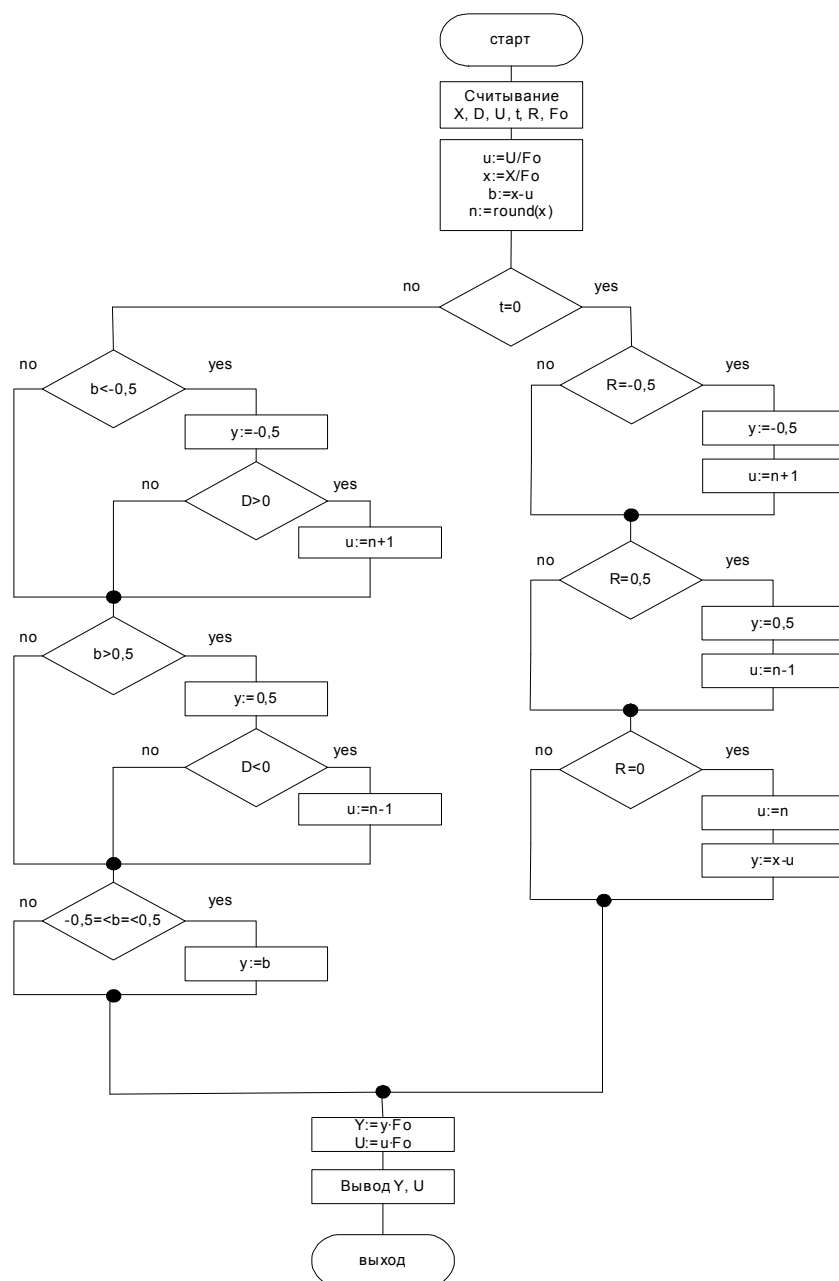


Рис. 3. Модифицированная блок-схема работы многозначной статической нелинейности

торможения с максимальным ускорением соответственно).

Для получения на выходе блок-схемы ординаты рабочей точки y_i в программе выполняются логические и арифметические операции, при этом используются значения x_{i-1} , y_{i-1} , n_{i-1} , соответствующие положению точки в предыдущий момент времени. Сначала проверяется, происходит движение рабочей точки влево ($x_i - x_{i-1} < 0$) или нет (точка неподвижна или движется вправо). Далее проверяется, находилась ли рабочая точка в предыдущий момент времени на линейном участке характеристики ($|y_{i-1}| < 0,5$) или на участке насыщения ($|y_{i-1}| \geq 0,5$). После этого проверяется, перешла ли рабочая точка на соседний участок нелинейной характеристики. Исходя из всех этих условий, текущее значение y_i может принимать одно из десяти возможных значений, рассчитываемое по одному из трех выражений (рис. 2). Полученное таким образом значение y_i поступает на выход блок-схемы. После этого величинам x_{i-1} , y_{i-1} и n_{i-1} присваиваются значения величин x_i , y_i и n_i соответственно, и цикл повторяется.

Данный алгоритм реализован в приложении Simulink программного пакета Matlab в виде блока на основе S-функции (стандартный блок из библиотеки Simulink) [3]. Исследование данного блока в компьютерной модели ЭПФС показало низкое быстродействие, обусловленное тем, что при работе блока на каждом шаге расчета идет обращение к жесткому диску (работа с тремя переменными: запись и считывание данных).

Для устранения отмеченного недостатка разработан новый алгоритм работы компьютерной модели ИЧФД, блок-схема которого представлена на рис. 3. При его реализации в приложении Simulink программного пакета Matlab создан новый блок на основе M-функции (стандартный блок из библиотеки Simulink), что позволило заметно повысить быстродействие работы, за счет исключения обращений к жесткому диску на каждом шаге моделирования. Входная величина X соответствует сигналу угловой ошибки $\Delta\alpha_n$; выходная величина $Y - \gamma$; n — номер участка характеристики НЭ, на котором находится рабочая точка

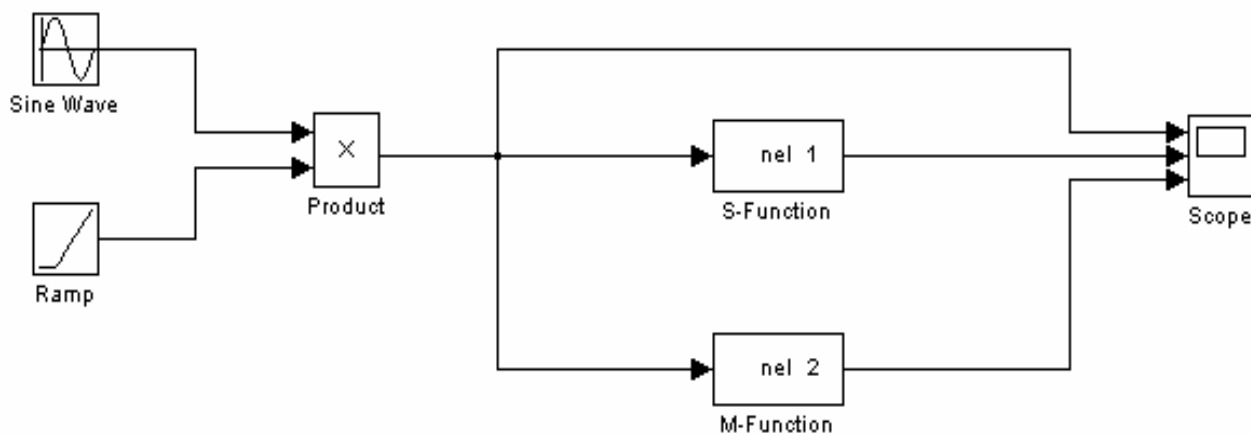


Рис. 4. Компьютерная структурная схема для сравнительного анализа работы моделей ИЧФД

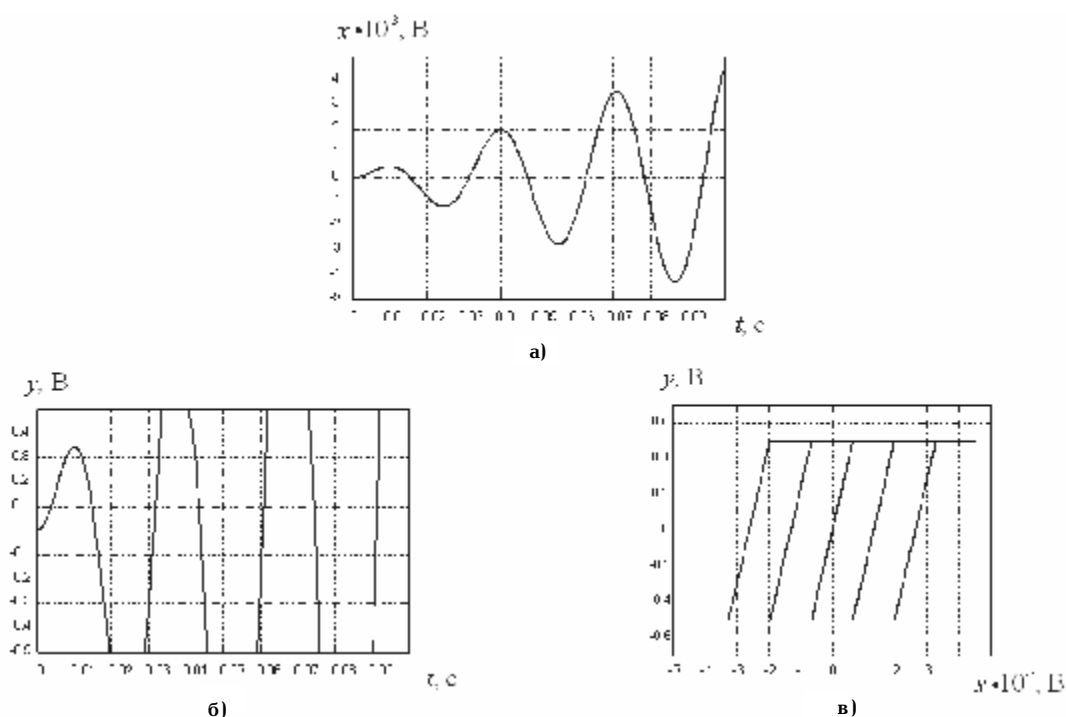


Рис. 5. Временные диаграммы и фазовые портреты работы моделей многозначной статической нелинейности

(определяется как округленное значение X/φ_0); D — значение производной входной величины X ; R — параметр, определяющий режим работы электропривода в момент запуска программы; U и b — вспомогательные переменные; $x=X/\varphi_0$, $y=Y/\varphi_0$, $u=U/\varphi_0$ — приведенные значения X , Y , U .

Работа блок-схемы происходит в два этапа. На первом этапе (до запуска программы) задаются два параметра φ_0 и R .

Второй этап начинается в момент запуска программы моделирования ($t=0$), когда на вход блока поступает первое значение X_i , соответствующее абсциссе рабочей точки. В начальный момент времени ($t=0$) переменной U присваивается значение равное нулю. Далее рассчитываются приведенные значения x_i , u_{i-1} путем деления абсолютных значений X_i , U_{i-1} на φ_0 , номер участка характеристики НЭ n_i , на котором находится рабочая точка, и значение вспомогательной переменной $b=x-u$.

Для получения на выходе блок-схемы ординаты рабочей точки Y_i в программе выполняются логические и арифметические операции, при этом используется

значение U_{i-1} , соответствующее положению точки в предыдущий момент времени, и значение D_i , соответствующее производной входной величины X . Сначала проверяется, является ли цикл первым ($t=0$) или нет. Если да, то в зависимости от значений R и x_i определяются выходные значения y_i и u_i . Если цикл не первый, то определяется, на каком из трех участков характеристики НЭ находится вспомогательная переменная b :

$$b < -0,5;$$

$$-0,5 < b < 0,5;$$

$$b > 0,5.$$

Далее вычисляется значение y_i и в зависимости от направления движения рабочей точки (переменная D) определяется необходимость перезаписи переменной u_i . Если перезапись необходима, то в зависимости от значения b переменной u_i присваивается одно из следующих значений:

если $b < -0,5$ то $u_i = n + 1$;

если $b > 0,5$ то $u_i = n - 1$;

если $-0,5 < b < 0,5$ то $u_i = u_{i-1}$.

Далее производится перевод относительных выходных значений блок-схемы в абсолютные путем домножения u_i и y_i на φ_0 .

Для исследования и сравнительного анализа работы вышерассмотренных блоков ИЧФД разработана компьютерная структурная схема, представленная на рис. 4.

Блок «Sine Wave» служит для формирования синусоидального сигнала; блок «Ramp» — для задания линейно нарастающего сигнала; блок «Product» осуществляет перемножение двух сигналов и формирует выходной сигнал с линейно нарастающей амплитудой колебаний (рис. 5а); в блоке nel 1 реализована компьютерная модель ИЧФД на основе блок-схемы (рис. 2) с использованием S-функции; в блоке nel 2 реализована компьютерная модель ИЧФД на основе разработанной блок-схемы (рис. 3); блок «Scope» служит для построения временных диаграмм сигналов.

Частота и амплитуда блока «Sine Wave», параметры блока «Ramp» заданы таким образом, чтобы рабочая точка на фазовом портрете проходила поочередно по всем возможным траекториям пяти ближайших участков характеристики нелинейности, что необходимо для построения характеристики НЭ и оценки её адекватности исходной характеристики (рис. 1).

Моделирование проводилось при следующих параметрах: $z = 4800$, время расчета $t = 0,1$ с, шаг расчета $t' = 10^{-5}$ с, блок «Sine Wave» (частота $f = 200$ Гц, амплитуда $U = 1$ вольт), блок «Ramp» (напряжения изменяется от нуля до 0,5 со скоростью 0,05 В/с).

Полученные в результате моделирования временные диаграммы и фазовые портреты (рис. 5б и 5в) работы блоков ИЧФД, реализованных на основе S-функции и М-функции, полностью идентичны, при этом фазовые портреты соответствуют исходной характеристике НЭ (рис. 1). Однако проведенные исследования показали более высокое быстродействие работы предложенной компьютерной модели по сравнению

с известной (как минимум на порядок), за счет того, что при реализации блок-схемы (рис. 2) с использованием S-функции из одного цикла в последующий передаются значения трёх переменных (x_{i-1} , y_{i-1} , n_{i-1}), расположенных на жёстком диске компьютера, а в предлагаемой блок-схеме записывается значение одной переменной (U_{i-1}) в оперативную память компьютера, что значительно сокращает время работы программы.

Полученные в статье результаты могут быть использованы при моделировании и проектировании прецизионных электроприводов с фазовой синхронизацией.

Библиографический список

1. Трахтенберг, Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением / Р.М. Трахтенберг. — М.: Энергоиздат, 1982. — 168 с.
2. Бубнов, А.В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией / А. В. Бубнов // Электричество. — М.: ЗАО «Знак», 2005. — № 5. — С. 27 — 31.
3. Бубнов, А.В. Моделирование электропривода с фазовой синхронизацией в Matlab-Simulink / А.В. Бубнов, П.А. Катрич // — Известия Томского политехнического университета — Томск : Издательство ТПУ, 2006. — Том 309. — № 3. — С. 165 — 170.
4. Катрич, П.А. Блок «Многозначная нелинейность» / П.А. Катрич, А. С. Игнатов. — М.: ВНИИЦ, 2005. — №50200501804.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», заведующий секцией «Промышленная электроника».

ЧУДИНОВ Александр Николаевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», секция «Промышленная электроника».

ЕМАШОВ Василий Алексеевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», секция «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: e-mail: footballmaster@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 27.05.2010 г.

© А. В. Бубнов, А. Н. Чудинов, В. А. Емашов

Книжная полка

621.311/ПТ79

Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры [Текст]: учеб. пособие для вузов по специальностям 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»... / О. К. Березин [и др.]; под ред. В. А. Шахнова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: КНОРУС, 2010. — 532 с.: рис., табл. — Библиогр.: с. 529 — 530. — ISBN 978-5-406-00230-8.

Рассмотрены вопросы схемотехнического и конструкторского проектирования низковольтных и высоковольтных источников электропитания электронной аппаратуры различного назначения, а также их особенности, определяемые характеристиками систем автономного электроснабжения, характером нагрузки и условиями эксплуатации. Приведены справочные данные для курсового и дипломного проектирования.

Четвертое издание дополнено результатами исследований и разработок источников электропитания на базе полевых и биполярных транзисторов с изолированным затвором, примерами расчетов.

621.311/Г51

Гиршин, С. С. Методы расчета и оптимизация режимов электроэнергетических систем [Текст]: конспект лекций / С. С. Гиршин, Л. В. Владимиров; ОмГТУ. — Омск, 2010. — 47 с.: рис. — Библиогр.: с. 47.

В конспекте лекций изложены методы расчета установившихся режимов электрических систем, включая несимметричные и несинусоидальные режимы. Рассмотрены задачи оптимизации режимов по различным критериям. Даны основные принципы управления режимами.

ОСОБЕННОСТИ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В РЕГУЛЯТОРАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

В статье рассмотрены особенности демодуляции сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией. Выделены проблемы, возникающие при проектировании и исследовании прецизионных электроприводов, для решения которых авторами проведено математическое моделирование с применением ЭВМ. На основании приведенных в работе результатов исследований сделан вывод об использовании методов теории цифровых систем управления в электроприводах с ШИМ.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, цифровые системы, широтно-импульсная модуляция.

Интенсивное развитие современных средств вычислительной техники привело к широкому распространению цифровых систем управления, которые в настоящее время используются в различных отраслях промышленности. Одним из основных преимуществ таких систем является возможность аппаратной и программной реализации сложных алгоритмов управления, которые невозможно создать, используя аналоговые регуляторы, строящиеся на основе типовых пропорциональных, интегральных и дифференцирующих звеньев. Преимуществом цифровых регуляторов является возможность реализации различных функций, таких как обмен информацией с другими регуляторами, взаимное резервирование, автоматическая диагностика и поиск неисправностей, реализация адаптивных законов управления [1].

Одним из перспективных направлений применения цифровых систем регулирования является электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализуемый на основе принципа фазовой автоподстройки частоты, что позволяет обеспечить высокие точностные показатели, хорошие динамические свойства и широкий диапазон регулирования электропривода [2]. Функциональная схема ЭПФС приведена на рис. 1, где БЗЧ — блок задания частоты $f_{оп}$, ИЧФД — импульсный частотно-фазовый дискриминатор (логическое устройство сравнения входных частотных сигналов), ДМ — демодулятор, БР — блок регулятора, ЭД — электродвигатель, ИДЧ — импульсный датчик частоты вращения.

В работе [3] предложена модель ИЧФД, учитывающая весь комплекс нелинейностей дискриминатора и представляющая собой последовательное соединение интегратора, нелинейного элемента и ШИМ.

Логическое устройство сравнения функционирует в трех режимах: насыщение при разгоне электропривода с максимальным ускорением, насыщение при торможении электропривода с максимальным ускорением и режим фазового сравнения входных частотных сигналов (пропорциональный режим).

В режимах насыщения ИЧФД его выходной сигнал представляет собой постоянный уровень напряжения

(высокий или низкий в зависимости от режима работы). В пропорциональном режиме работы электропривода ($f_{оп} \approx f_{ос}$) выходной сигнал логического устройства сравнения представляет собой ШИМ-сигнал фазового рассогласования импульсов входных частот, пропорционального угловой ошибке электропривода. Демодулятор должен обеспечивать качественную фильтрацию выходного сигнала ИЧФД. Широко используются два варианта построения ДМ [4]: на основе фильтра нижних частот (ФНЧ) и на основе схемы выборки-хранения (СВХ).

При использовании в качестве демодулятора ФНЧ постоянную времени фильтра следует выбирать, исходя из условия $T_f \ll T_c$, где $T_c = 1/\omega_c$, ω_c — частота среза замкнутой линеаризованной системы регулирования [4], что позволит обеспечить качественную фильтрацию выходного сигнала ИЧФД.

При использовании в качестве демодулятора схемы выборки-хранения квантование сигнала осуществляется с частотой $f_{ос}$, которая изменяется в широком диапазоне. В этом случае выходной сигнал ЛУС кусочно-постоянен и равен сигналу квантования в момент прихода импульса частоты $f_{ос}$ (приближение нулевого порядка). Этот вид демодуляции широко используется в цифровых системах регулирования ЭПФС.

При проектировании и исследовании прецизионных ЭПФС, работающих в широком диапазоне регулирования угловой скорости ω , с использованием цифровых регуляторов возникают две основные проблемы:

— дискретизация сигнала фазового рассогласования импульсов частот $f_{оп}$ и $f_{ос}$ осуществляется по

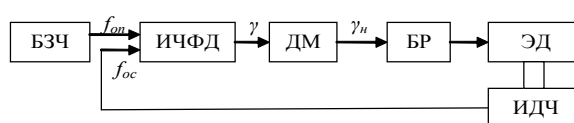


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

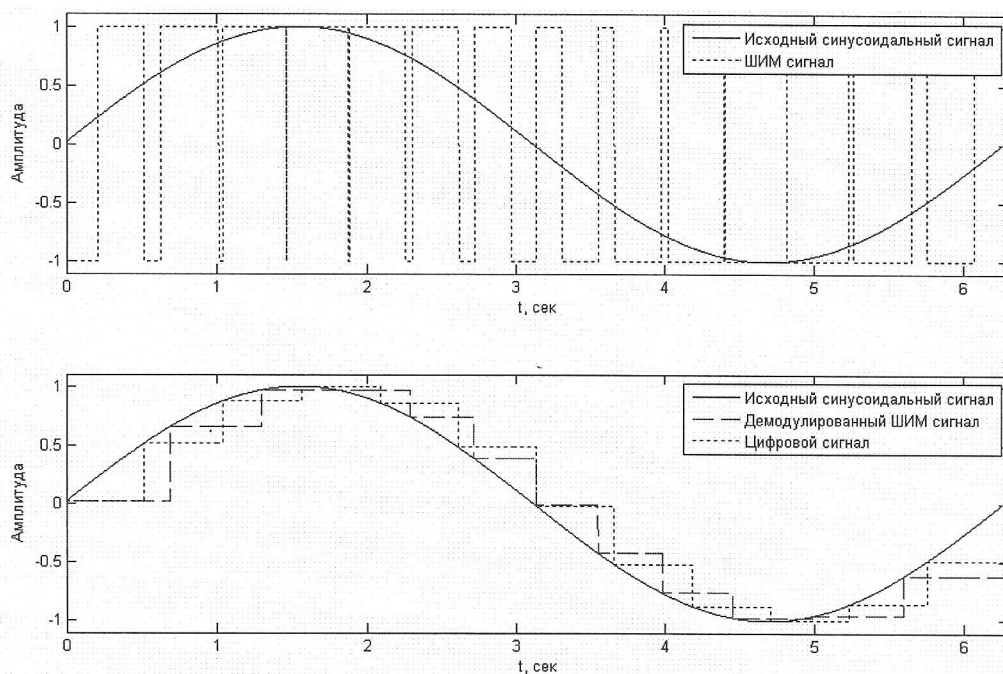


Рис. 2. Преобразование синусоидального сигнала с помощью ШИМ и квантования с постоянным периодом

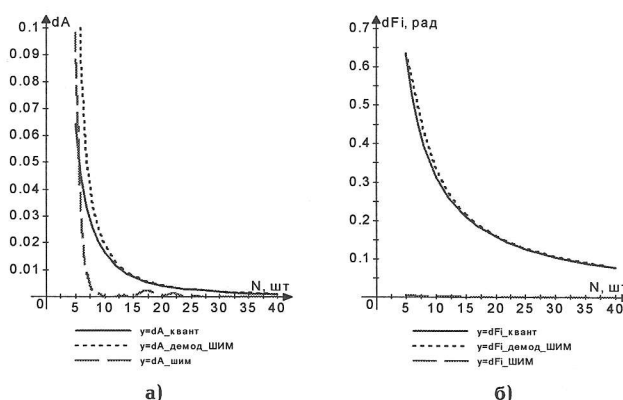


Рис. 3. Графики зависимости погрешности амплитуды (а) и фазы (б) основной гармоники цифрового и ШИМ сигналов

импульсам $f_{ос}$, период следования и фаза которых изменяются в режиме синхронизации электропривода, что приводит к незначительному изменению периода дискретизации;

— при работе цифрового электропривода в широком диапазоне частот вращения из-за влияния широтно-импульсной модуляции в широких пределах изменяется период дискретизации сигнала фазового рассогласования входных частот ИЧФД, что влечет за собой необходимость подстраивать параметры цифрового регулятора.

Вторая проблема может быть решена путем использования в цифровом регуляторе микроконтроллера, а для решения первой проблемы необходимо определить область рабочих частот вращения электропривода, в которой возможно использование методов теории цифровых систем.

Целью данной статьи является определение области частот вращения электропривода, в которой влияния как ШИМ, так и цифровой модуляции на динамические процессы в электроприводе отличаются незначительно; в этом случае возможно использование

цифровых регуляторов, а для расчета динамических процессов — методов цифровых систем.

Для определения области использования методов теории цифровых систем в электроприводах с ШИМ, были проведены компьютерные исследования с использованием алгоритма [5], разработанного в программном продукте Matlab. При компьютерной реализации алгоритма осуществлялись цифровая и широтно-импульсная модуляции входного синусоидального сигнала с нулевой начальной фазой и периодом T . Далее проводился гармонический анализ полученных сигналов (рис. 2):

- квантование с постоянным периодом $T_{оп}$;
- ШИМ-сигнала;
- демодулированного с помощью СВХ ШИМ-сигнала.

Погрешность преобразования входного сигнала проявляется в основном в погрешности амплитуды и фазы основной гармоники ряда Фурье выходного сигнала. Чтобы определить характер изменения величин этих погрешностей, моделирование было проведено с различной частотой квантования при



Рис. 4. Спектральный состав выходных сигналов при N=15

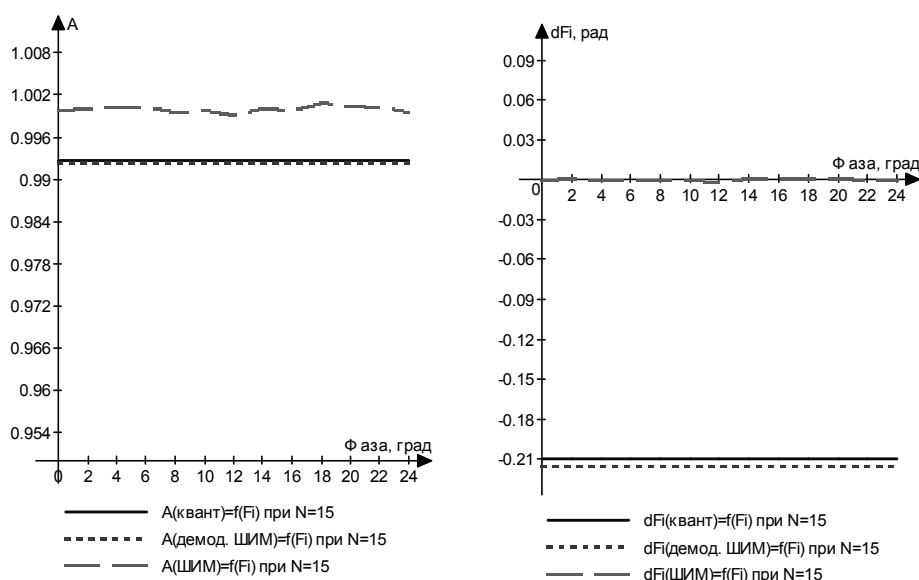


Рис. 5. Графики зависимости амплитуды и фазы выходных сигналов в зависимости от начальной фазы входного сигнала при N=15

использовании указанных видов модуляции. На рис. 3 представлены зависимости погрешностей амплитуды dA и фазы dFi от количества интервалов дискретизации N на периоде исходного синусоидального сигнала.

Для проведения спектрального анализа полученных сигналов программой предусмотрена возможность вычисления параметров заданного количества гармоник ряда Фурье. На рис. 4 представлены результаты расчетов в виде спектрального состава исследуемых сигналов при $N = 15$.

На следующем этапе исследования был определен характер изменения погрешности преобразования входного синусоидального сигнала (по основной гармонике) путем цифровой модуляции и ШИМ в зависимости от начальной фазы входного сигнала. В качестве результатов были получены зависимости амплитуды и фазы основной гармоники (при $N=15$) выходных сигналов при изменении начальной фазы входного сигнала в пределах одного интервала дискретизации с шагом 2° (рис. 5).

По результатам исследования спектрального состава выходных сигналов можно отметить различные особенности. ШИМ-сигнал с постоянной амплитудой импульсов имеет меньшую погрешность по амплитуде и фазе основной гармонике выходного сигнала по сравнению с другими анализируемыми видами квантования. Особенностью спектрального состава немодулированного ШИМ-сигнала является значительная амплитуда высокочастотных гармоник, частоты которых кратны частоте дискретизации. Например, при $N = 15$ величина амплитуды 15-й гармоники составляет 44% от величины амплитуды основной гармоники. Величины высших гармоник демодулированного

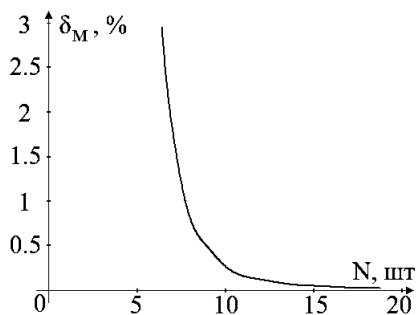


Рис. 6. График зависимости относительной погрешности δ_m между ШИМ и цифровым квантованием от количества интервалов дискретизации

ШИМ- и цифрового сигналов существенно ниже, чем у недемулированного ШИМ-сигнала. Особенностью спектрального состава цифрового сигнала является наличие $(K \cdot N \pm 1)$ высокочастотных гармоник, где $K=0,1,2...$

Проанализировав полученные зависимости, можно сделать вывод, что при частоте квантования в 15 раз большей частоты модулируемого сигнала погрешности, вносимые обоими видами квантования, с высокой степенью точности равны. Это позволяет определить минимальную частоту дискретизации, при которой замена ШИМ на цифровой квантователь не внесет дополнительной ошибки при преобразовании входного сигнала.

Проведенные исследования показали, что при изменении начальной фазы входного сигнала $[0, \text{Топ}]$ амплитуды выходных сигналов остаются неизменными и равны значениям, полученным без сдвига входного синусоидального сигнала. Изменение фазы преобразованных сигналов составляет не более 0,05% от значений, полученных при нулевой начальной фазе входного сигнала. Это позволяет сделать вывод о том, что применение цифрового демодулятора не внесет дополнительных амплитудных и фазовых искажений в задающее воздействие блока управления при изменении фазы выходного сигнала ИЧФД в пределах интервала дискретизации.

Полученные зависимости позволяют определить величину погрешности модуляции δ_m между амплитудами основной гармоники ряда Фурье квантованного Аквант и ШИМ Ашим сигналов на определенной частоте квантования. Погрешность рассчитывается по формуле:

$$\delta_m = \frac{A_{\text{ШИМ}} - A_{\text{квант}}}{A_{\text{ШИМ}}} \cdot 100\%.$$

По результатам расчета построен график, представленный на рис. 6. Расчеты показывают, что при $N=15$ погрешность модуляции составляет 0,05%. Для сравнения, при $N=9$ погрешность модуляции составляет 0,5%.

Проведенные исследования показали, что при $\text{Топ} \geq T/15$ ШИМ не вносит дополнительной погрешности при преобразовании сигнала по сравнению с цифровой модуляцией. Следовательно, минимальная частота квантования в системах с ШИМ определяется из условия $f_{\text{оп-мин}} \geq 15f$, где f — частота преобразуемого сигнала. В результате область рабочих частот вращения можно определить из выражения $\omega_z \geq 15\omega_c/Z$, где ω_z — заданная частота, ω_c — частота среза замкнутой линеаризованной системы регулирования, Z — количество меток ИДЧ. В этом случае для анализа процессов в электроприводе могут быть использованы методы цифровых систем, а реализация регулятора может быть осуществлена в цифровой форме.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и исследовании электроприводов с фазовой синхронизацией.

Библиографический список

1. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Рольф Изерман; пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 541 с., ил.
2. Бубнов, А.В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянного тока [Текст] / Алексей Бубнов. — Омск: Редакция журнала «Омский научный вестник», 2005. — 190 с.
3. Бубнов, А. В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией [Текст] / Алексей Бубнов // Электричество. — 2005. — №5. — С. 27 — 31.
4. Бубнов, А. В. Определение условий линеаризации модели импульсного частотно-фазового дискриминатора в электроприводе с фазовой синхронизацией [Текст] / Алексей Бубнов // Электричество. — 2006. — №1. — С. 38 — 43.
5. Бубнов, А. В. Программа для исследования и сравнительного анализа влияния цифровой и ШИМ модуляции на качество преобразования аналогового сигнала в электроприводе с фазовой синхронизацией [Электронный ресурс] / Алексей Бубнов, Александр Дайнович, Денис Сторожев. — М.: ВНИИЦ. — 2010. — № 50201000417.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», заведующий секцией «Промышленная электроника».

ДАЙНОВИЧ Александр Михайлович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», секция «Промышленная электроника».

СТОРОЖЕВ Денис Юрьевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», секция «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: e-mail: dainovich-alex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.05.2010 г.

© А. В. Бубнов, А. М. Дайнович, Д. Ю. Сторожев

ЗАЩИТА, ДИАГНОСТИКА И ФАЗЗИРЕГУЛИРОВАНИЕ ГРУППОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В статье рассмотрены вопросы защиты, диагностики целостности и фаззирегулирования групповых электрических сетей в электроэнергетической системе наружного освещения.

Ключевые слова: групповые электрические сети, электроэнергетическая система, наружное освещение, защита, диагностика, фаззирегулирование.

Система городского наружного освещения является одной из основных в структуре жизнеобеспечения и коммунального хозяйства населенного пункта. Благоприятные условия для работы водителей, обеспечение безопасного движения автотранспорта и пешеходов, отсутствие потерь от дорожно-транспортных происшествий, а также снижение криминальной обстановки во многом обеспечиваются своевременным включением светильников и обеспечением необходимого уровня освещенности. Кроме этого, необходимо учитывать, что такая система является энергоемким объектом, а экономия электрической энергии — это неотъемлемая часть повышения интеллектуализации автоматизированной системы, обеспечивающая ее окупаемость.

Для управления наружным освещением предлагается использовать интеллектуальную систему с применением нечеткой логики. На основе теории нечетких множеств можно выделить семь типов включения групповых электрических сетей наружного освещения (0%, 16,7%, 33,3%, 50%, 66,6%, 83,3%, 100%) [1], которые позволяют получать различные номиналы мощности, в зависимости от типа включения (уровень мощности 100% или 50%) и количества задействованных фаз (при условии их равномерного чередова-

ния) эти состояния приведены в табл. 1. Два из представленных режимов: 16,7 % и 83,3% использовать нецелесообразно, т.к. прирост искусственной освещенности при переходе в эти режимы незначительный, а количество переключений возрастает на 50 процентов. Переход из одного состояния в другое происходит в соответствие с заданными правилами, которые разрабатываются специалистами системы. Эти правила учитывают следующие условия: календарный день года; текущее время суток; текущее расписание (годовое или индивидуальное); значение уличной естественной освещенности. Последний фактор выбора режима можно, несомненно, считать самым важным, на котором должно быть построено управление наружным освещением. Замеры текущей естественной (солнечной) освещенности сравниваются со значениями, обозначенными в правилах, определенных специалистами и заложенных в систему, в итоге выносится решение о выборе режима включения электропитания светильников. На основе полученного решения производятся оперативные переключения системы наружного освещения, в соответствие не только с расписанием, но и с текущими погодными условиями в конкретной географической точке. При этом возникает воз-

Таблица 1

Типы включения электропитания светильников

Обозначение режима работы АСДУ НО	Z	NB	NM	NS	PM	PS	PB
Проценты от максимальной мощности включения, %	0	16,7	33,3	50	66,6	83,3	100
Тип включения	Все фазы отключены	1 фаза 50%	2-е фазы 50% или 1 фаза-100%	3-и фазы-50% или 1-100% и 1 - 50%	2-е фазы-100% или 1-100% 2 фазы 50%	2-е фазы-100% и 1 - 50%	3 фазы 100%

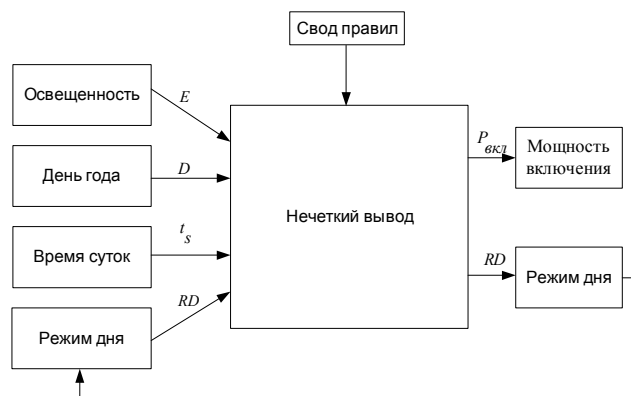
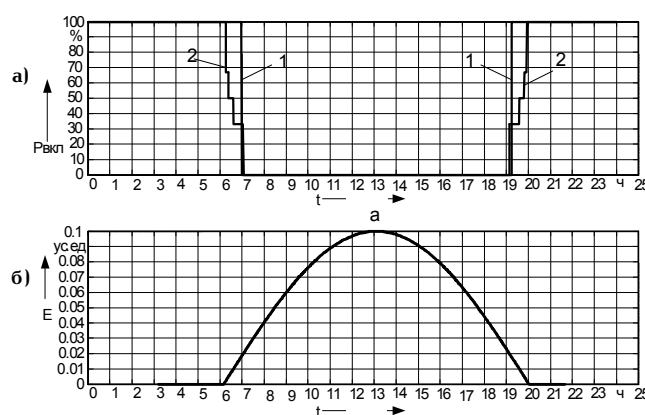


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы принятия решения



1 – переключение в соответствии с годовым расписанием;
 2 – переключение под управлением системы нечеткого вывода
 Рис. 2. Моделирование с идеальным сигналом на входе системы:
 а – мощность включения, %; б – естественная освещенность, усл. ед.

можность выбора режима включения светильников для каждого питающего пункта в отдельности, либо группы территориально объединенных питающих пунктов.

Вычисление рекомендуемой мощности включения светильников производится на основе входных переменных «Освещенность» E , «Режим дня» RD , «Время суток» t_s , «День года» D и составленного свода правил. Структурная схема интеллектуальной системы принятия решения приведена на рис. 1.

Алгоритм управления наружным освещением осуществляется по методу Мамдани. Переменная «Режим дня» имеет четыре лингвистических состояния: «Утро», «День», «Вечер», «Ночь» и определяется по двум входным переменным «Время суток» и «День года». «Режим дня» определяется для того, чтобы обеспечить смещение границ лингвистических состояний в течение года. «Мощность включения» в свою очередь находится по переменным «Режим дня» и «Освещенность». После получения входного массива данных происходит его фаззификация, т.е. преобразование числовых значений в лингвистические переменные и определяются соответствующих функций принадлежности $\mu(RD)$ и $\mu(E)$. Результатом фаззификации является множество $B = \{b_i\}$, где b_i – значение функции принадлежности для каждого подзаключения свода правил. Далее выполняется агрегирование или процедура определения степени истинности условий по каждому из перечисленных

правил системы нечеткого вывода методом логической конъюнкции.

$$b_i'' = \min\{\mu(RD), \mu(E)\}. \quad (1)$$

Результатом агрегирования является множество значений функций принадлежности $B'' = \{b_i''\}$, где i – общее количество входных нечетких правил, определенных на этапе фаззификации.

В качестве метода вывода заключений (активизации) используется метод минимального значения, выполняющий активизацию логического заключения по формуле:

$$\mu_i'(P_{вкл}) = \min\{c_i, \mu(P_{вкл})\} \quad (2)$$

где $\mu(P_{вкл})$ – функция принадлежности терма, являющегося значением выходной переменной $P_{вкл}$; c_i – элемент множества $C = \{c_i\}$, который определялся как алгебраическое произведение элементов b_i'' множества B'' и значений весовых коэффициентов F_i для каждого из правил системы нечеткого вывода. В данной системе все коэффициенты F_i равны единице.

Аккумуляция или процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных $P_{вкл} = \{P_{вкл}\}$, выполняется по формуле:

$$\mu''(P_{вкл}) = \max\{\mu_i'(P_{вкл})\}, \quad (3)$$

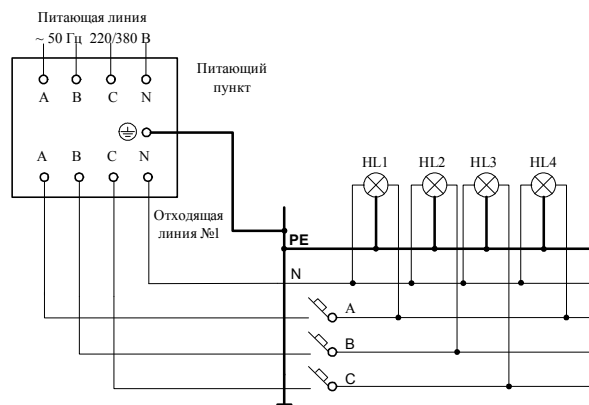


Рис. 3. Схема групповых линий при трехфазной системе с нулевым проводом и питанием светильников фазным напряжением: HL1–HL4 – светильники наружного освещения

где $\mu'_i(P_{вкл})$ – функция принадлежности, полученная в результате активизации правил нечетких продукций.

В качестве дефазификации или приведения к четкости применяется метод наибольшего (правого) модального значения:

$$P_{вкл} = \max \{P_{вклт}\}, \quad (4)$$

где $P_{вклт}$ – модальное значение (мода) нечеткого множества для выходной переменной $P_{вкл}$ после аккумуляции, определяется следующим образом:

$$P_{вклт} = \arg \max \{\mu''(P_{вкл})\} \quad (5)$$

где $P_{вкл} \in [0, 100]$.

В соответствии с рассчитанным значением мощности включения $P_{вкл}$ формируется набор команд телеуправления для питающего пункта, который выводит светильники на заданный режим работы. В программной среде MATLAB была разработана имитационная модель управления электропитанием светильников [2]. На рис. 2б представлен идеализированный входной сигнал естественной освещенности в виде полуволны синусоиды, а на рис. 2а результат работы системы.

Экономия электрической энергии, в зависимости от погодных условий, а именно текущей облачности, может составлять до 50 процентов в часы восхода и заката, или пяти процентов суточного потребления.

Силовые линии наружного освещения разделяются на: питающие, распределительные и групповые. Питающие – это линии от распределительного устройства тяговой подстанции до вводного устройства (ВУ), вводно-распределительного устройства (ВРУ), главного распределительного щита (ГРЩ). Распределительные сети от ВУ, ВРУ, ГРЩ до распределительных пунктов, групповых щитов и пунктов питания наружного освещения. Групповые сети это линии от групповых щитов (питающих пунктов) до светильников. Пример схемы групповых линий при трехфазной системе с нулевым проводом и питанием светильников от фазного напряжения представлен на рис. 3 [3].

Как видно из рис. 3, подключение светильников осуществляется с чередованием фаз питающего напряжения А, В, С. Это делается для того, чтобы уменьшить коэффициент неравномерности освещения при отключении одной или двух фаз в результате аварии. По этой же причине при монтаже силовых линий не подключают установленные рядом светильники к одной фазе питающего напряжения. К то-

му же такой способ подключения эффективен при использовании ночного режима с отключением части светильников и позволяет регулировать общее потребление электроэнергии в зависимости от текущего значения естественной (солнечной) освещенности и времени суток.

Во время функционирования электроэнергетической системы наиболее опасными являются повреждения и ненормальные режимы работы [4]. Для сведения ущерба от повреждений к минимуму необходимо за очень короткие промежутки времени провести аварийные отключения поврежденных участков энергосистемы от неповрежденных. Обеспечение безопасной работы электрических сетей наружного освещения выполняется при помощи защиты от перегрузки и короткого замыкания.

Защита сетей должна выполняться в соответствии с требованиями ПУЭ. Ответвления к осветительным приборам (ОП) необходимо защищать индивидуальными предохранителями или автоматами, если защитный аппарат обслуживает более 20 осветительных приборов на фазу. В цоколе каждой опоры рекомендуется устанавливать предохранители или автоматы, обеспечивающие защиту ответвлений кабельного ввода к ОП. В распределительных линиях, питающих ОП с РЛВД, номинальный ток плавкой вставки должен быть не менее 1,25 рабочего тока, а уставка автомата с тепловым или комбинированным расцепителем – не менее 1,5 рабочего тока. Для надежного отключения линий электрических сетей напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью при коротких замыканиях (КЗ) ток КЗ должен быть не менее трехкратного значения номинального тока расцепителя автоматического выключателя (автомата) или плавкой вставки предохранителя, установленных в начале каждой линии [1].

Линии, имеющие большую протяженность, а, следовательно, значительное сопротивление проводников, ограничивающее ток КЗ, должны проверяться на надежность отключения при однофазных КЗ, происходящих в конце линии. Ток двух- и трехфазного КЗ превышает ГОК однофазного, и линия, отвечающая условиям отключения при однофазном КЗ, дополнительной проверки на многофазное КЗ не требует [5].

Питающие пункты, как часть электроэнергетической системы наружного освещения, обеспечены селективной трехуровневой токовой защитой:

первый уровень – автоматические выключатели (электромагнитный и тепловой расцепители). Для

этого определяется номинальный ток автоматических выключателей отходящих линий наружного освещения;

второй уровень — программная токовая защита (программно в виде уставок задаются максимальные фазные токи, и время, по истечении которого срабатывает защита и происходит отключение);

третий уровень — аппаратная токовая защита (250 процентов номинального тока за время 100 мс).

Кроме токовых защит, которые отключают групповые отходящие линии от питающего пункта и тем самым изолируют поврежденный участок, диспетчер системы может отслеживать возникновение ненормальных режимов работы при помощи автоматизированного рабочего места (АРМ). На АРМ в виде мнемосхем и графиков отображаются текущие измеренные значения необходимых для контроля параметров с заданными порогами, а в случае выхода за них происходит цветовая и звуковая сигнализация, а также запись события в протокол. При получении такого сообщения диспетчер может отключить участок с ненормальным режимом работы посредством команды телеуправления для предотвращения повреждения оборудования.

Также немаловажную роль в своевременном устранении неисправных линий играет диагностика целостности электрических сетей наружного освещения. Одним из методов является посылка НЧ сигнала на участке линии. При этом передатчик устанавливается на последней опоре наружного освещения, а приемник в начале линии. Каждый передатчик имеет свой уникальный адрес, а в питающем пункте устанавливается контроллер линии, который выполняет следующие функции: обеспечение напряжением питания датчиков; прием информации от датчиков; хранение информации, полученной от датчиков; связь по интерфейсу RS-485 с контроллером питающего пункта; связь по интерфейсу RS-232 с внешним устройством (персональным компьютером).

Контроллер устанавливается на проводных и кабельных линиях наружного освещения, удовлетворяющих следующим требованиям:

— в качестве осветительных нагрузок должны использоваться натриевые или ртутные лампы высокого давления ДНаТ или ДРЛ;

— количество натриевых или ртутных ламп высокого давления ДНаТ или ДРЛ между изделием и датчиком линии должно быть не более 30 штук;

— длина контролируемой линии освещения должна быть не более 3 км;

После появления напряжения питания в датчике запускается таймер, который отсчитывает время в соответствии с установленным адресом. По истечении этого времени датчик формирует и передает в линию наружного освещения сигнал. Контроллер принимает (не принимает) сигнал датчика, что свидетельствует об исправности (неисправности) линии НО.

Таким образом, если контроллер линии не получает сигнал с передатчика в течение определенного времени, диспетчеру выдается сообщение об обрыве на этом участке.

Помимо диагностики целостности линии необходимо контролировать работоспособность ламп распределенных объектов системы наружного освещения. В настоящее время такой контроль происходит путем периодического включения в дневное

время линий и визуального осмотра выездными бригадами службы наружного освещения. По ГОСТу допускается 5 % неработающих светильников, при этом возникает проблема выбора эффективного периода осмотра, чтобы не нарушать требования ГОСТа и не проводить такие осмотры вхолостую. На базе автоматизированной распределенной системы наружного освещения можно предложить следующий способ определения процента неисправных ламп в системе, $N_{\text{неиспр, \%}}$:

$$N_{\text{неиспр, \%}} = \frac{N_{\text{общ}} - N_{\text{испр}}}{N_{\text{общ}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $N_{\text{испр}}$ — количество исправных ламп;

$N_{\text{общ}}$ — общее количество ламп.

Зная общий ток, потребляемый всеми лампами $I_{\text{общ}}$ и одной лампой $I_{\text{лампы}}$ в заданном режиме работы (полной или неполной мощности), можно определить требуемые значения количества исправных ламп:

$$N_{\text{испр}} = \frac{I_{\text{общ}}}{I_{\text{лампы}}}. \quad (7)$$

В свою очередь, программное обеспечение АРМа после такого расчета может предупреждать диспетчера системы о необходимости профилактических работ по замене ламп наружного освещения при достижении допустимого порога в пять процентов, что сделает более эффективным планирование работ службы наружного освещения.

Таким образом, защита и диагностика групповых электрических сетей в электроэнергетической системе наружного освещения выполняет важную функцию в обеспечении её безопасной работы, сохранности оборудования в случае повреждений и своевременное устранение неисправности линий, а фазирегулирование позволяет экономить электроэнергию и эффективно управлять наружным освещением.

Библиографический список

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 312 с. — (Проблемы искусственного интеллекта)
2. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB/Ю. Лазарев. — СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. — 512 с.
3. Справочная книга по светотехнике/Под ред. Ю.Б. Айзенберга. — М.: Знак, 2006. — 972 с.
4. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 800 с.
5. Правила устройства электроустановок. — Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2008. — 511 с.

КРАСНОКУЦКИЙ Иван Николаевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Компрессорные и холодильные машины и установки», директор нефтехимического института.

Адрес для переписки: e-mail: krasnyii@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2010 г.

© И. Н. Краснокуцкий, В. А. Юша

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ПО ПРОВЕРКЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОВИБРАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРИВОДОМ

В статье рассматривается экспериментальный стенд по проверке характеристик маловибрационного поршневого компрессора с комбинированным приводом. Описаны: общая схема стенда, компоновочная схема привода компрессора, вопросы обеспечения точности сборки и изготовления отдельных узлов привода, а также фрагмент технологического процесса изготовления наиболее ответственных деталей. Это дает представление о трудоемкости изготовления рассматриваемого привода.

Ключевые слова: поршневой компрессор, привод поршня, точность, маловибрационный.

Ресурс работы и экономичность поршневых компрессоров в большой степени зависит от величины боковых сил и вибрации, действующих на поршень [1, 2].

Снижения боковых сил в ЦПГ поршневых компрессоров добиваются различными способами. Наиболее простой из них — применение крейцкопфа в направляющем механизме поршня. Это техническое решение было использовано еще в 30-х годах прошлого столетия для бесшумных лабиринтных компрессоров, сжимающих чистые газы [3], и продолжает предлагаться в различных вариантах.

Другой способ состоит в применении λ-образных механизмов рычажного типа (например, кривошипно-кулисных [4], наиболее современная интерпретация подобного механизма предложена фирмой «Бауэр» [5]), двухвальных приводов и орбитального механизма С. С. Баландина [6], который был успешно реализован в крупных холодильных компрессорах. Однако в этих машинах в связи с неизбежной погрешностью изготовления сложного коленчатого вала так и не удалось осуществить полного устранения боковых сил действующих на поршень [7, 8]. Предпринимались также попытки применения линейных двигателей (электромагнитных, пневматических и гидравлических). Однако, в силу многочисленных широко известных сложностей, связанных с использованием таких конструкций в приводах компрессорных машин, их применение ограничено.

Обычно снижение вибрационных нагрузок на поршневые машины производят за счет оптимального распределения масс в элементах конструкции и введением дополнительных противовесов и виброгасящих устройств, однако это требует усложнения конструкции [9].

Одновременное решение проблем исключения боковых усилий в ЦПГ и вибрации со стороны неуравновешенных масс возможно в схеме поршневой машины с комбинированным приводом [10], в которой действующие силы и моменты инерции дви-

жущихся масс теоретически полностью уравновешены. Впервые попытки анализа работы этой конструкции на основе математической модели, учитывающей термодинамику рабочих процессов и динамику механизма привода, приведены в [11 – 13].

Анализ существующих конструкций привода компрессоров позволил сформулировать принципиальную схему конструкции привода малошумного безвибрационного компрессора. Конструкции, описанные в [14, 15], имеют большие габариты и требуют изготовления большого числа оригинальных деталей с высокой точностью. В связи с этим большой интерес представляет использование серийных образцов малорасходных компрессоров, объединенных в схему с комбинированным механизмом привода.

На рис. 1 изображена расчетная схема одноступенчатого двухцилиндрового компрессора с комбинированным механизмом привода, образованного из двух серийных образцов одноступенчатых поршневых компрессоров МСВ 190/1,50-1 фирмы «Aiken», привод которых объединен единой рамкой (кулисой) 6.

Условие динамического равновесия такой механической системы определяются выражением:

$$\vec{F}_{П1} + \vec{F}_{П2} + \vec{F}_{КР1} + \vec{F}_{КР2} + \vec{F}_{ИН.К} + \vec{G} + \vec{F}_{ИН.КШ1} + \vec{F}_{ИН.КШ2} = 0,$$

где $F_{П1,2}$ — газодинамические силы от перепада давления на поршне, $F_{КР1,2}$ — силы давления кривошипа на кулису, $F_{ИН.КШ1,2}$ — сумма сил инерции вращательного движения кривошипа и противовеса, G — суммарный вес подвижных частей механизма движения и поршней со штоками.

При назначенных геометрических размерах, материалах деталей и режиме работы (частоты вращения приводных валов, давления всасывания и нагнетания) данное уравнение позволяет произвести расчеты противовесов и выполнить условия прочности деталей.

Для проведения экспериментальных исследований был рассчитан, спроектирован и изготовлен модельный образец компрессора со следующими основ-

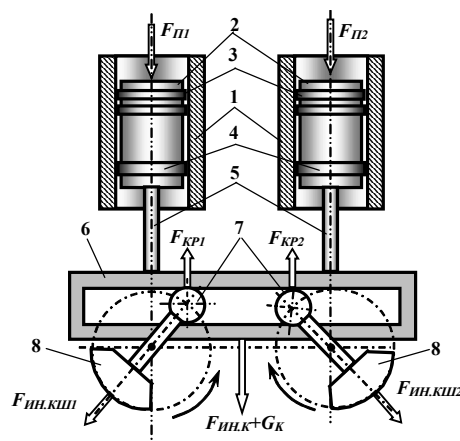


Рис. 1. Расчетная схема комбинированного привода компрессора:
1–цилиндр; 2–поршень; 3–уплотнительные кольца; 4–направляющие опорные кольца;
5–шток; 6–кулиса (рамка); 7–кривошип; 8–противовес

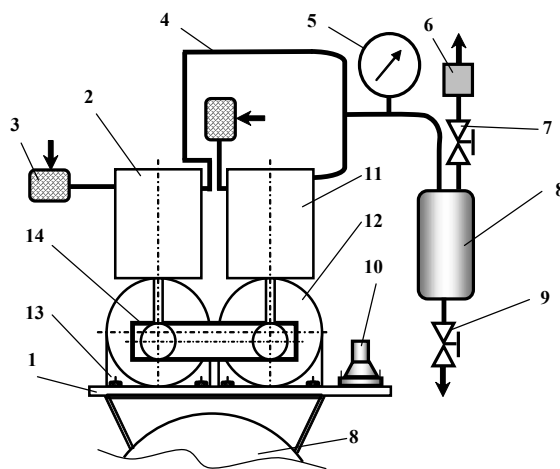


Рис. 2. Общая компоновка стенда:
1–жесткая плита; 2–компрессор; 3–всасывающие фильтры; 4–линия нагнетания; 5–манометр нагнетаемого давления;
6–расходомер (газовый счетчик); 7–вентиль для регулировки давления нагнетания; 8–ресивер; 9–вентиль для слива
конденсата; 10–вибродатчик; 11–цилиндр; 12–электродвигатель; 13–корпус; 14–рамка (кулиса)

ными параметрами: диаметр цилиндра 50 мм, ход поршня 24 мм, давление нагнетания 8 бар. Привод компрессора осуществляется от двух одинаковых электродвигателей, имеющих противоположное вращение валов.

Назначение компрессора — проверка основных положений математической модели и получение сведений, расчет которых затруднен или на данном этапе исследований невозможен или не рационален.

На рис. 2 показана общая компоновка стенда для исследования характеристик компрессора. Компрессор зафиксирован на общей плите 1 с помощью штатного болтового соединения. Единая плоскость крепления получена фрезерованием поверхности плиты с допуском плоскостности 0,01 мм.

Для оценки амплитуды и частоты вибрации применяется вибродатчик 10 индукционного типа, установленный на плите.

При вращении валов двигателей с установленными на них кривошипами, подшипники, размещенные на кривошипах, совершая вращательное движение относительно оси вала двигателя и прокатываясь по кулисе, преобразуют это движение в возвратно-поступательное движение кулисы с закрепленными на ней штоками. Это обеспечивается прокатыванием наружной обоймы подшипника по верхней и нижней

направляющим, которые являются частью рамки (кулисы).

Для обеспечения уравнивания компрессора использовались как штатные противовесы готовых изделий, так и дополнительные противовесы. Для более точного расчета последних было произведено точное взвешивание всех подвижных частей.

В модельном компрессоре требуется обеспечить плавное перемещение эксцентриков кривошипов 7 (рис. 1) по рамке 6 без проскальзывания, что в свою очередь позволит снизить шумность работы и нагрев рабочих поверхностей направляющих рамки и подшипников кривошипов. Это условие было выполнено с применением специальных конструктивных и технологических методов.

Для обеспечения заданных характеристик работы компрессора требуется обеспечить минимальный зазор (порядка 0,5 мм и менее) между поршнем и гильзой цилиндра. Заданная точность обеспечивается обработкой указанных деталей. Для точного центрирования поддерживающего пояска (направляющих колец 4, рис. 1) необходимо обеспечить его соосность с поршнем, как по наружному диаметру, так и по внутреннему. Точность центрирования обеспечивается обработкой за одну установку из проката круглого сечения (рис. 3). На первом технологическом

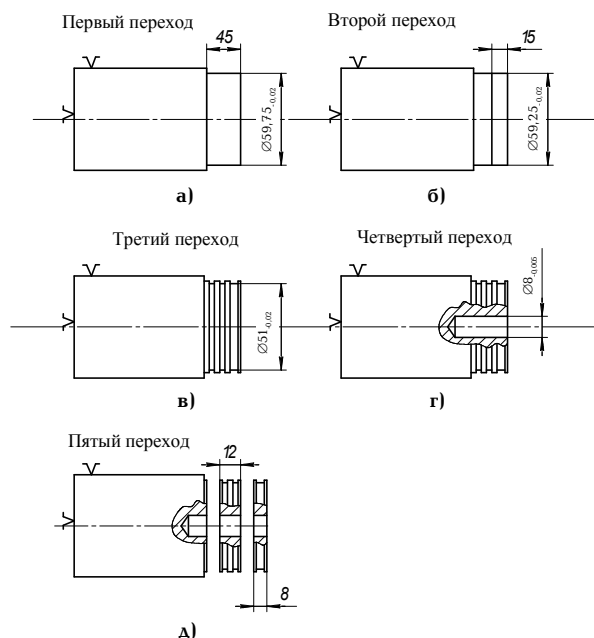


Рис. 3. Фрагмент технологического процесса изготовления поршня и крейцкопфа

переходе обрабатывается наружная цилиндрическая поверхность заготовки в размер $\text{Ø}49,75_{-0,02}$ (рис. 3а). На втором переходе обрабатывается $\text{Ø}49,25_{-0,02}$ на заданную длину (рис. 3б). На третьем переходе прорежутся канавки для установки компрессионных колец (рис. 3в). На четвертом переходе сверлится, зенкеруется и развертывается отверстие $\text{Ø}8_{-0,005}$ (рис. 3г) и затем производится отрезка крейцкопфа и поршня от заготовки (рис. 3д).

Пробные пуски компрессора позволили подтвердить его работоспособность и возможность стенда измерять основные параметры компрессора, в том числе его производительность, давление нагнетания, частоту и виброускорение колебаний конструкции.

Библиографический список

1. Болштянский, А. П. Особенности проектирования бессмазочного поршневого вакуумного насоса / А. П. Болштянский, В. Е. Щерба // Вакуумная техника и технология. — 1999. — Т. 9, № 2. — С. 31–36.
2. Болштянский, А. П. The influence of the accuracy of fabrication of main geometric parameters on features of piston for vacuum pump with gas support of piston / А. П. Болштянский, В. Е. Щерба // Вакуумные технологии и оборудование: сб. докл. 4-го Междунар. симпозиума. — Харьков, 2001. — С. 222–224.
3. Angst, R. A. The labyrinth piston compressor // S. Afr. Mech. Eng. — 1979. — 29, № 8. — P. 262–270.
4. Геронимус, Я. Л. Очерки о работах корифеев русской механики. — М.: Гос. изд-во технико-теоретич. лит., 1952. — 519 с.

5. Kompressorenbau mit Gelenk-Geradeausführung // Metallhandwerk + Technik. — 1980. — № 2. — S. 124–129.

6. А. с. 118471 СССР, МКИ⁴ F 01 В 9/02. Двигатель внутреннего сгорания с бесшатунным механизмом / С. С. Баландин. — № 591328/24-06; заявлено 4.11.58; опубл. 10.12.73, Бюл. № 47.

7. Линдберг, А. Ф. Эффективность применения холодильных компрессоров без смазки / А. Ф. Линдберг, Ф. Д. Голиков, С. И. Федулов // Рыбное хозяйство. — 1981. — № 7. — С. 66–68.

8. Линдберг, А. Ф. Характеристики бесшатунного холодильного компрессора / А. Ф. Линдберг, С. А. Путилин, А. Е. Семенов // Интенсификация производства и применения искусственного холода: тез. докл. Всесоюз. науч.-практич. конф. — Л., 1986. — С. 10.

9. Пластилин, П. И. Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет. — М.: Колос, 2000. — 456 с.

10. Пат. № 2098662 РФ, МКИ⁶ F 04 В 25/00, 35/00. Бесконтактный компрессор / А. П. Болштянский, В. Е. Щерба; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 95114243/06; заявл. 08.08.1995; опубл. 10.12.1997, Бюл. № 34.

11. Болштянский, А. П. Поршневой насос с комбинированным приводом / А. П. Болштянский, В. Е. Щерба, Е. А. Лысенко // Современное состояние и перспективы развития гидромашиностроения в XXI веке: тр. Международной НТК. — СПб, 2003. — С. 386–388.

12. Болштянский, А. П. Влияние погрешности изготовления кривошипов на динамические характеристики поршневого форвакуумного насоса с комбинированным приводом / А. П. Болштянский, Е. А. Лысенко, В. Е. Щерба // Вакуумная техника и технология: Материалы XIII Науч.-технич. конф. с заруб. участием. — М.: МГИЭМ, 2006. — С. 110–114.

13. Болштянский, А. П. Поршневая машина объемного действия с уравновешенным механизмом привода / А. П. Болштянский, В. Е. Щерба, Е. А. Лысенко // Гидрогазодинамика, гидравлические машины и гидропневмосистемы: тр. Междунар. науч.-техн. и науч.-методич. конф. — М.: МЭИ, 2006. — С. 153–156.

14. Пат. № 2296241. Российская Федерация, МКП F04B 25/00. Поршневой компрессор / Болштянский, А. П., Щерба В. Е., Лысенко Е. А.; заявитель и правообладатель ОмГТУ. — № 2005129839/06; заявл. 26.09.2005; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9. — 9 с.: ил.

15. Пат. № 2334877. Российская Федерация, МКП F01B 1/10, F16H 21/36. Машина объемного действия / Болштянский, А. П., Щерба В. Е., Лысенко Е. А.; заявитель и правообладатель ОмГТУ. — № 2006139729/06; заявл. 09.11.2006; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27, 6 с.: ил.

НОСОВ Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры гидромеханики и транспортных машин.

НЕСТЕРЕНКО Григорий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры гидромеханики и транспортных машин.

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 30.06.2010 г.

© Е. Ю. Носов, Г. А. Нестеренко

О ВЫБОРЕ СХЕМ И РАЗРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ И ТЯЖЕЛЫХ ТОПЛИВ В ДИЗЕЛЯХ. ЧАСТЬ 2

В статье выполнен анализ перспектив добычи и потребления нефти как сырья для производства топлива, используемого в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Показана неизбежность поиска альтернативы нефтяному топливу. Выполнен подробный анализ схем конструктивных решений систем топливоподачи в дизельных двигателях, работающих на нетрадиционных (альтернативных) топливах.

Предложены новые технические и технологические решения по использованию как легких, так и тяжелых топлив в дизельных двигателях — основного привода транспортных средств.

Ключевые слова: нетрадиционные топлива, дизель, топливоподача, форсунка, система впрыска и регулирования.

Весьма обстоятельный обзор и обобщение схемных решений систем топливоподачи смесевых топлив в дизелях выполнены в работе [1 — 3].

На рис. 1 показана типовая схема топливной системы дизеля для работы на маловязких топливах (ДМЭ, газовых конденсатах, спиртах, бензине, топливах из легких углеводородных фракций и их смесей с дизельным топливом и др.). Ее отличия от обычной схемы системы питания дизеля сводятся к следующим. Для предотвращения просачивания топлива с малой вязкостью через плунжерные пары к подкачивающему насосу и насосу высокого давления подводится под давлением масло, образующее масляные затворы. В топливном баке устанавливают дополнительный прокачивающий насос, от которого топливо поступает к подкачивающему насосу под некоторым давлением. В системах питания отечественных много-топливных дизелей в качестве прокачивающего насоса используют агрегат БЦН-1 центробежного типа.

Вследствие наличия дополнительного насоса (или конструктивных изменений в основном топливоподающем насосе) на линии подкачивания создается повышенное давление и устраняется парообразование. Например, топливоподкачивающий насос дизеля ЯМЗ-238М (многотопливная модификация) регулируют на давление 0,35 МПа. Дополнительный насос начинает работать одновременно с включением стартера, поэтому из полости насоса удаляются паровые пробки, которые могли образоваться при стоянке двигателя.

При переходе с дизельного топлива на маловязкие, несмотря на лучшую испаряемость последних, требуются несколько большие углы опережения впрыска из-за повышенной сжимаемости и худшей воспламеняемости, т. е. меньшего ЦЧ. Однако, чтобы избежать усложнения конструкции, системы топливоподачи дизелей обычно не имеют устройств для быстрого изменения угла опережения в зависимости

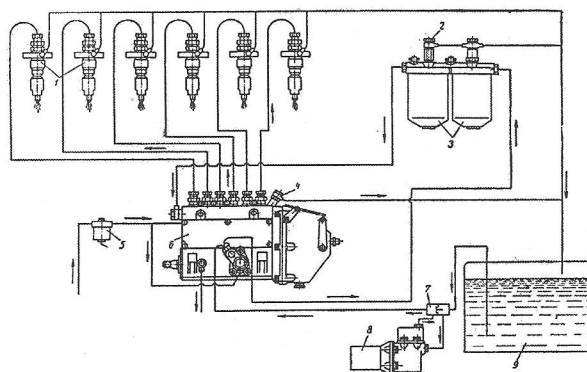


Рис. 1. Схема топливной системы дизеля для работы на маловязких топливах
1— форсунки; 2—перепускной клапан; 3—топливные фильтры; 4—редукционный клапан; 5—масляный фильтр;
6—топливный насос с регулятором и топливоподкачивающим насосом; 7—распределительная коробка;
8—прокачивающий насос; 9—топливный насос

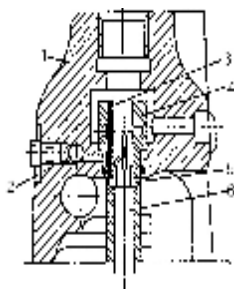


Рис. 2. Конструктивная схема принудительной смазки плунжерных пар топливного насоса дизеля
1 – корпус топливного насоса; 2 – канал для подвода масла;
3 – канал во втулке плунжера; 4 – втулка плунжера;
5 – кольцевая выточка во втулке; 6 – плунжер

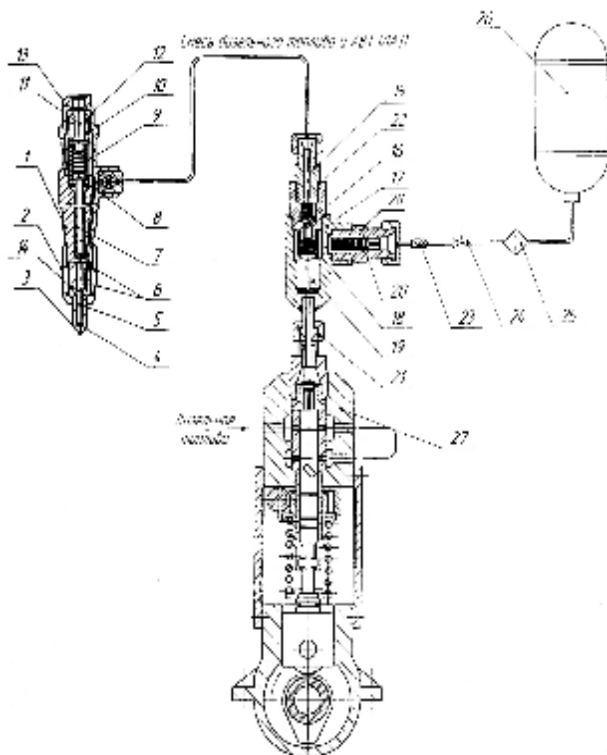


Рис. 3. Схема системы топливоподготовки, топливоподдачи, регулирования и дозирования смесевых топлив в дизелях
1 – корпус форсунки; 2 – гайка накидная; 3 – отверстие сопловое; 4 – корпус запорной иглы; 5 – игла распылителя; 6 – каналы; 7 – шток; 8 – тарелка пружины; 9 – пружина; 10 – стакан форсунки; 11 – винт регулировочный; 12 – контргайка форсунки; 13 – колпак форсунки; 14 – корпус распылителя; 15 – штуцер смесового топлива; 16 – клапан штуцера; 17 – корпус приставки к ТНВД; 18 – пружина; 19 – поршень приставки; 20 – клапан штуцера подачи АВТ; 21 – соединение ниппельное; 22 – прокладка уплотнительная; 23 – клапан регулирующий начального давления; 24 – клапан регулирующий с дистанционным управлением; 25 – фильтр для АВТ; 26 – баллон для АВТ; 27 – ТНВД дизеля; 28 – штуцер подачи АВТ

от сорта потребляемого топлива. Установочные углы опережения впрыска, как правило, выбирают промежуточными между требуемыми для крайних топлив, на которых дизель должен работать.

При впрыске сжиженного газа в жидкой фазе с помощью дизельной топливной аппаратуры необходимо принимать меры по обеспечению надежной работы ее прецизионных элементов и устранению протечек жидкого газа по зазорам в плунжерных парах или по отсосу этого просочившегося и испарившегося газа.

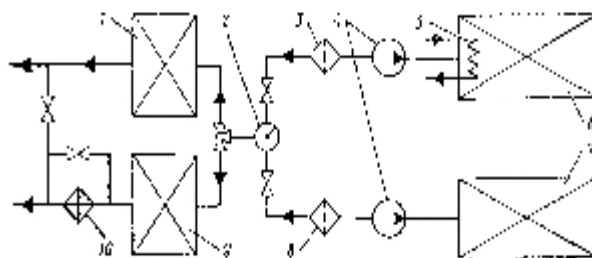


Рис. 4. Принципиальная схема системы смешения топлив
1 – цистерна расходная вспомогательных двигателей;
2 – смеситель-дозатор УЗГС-5000; 3 – фильтр тяжелого топлива; 4 – насос шестеренный; 5 – подогрев тяжелого топлива; 6, 7 – запасные цистерны тяжелого и дизельного топлива; 8 – фильтр дизельного топлива; 9 – расходная цистерна главных двигателей; 10 – дополнительный подогреватель смесового топлива

Одним из способов, позволяющих повысить надежность работы плунжерных пар и устранить протечки газа, является применение масляных затворов (рис. 2). В этом случае в плунжерных парах и корпусе насоса выполняются дополнительные канавки и сверления, по которым масло из масляной системы двигателя через специальный фильтр подводится к плунжерным парам топливного насоса. Подобные конструктивные решения целесообразны при создании многотопливных двигателей различного назначения.

Переводить дизель на сжиженный газ по методу непосредственного впрыска можно также с помощью специальных приставок [4], представляющих клапанные устройства, монтируемые на каждую секцию топливного насоса. На основе анализа, обобщения и отбора нами разработана конструктивная схема (рис. 3) топливоподдачи, дозирования и регулирования смесового топлива (смеси дизельного топлива и альтернативных маловязких: газового конденсата, ДМЭ, спиртовых (этанола, метанола), топлив из легких углеводородных фракций, бензина, СНГ и др.). Конструкция приставки, аналогична предложенной, построенной и испытанной на кафедре ДВС Одесского института морского флота [4]. В эксплуатации приставка использовалась для подачи смесей дизельного топлива и сжиженного нефтяного газа на дизеле 6ДР 30/50. В этом случае регулировка топливного насоса и двигателя несколько усложняется, сохраняется необходимость хранения двух топлив, возрастает расход дизельного топлива в качестве запального и др. Однако предложенное нами изменение схемы элементами регулирования и управления (позиции 23, 24, 25) позволяют упростить эксплуатацию системы, включая дозирование смеси.

Наибольшее распространение системы смешения дизельного и тяжелых марок топлива (мазатов, ДТ (ГОСТ 1667-68), газотурбинных, судовых высоковязких топлив и растительных масел и др.) нашли применение на судах морского и речного флота [3, 5–6]. Заметим, что использование АВТ на основе растительных масел и их эфиров находит все большее применение в транспортных дизелях [7–8].

Судовые системы смешения топлив должны удовлетворять следующим требованиям: готовить высокостабильные топливные смеси с любым заданным содержанием тяжелого топлива; вырабатывать топливные смеси с дисперсностью механических примесей не более 6 мкм; позволять автоматизацию процессов заполнения расходной цистерны главных двига-

телей; обеспечивать необходимый подогрев топливной смеси перед главным двигателем (до 40–45°C) при содержании в ней более 30 % тяжелого топлива; позволять отключать электродвигатель насоса тяжелого топлива при неработающем насосе дизельного топлива или аварийную сигнализацию при отказе одного из насосов, подающих исходные топлива к смесителю-дозатору.

Технологическая схема смешения топлив изображена на рис. 4 [5–6]. В ней предусмотрены: местный подогрев тяжелого топлива в запасной цистерне до 30–5°C; очистка исходных топлив в путевых топливных фильтрах; обработка исходных топлив в ультразвуковом смесителе; смешение исходных топлив в заданном соотношении; подогрев топливной смеси перед главными двигателями в путевом теплообменнике. По той же схеме дизельное и тяжелое топлива из танков запаса 7 и 6 шестеренными насосами 4 под давлением 0,6–1,2 МПа подаются к смесителю-дозатору УЗГС-5000 2, где они смешиваются в заданных пропорциях и одновременно обрабатываются ультразвуком. Готовая смесь поступает в расходные цистерны главных 9 или вспомогательных 1 двигателей, что позволяет готовить смесь оптимального состава для разных потребителей. При отрицательных температурах наружного воздуха предусмотрен местный подогрев тяжелого топлива 5 в запасной цистерне до 30–35°C. Исходные топлива очищают топливными фильтрами 3 и 8, а топливную смесь — штатными фильтрами, установленными на двигателях.

При повышенном доле содержании тяжелого топлива (35 % и более) в смеси, подаваемой в главные судовые двигатели типа ЧРН 36/45 и НФД 48, предусматривается ее подогрев в путевом теплообменнике 10 до 40–45°C. В качестве теплоносителя рекомендуется [6] использовать воду из внутреннего контура охлаждения главных двигателей. Рекомендуемая доля (%) тяжелого топлива ДТ (ГОСТ 1667-68) или флотского мазута марки Ф-5 (ГОСТ 10585-75) в топливных смесях для различных типов двигателей: 6ЧРН36/45, НФД48-40-45; 6Л275, 6С275, НФД36-30-35; Ч105/13, Ч18/22, 6С160, 6Л160, 6Л110-25-30; ВВ12/14, НФД24, ЗД6, ЗД12-20-25 составляет 25–30 [6]. Наличие в составе системы смешения смесителя-дозатора УЗГС-5000 позволяет решать следующие задачи: обеспечить высокую стабильность получаемых — топливных смесей; готовить смесь с различным содержанием тяжелого топлива в зависимости от типа двигателей и условий эксплуатации судна; производить ультразвуковую обработку топливной смеси, что снижает ее потери на фильтроэлементх и уменьшает нагарообразование на деталях цилиндропоршневой группы дизелей; отказаться от сепарирования тяжелого топлива при содержании в нем до 2 % воды.

Практика эксплуатации смесителей показала, что для судовых условий наиболее приемлемое решение для создания высокостабильных топливных смесей — использование унифицированных высокоэффективных смесителей-дозаторов ультразвукового типа [5–6].

Выбор ультразвукового смесителя-дозатора в первую очередь связан с выбором места приготовления смеси: на судне или на бункеровочной базе. Приготовление топливной смеси на бункеровочной базе упрощает снабжение судов топливом и снижает объем работ по дооборудованию. В остальном же преимущества на стороне приготовления смесей непосредственно на судне. При этом в первую очередь значительно ниже требования к стабильности смесей, так как резко сокращается время между при-

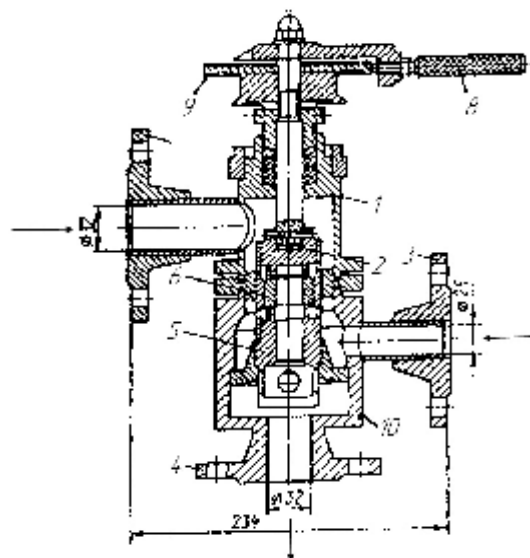


Рис. 5. Смеситель-дозатор УЗГС-5000
1—корпус; 2, 5, 6—резонаторы I, II ступеней, промежуточный; 3, 7—патрубки входные; 4—патрубок выходной; 8—рукоятка; 9—шкала; 10—корпус нижний

готовлением смеси и ее использованием. Во-вторых, приготовление смеси на борту позволяет заметно повышать долю тяжелого топлива в составе смеси. Это связано с тем, что на судах обычно главные двигатели среднеоборотные, а вспомогательные — высокооборотные, и для них требуется более качественное топливо. Поэтому для главных двигателей можно готовить смесь с более высоким содержанием тяжелого топлива (на 10–30 %), чем для вспомогательных. В-третьих, при приготовлении смеси непосредственно на судне можно легко обеспечить работу дизелей на оптимальном для всех условий эксплуатации составе смеси. Для приготовления топливных смесей на судах рекомендуется использовать ультразвуковые гидродинамические смесители-дозаторы УЗГС-5000, разработанные Куйбышевским филиалом ВНИИ НП (рис. 5) [5–6], эффективность работы которых проверена в эксплуатации на судах пароходства «Волготанкер». Смеситель подключен к судовой системе топливоподготовки.

Технические данные смесителя-дозатора УЗГС-5000:

- | | |
|--|-----------|
| 1. Подача по сумме двух потоков, м³/ч | 1,0 — 6,0 |
| 2. Давление топлив на входе в смеситель, МПа | 0,4 — 1,0 |
| 3. Подача насосов, подающих исходные топлива в смеситель, м³/ч | 1,5 — 3,0 |
| 4. Масса смесителя, кг | 15 |

Смеситель состоит из сборного стального корпуса 1 с двумя входными 3 и 7 и одним выходным 4 патрубками. Внутри корпуса вмонтированы 3 резонатора ультразвука: резонаторы I и II ступени 2, 5 и промежуточный резонатор 6.

Принцип действия УЗГС-5000 основан на интенсивном высокодисперсном перемешивании движущихся под давлением потоков смешиваемых топлив в резонаторах, где энергия от перепада давления потоков преобразуется в энергию ультразвуковых колебаний благодаря знакопеременному торможению набегающих друг на друга под острым углом в вихревой камере резонаторов струй топлива. Из-за пульсации потоков жидкости с ультразвуковой частотой (18–54 кГц) возникают кавитационные

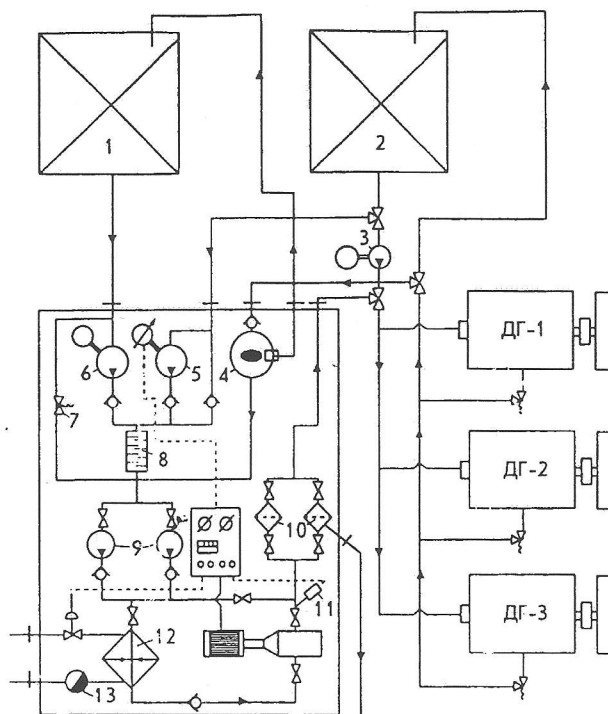


Рис. 6. Смешивательная установка MCM-20 Imo-Marine

1, 2—цистерны соответственно тяжелого и дизельного топлив; 3, 5, 6, 9—насосы; 4—деаэратор; 7—клапан;
8— статический смеситель; 10—фильтры; 11—датчик температуры; 12—подогреватель;
13—конденсационный горшок

частотой (18 – 54 кГц) возникают кавитационные зоны в местах торможения потоков, что приводит к высокодисперсному дроблению и перемешиванию жидкостей.

Дизельное и тяжелое топлива дозируют посредством регулировки проходных сечений между корпусами резонаторов I и II ступени и промежуточным резонатором. Резонаторы перемещаются вдоль оси корпуса при вращении рукоятки смесителя 8.

Для очистки дизельного топлива (рис. 4) рекомендуется использовать путевой фильтр, в котором в качестве фильтрующего элемента применены пластины из влагопоглощающего синтетического материала – технического пеновинилформала (ТПВФ). Для очистки тяжелого топлива предлагается использовать серийно выпускаемый фильтр марки ФГН-30. При повышенном долевом содержании тяжелого топлива в смеси, питающей главные двигатели, предусматривается ее подогрев в путевом теплообменнике до 40 – 45°С. Рекомендуемая система очень проста, обеспечивает экономию 2 – 3 % топлива (теряемого при сепарировании) и способствует решению экологических проблем, связанных с появлением большого количества отходов при сепарации.

Испытанный на стенде гидродинамический ультразвуковой диспергатор [5 – 6] создает небольшие звуковые давления и зоны кавитации. Однако анализ показал, что в этом отношении предпочтительным является использование ультразвукового гидродинамического смесителя марки УЗГС-5000. Он прост в изготовлении и эксплуатации, позволяет легко регулировать компонентный состав смесей и создает значительные кавитационные зоны в смешиваемых топливах. Испытания подтвердили высокую эффективность смесителя УЗГС-5000. Приготовленные им смеси во всех случаях отличались высокой стабильностью [5 – 6]. Поэтому он и рекомендован к исполь-

зованию в системах подготовки топливных смесей для средне- и высокооборотных двигателей судов речного флота.

На судах морского флота [5] для получения топлив с заранее заданной вязкостью используют топливные смеси, которые получают в специальных смесителях статического или динамического типа.

В статическом смесителе потоки смешиваемых топлив делится на отдельные струи и перемешиваются при изменении направления течения струй. Типичным примером статического смесителя является смеситель SMX фирмы «Зульцер». [5] Смеситель состоит из заключенных в корпус последовательно соединенных право- и левосторонних спиралей, вдоль которых протекают легкое и тяжелое топлива. Для создания однородной смеси необходимо, чтобы при прохождении через смеситель топливо совершило 2000 – 4000 оборотов.

В смешивательной установке со статическим смесителем (рис. 6), работающей в автоматическом режиме и обеспечивающей возможность приготовления и подачи смеси непосредственно в дизели, минуя расходную цистерну, существенно сокращается время нахождения смеси в системе. Тяжелое и дизельное топлива из расходных цистерн поступают к винтовым насосам. Насос 5 дизельного топлива снабжен электроприводом с регулируемой частотой вращения, что позволяет при необходимости менять его подачу. Из насосов топлива подаются в статический смеситель, откуда смесь одним из бустерных насосов 9 подается в подогреватель. На выходе подогревателя установлен конденсационный горшок. Температура топлива измеряется датчиком, сигнал которого сравнивается с установкой электронного регулятора $T_{уст}$, соответствующей соотношению компонентов смеси, при котором должна быть обеспечена необходимая вязкость. Если заданная вязкость

Матрица расчета ранга перспективных топлив

Топливо	Фактор			Суммарная скорректированная оценка	Ранг
	Ресурсы	Экологические характеристики	Приспособляемость СЭУ		
	Вес фактора				
	0,73	0,55	0,35		
1.Нефтяные (СМТ, ДТ, СВТЛ)	7,4	3,3	9	10,47	1
2.СНГ(пропан-бутан)	2,2	6,5	4,0	6,55	5
3.Природный газ (метан)	6,0	6,8	3,7	9,41	2
4.Синтетические спирты и жидкий аммиак	2,8	5,2	3,6	6,15	6
5.Водород	2,3	9	2,3	7,43	4
6.СЖТ (синтетическое жидкое топливо из углей)	5,4	3,6	7,5	8,55	3

смеси обеспечивается при температуре, отклоняющейся от $T_{уст}$ — это является свидетельством нарушения в соотношении компонентов смеси (либо в изменении их начальной вязкости). Тогда электронный регулятор выдает сигнал на увеличение или уменьшение частоты вращения вала насоса дизельного топлива. Подача насоса меняется до тех пор, пока достигаемая, благодаря этому, корректировка смеси не обеспечит $T = T_{уст}$. Цель корректировки состоит в том, чтобы заданная вязкость обеспечивалась при заданной температуре.

После фильтров топливо поступает к дизелям. Лишнее топливо из дизелей направляется в деаэрактор, снабженный поплавковым клапаном для выпуска газов, а затем в расходную цистерну. Из деаэратора смесь поступает на всасывание бустерных насосов, где с помощью клапана поддерживается давление 0,1 МПа. При превышении давления (большой возврат от ДГ) излишняя часть смеси сбрасывается на прием к насосу тяжелого топлива 6. Это приводит к изменению соотношения тяжелого и дизельного топлива в смеси и за ним, что в свою очередь фиксируется датчиком и регулятором температуры. Температура топлива уменьшается и становится ниже заданной клапаном 7. Это является свидетельством того, что потребность в дизельном топливе уменьшается. Регулятор частоты вращения уменьшает частоту вращения вала насоса дизельного топлива и его подачу до тех пор, пока не будет достигнут желаемый состав компонентов. В установке предусмотрены байпасные трубопроводы для насоса 5, подогревателя и фильтра, что позволяет использовать бустерные насосы для подачи в дизели чистого дизельного топлива с помощью отдельного насоса 3. Известно, что при снижении нагрузки на дизель качество процессов распыливания и сгорания топлива ухудшается, так как снижаются среднее давление впрыска и давление наддува, а также температура в камере сгорания, поэтому крайне желательно, чтобы состав смеси при достижении нагрузки 30–40 % и менее — облегчался, а при нагрузках, близких к холостому ходу, дизель переходил на работу на чистом дизельном топливе. На этом же топливе желательно останавливать и пускать дизели. В рассматриваемой установке такая возможность предусмотрена: в электронный регулятор состава смеси подается сигнал от установленного на двигателе датчика нагрузки.

Добавим, что выбор перспективных (и альтернативных в том числе) топлив для соответствующей

отрасли, эксплуатирующей дизельные силовые установки должны быть научно обоснованы.

В работе [9] предложена методика построения ранжированного ряда перспективных топлив для судовых дизелей.

Целью построения приоритетного ряда перспективных топлив является оценка очередности дальнейших исследований по определению технологических и экономических показателей использования перспективных топлив в судовых энергетических установках (СЭУ) речфлота. Приоритетный ряд строился на основе экспертных оценок.

Оценки перспективных топлив были получены сопоставлением вариантов использования топлив по десятибальной шкале с учетом трех факторов:

- наличия ресурсов, возможности и сроков массовых поставок на речфлот;
- экологических характеристик использования;
- совместимости с традиционными и перспективными СЭУ, а также сложности приспособления СЭУ и инфраструктуры обеспечения топливом (средств бункеровки).

Значимость (вес) каждого фактора неодинакова. Наилучший вариант в зависимости от суммарной скорректированной оценки

$$x^{\text{скуп}} = \sum_{i=1}^T w_i x_{ij},$$

где x_{ij} — оценки, полученные топливом j по каждому из n факторов; w_i — вес фактора i .

Результаты экспертных оценок сведены в матрицу расчета ранга топлива по суммарной скорректированной оценке (табл. 1).

Анализ матрицы расчета рангов очередности дальнейших исследований перспективных топлив для СЭУ позволяет сделать вывод о том, что величины суммарной скорректированной оценки формируют строгий последовательный ряд неравнозначных топлив.

Из табл. 1 следует также интересный результат, что СЖТ занимает в приоритетном ряду высокое третье место, что подтверждается известными положениями о больших запасах угля в России, о перспективности его переработки в СЖТ при постепенном снижении добычи нефти в России после 2010 г.

Выводы

1. Использование в дизелях топлив, свойства которых существенно отличаются от свойств

стандартных дизельных (ГОСТ 305-82), для работы на которых спроектированы дизели различного назначения (тепловозные, судовые, тракторные, автомобильные, дорожно-строительных машин и т. д.) требует разработки специальных технических и технологических решений по топливоподготовке и топливоподаче, перерегулировки топливной аппаратуры, систем управления дизелем, организации заправки (бункеровки), выполнения комплекса требований по защите окружающей среды, условий эксплуатации и охраны труда.

2. Выбор названных решений (технических, технологических и организационных) должен базироваться на всестороннем сравнительном анализе показателей качества нетрадиционных (альтернативных) топлив и стандартного дизельного с учетом конъюнктуры рынка, вероятных дальнейших перспектив использования.

3. Существенно упрощается эксплуатация дизелей на альтернативных легких и тяжелых топливах созданием и использованием смесевых топлив и технических систем смешения, подачи, пропорционирования и регулирования топливоподдачи в линиях высокого давления.

4. Целесообразно использование в системах топливоподдачи смесевых топлив унифицированных стандартных смесителей-дозаторов и устройств, обеспечивающих автоматизацию управления дизелем и возможность перехода с одного топлива на другое без остановки двигателя.

5. Выбор вида альтернативных топлив для той или иной отрасли, эксплуатирующих дизельный привод, должен проводиться на научной основе.

6. Реализация предложенных решений целесообразна, в том числе в Омском регионе: на транспорте, в дорожно-строительной отрасли, на флоте, где эксплуатируются дизельные двигатели различного назначения.

Библиографический список

1. Патрахальцев, Н. Н. Пути развития топливных систем для подачи в цилиндр дизеля нетрадиционных топлив / Н.Н. Патрахальцев, Л. В. Альвеар Сантес // Двигателестроение. — 1988. — № 3. — С. 11 — 13.

2. Гершман, И.И. Многотопливные дизели / И.И. Гершман, А.П. Лебединский. — М.: Машиностроение, 1971. — 224 с.

3. А. с. 313574 СССР. Способ генерации колебаний звуковых и ультразвуковых частот в потоках жидкости или газа / Н.Н. Некрасов, В.Л. Казанский, С.П. Кириченко, А.А. Сергичев, Н.Н. Цыганов. — БИ, 1971. — № 27.

4. Семёнов, Б.Н. Применение сжиженного газа в судовых дизелях / Б.Н. Семёнов. — Л.: Судостроение, 1969. — 176 с.

5. Зубрилов, С.П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлива на судах / С.П. Зубрилов, В.М. Селиверстов, М.И. Браславский. — Л.: Судостроение, 1988. — 80 с.

6. Селиверстов, В. М. Экономия топлива на речном флоте / В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. — М.: Транспорт, 1983. — 231 с.

7. Емельянов, В.Е. Альтернативные экологически чистые виды топлива для автомобилей: свойства, разновидности, применение / В.Е. Емельянов, И.Ф. Крылов. — М.: АСТ-Астрель, 2004. — 128 с.

8. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высшая школа, 2005. — 479 с.

9. Ерофеев, В.А. Использование перспективных топлив в судовых энергетических установках / В.А. Ерофеев. — Л.: Судостроение, 1989. — 80 с.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики.

КРАЙНОВ Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.

ЖДАНОВ Николай Владимирович, аспирант, инженер кафедры теплоэнергетики.

КУЛЬКОВ Михаил Владимирович, аспирант, инженер кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: E-mail: heatomgups@mail.ru, zhdanov-n@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.04.2010 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов, М. В. Кульков

Книжная полка

621.311/Р63

Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст]: учеб. / Л. Д. Рожкова. — 5-е изд., стер. — М.: Академия, 2008. — 446 с. — ISBN 978-5-7695-5063-8.

Приведены сведения об электроэнергетических системах, особенностях технологических процессов различных типов электростанций. Рассмотрены режимы работы сетей высокого напряжения, выбор компенсирующих устройств. Даны описания конструкций основного электрооборудования электростанций и подстанций — синхронных генераторов и трансформаторов. Изложены физические процессы при коротких замыканиях и методика их расчета в соответствии с новыми руководящими указаниями по расчету токов короткого замыкания и выбору оборудования. Большое внимание уделено описанию электрических аппаратов, применяемых в электроустановках, системе измерений на станциях и подстанциях. Рассмотрены схемы электрических соединений станций и подстанций, конструкции распределительных устройств.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Предложена методика определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами. Разработан алгоритм, для ее определения, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуператор и топливо.

Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения экономически наиболее выгодной температуры подогрева воздуха в рекуператоре, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации термических печей с радиационными трубами. Использование данных разработок позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность их работы.

Ключевые слова: термическая печь, радиационная труба, затраты, температура, алгоритм, эффективность.

В термических печах с радиационными трубами потери теплоты с уходящими газами составляют 50 – 70 % от общего расхода тепла на печь. Использование теплоты уходящих газов в термических печах с радиационными трубами представляет важную задачу, так как позволяет повысить их термический КПД, сократить удельный расход топлива на тепловую обработку изделий.

Эффективность использования топлива в термических печах повышается при сочетании мероприятий по обеспечению полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с утилизацией теплоты уходящих газов. Высокотемпературный подогрев воздуха в рекуператоре печи — основное мероприятие по повышению тепловой эффективности печей, позволяющее повысить их термический КПД, снизить удельный расход топлива с одновременным увеличением удельной производительности печи. Однако это ведет к увеличению затрат на теплоутилизаторные устройства, поэтому целесообразно получить оптимальную температуру подогрева воздуха идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами.

Сравнительная эффективность инноваций, согласно положениям методики определения экономической эффективности капитальных вложений, служит в системе технико — экономических расчетов в качестве основной их количественной оценки при выборе оптимального варианта, характеризуемого наименьшими затратами общественного труда. Они учитывают эксплуатационные расходы и капитальные затраты и определяются выражением [1]:

$$Z = C + P_n \cdot K, \quad (1)$$

где C — изменяющиеся годовые эксплуатационные расходы, руб./год; P_n — норма дисконта инвестиций, 1/год; K — единовременные капитальные вложения, руб.

Эксплуатационные расходы при нагреве металла складываются из двух групп затрат: энергетические, связанные с использованием топлива; неэнергетические, состоящие из прочих видов затрат, связанных с осуществлением технологического процесса нагрева [2].

Группа неэнергетических затрат включает: затраты на подачу дутьевого воздуха для горения топлива и на отвод дымовых газов за пределы производственных зданий; затраты на подачу и отвод охлаждающей воды, обеспечивающей надежность работы элементов нагревательной печи; заработную плату производственного персонала; затраты на текущий ремонт печного оборудования; амортизационные отчисления; затраты на обеспечение нормальных санитарно-гигиенических условий труда.

Из всех текущих расходов при определении оптимальной температуры подогрева воздуха для горения топлива переменной величиной являются затраты на топливо, на подачу дутьевого воздуха и отвод дымовых газов за пределы печи. Величины отчислений на реновацию, капитальный и текущий ремонт принимаются пропорциональными капитальным вложениям.

В этих условиях выражение для величины суммарных дисконтированных затрат по рекуператору и расходу топлива примет вид:

$$Z_p = (S_m + S_{ам} + S_b) + P_n \cdot K, \quad (2)$$

$$S_m = C_m \cdot B, \quad (3)$$

$$S_{ам} = П \cdot K, \quad (4)$$

$$S_b = C_3 \cdot h \cdot \Delta N_{m.g.} \cdot H_p, \quad (5)$$

$$K = P_p \cdot H_p + C_{m.g.} \cdot Z \cdot \Delta N_{m.g.} \cdot H_p, \quad (6)$$

$$C_m = P_m \cdot h, \quad (7)$$

где S_m — годовые затраты на топливо, руб./год; $S_{ам}$ — годовые отчисления на амортизацию, руб./год; S_b — годовые затраты на подачу дутьевого воздуха для горения топлива и отвод дымовых газов за пределы печного агрегата, руб./год; C_m — годовая стоимость топ-

лива, $\frac{\text{руб.}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{с}}{\text{год}}$; B — расход топлива, м³/с; $П$ — норма амортизационных отчислений, 1/год; C_3 — стоимость электроэнергии, руб./(Вт·с); h — время работы печи

в течение года, c/rog ; $\Delta N_{m.g.}$ — мощность, затрачиваемая на обслуживание 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора (на преодоление газового и воздушного сопротивлений), $\text{Вт}/\text{м}^2$; H_p — поверхность нагрева рекуператора, м^2 ; P_p — капиталовложения в сооружение 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора, $\text{руб.}/\text{м}^2$; $C_{m.g.}$ — стоимость тягодутьевых машин, $\text{руб.}/\text{Вт}$; Z — коэффициент запаса, включающий резерв по расходу и давлению тягодутьевых машин и мощности электродвигателя; P_m — полная расчетная стоимость 1 м^3 натурального топлива, $\text{руб.}/\text{м}^3$.

Подставив выражение (3) – (6) в уравнение (2), получим:

$$Z_p = C_m \cdot B + C_p \cdot H_p, \quad (8)$$

где C_p — годовая стоимость 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора, $\text{руб.}/(\text{м}^2 \cdot \text{rog})$,

$$C_p = P_p \cdot (P_n + \Pi) + \Delta N_{m.g.} \cdot [Z \cdot C_{m.g.} \cdot (P_n + \Pi) + C_z \cdot h]. \quad (9)$$

Значение оптимальной температуры подогрева воздуха для конкретной температуры уходящих газов на выходе из радиационной трубы печи можно найти, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуператор и топливо Z_p , при приравнении к нулю частных производных функции по оптимизируемому параметру [3]:

$$\frac{\partial Z_p}{\partial t_b'''} = C_m \cdot \frac{\partial B}{\partial t_b'''} + C_p \cdot \frac{\partial H_p}{\partial t_b'''} = 0, \quad (10)$$

где t_b''' — температура воздуха на выходе из рекуператора, $^\circ\text{C}$;

Выражение для расхода топлива получим из уравнения теплового баланса печи [4]:

$$Q_x + Q_b + Q_m + Q_{\text{экз}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{yx}} + Q_{\text{х.г.}} + Q_{\text{м.г.}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{мп}} + Q_{\text{ам}} + Q_{\text{охла}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{ак}}, \quad (11)$$

$$Q_x = B \cdot Q_n^p, \quad (12)$$

$$Q_b = B \cdot C_b' \cdot t_b' \cdot V_b, \quad (13)$$

$$Q_m = B \cdot C_m' \cdot t_m', \quad (14)$$

$$Q_{\text{yx}} = B \cdot C_r' \cdot t_r' \cdot V_r, \quad (15)$$

$$Q_{\text{х.г.}} = B \cdot V_r \cdot R, \quad (16)$$

$$Q_{\text{м.г.}} = B \cdot Q_n^p \cdot R_2, \quad (17)$$

где Q_x — химическая теплота топлива, Вт ; Q_b — теплота, вносимая подогретым воздухом, Вт ; Q_m — теплота, вносимая с подогретым топливом, Вт ; $Q_{\text{экз}}$ — теплота экзотермических реакций, Вт ; $Q_{\text{м}}$ — теплота, необходимая для нагрева металла, Вт ; Q_{yx} — потери теплоты с уходящими продуктами сгорания топлива, Вт ; $Q_{\text{х.г.}}$ — потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, Вт ; $Q_{\text{м.г.}}$ — потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, Вт ; $Q_{\text{кл}}$ — потери теплоты теплопроводностью через кладку печи, Вт ; $Q_{\text{изл}}$ — потери теплоты излучением через открытые окна и щели, Вт ; $Q_{\text{мп}}$ — потери теплоты, расходуемой на нагрев транспортных средств и тарных устройств, Вт ; $Q_{\text{ам}}$ — потери теплоты с защитной атмосферой, покидающей рабочее пространство печи, Вт ; $Q_{\text{охла}}$ — поте-

ри теплоты водоохлаждаемыми элементами, Вт ; $Q_{\text{ак}}$ — потери теплоты на аккумуляцию кладкой при выводе нагревательной печи из холодного состояния после длительного простоя на стационарный температурный режим, Вт ; Q_n^p — низшая теплота сгорания топлива, $\text{Дж}/\text{м}^3$; C_b' , t_b' — соответственно средняя объемная теплоемкость и температура подогретого воздуха, поступающего к горелочным устройствам печи, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, $^\circ\text{C}$; V_b — количество воздуха, необходимое для сжигания единицы количества топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; C_m' , t_m' — соответственно средняя объемная теплоемкость и температура топлива, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, $^\circ\text{C}$; t_r' , C_r' — соответственно температура и средняя объемная теплоемкость уходящих из радиационных труб печного агрегата газов, $^\circ\text{C}$, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; V_r — количество дымовых газов на единицу количества топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; R — теплота несгоревшего CO в уходящих газах, $\text{Дж}/\text{м}^3$; R_2 — доля потерь от механической неполноты сгорания.

Подставив выражения (12) – (17) в уравнение (11), получим:

$$B \cdot Q_n^p + B \cdot C_b' \cdot t_b' \cdot V_b + B \cdot C_m' \cdot t_m' + Q_{\text{экз}} = Q_{\text{м}} + B \cdot C_r' \cdot t_r' \cdot V_r + B \cdot V_r \cdot R + B \cdot Q_n^p \cdot R_2 + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{мп}} + Q_{\text{ам}} + Q_{\text{охла}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{ак}}. \quad (18)$$

Температура воздуха t_b' , поступающего к горелочным устройствам печи, связана с температурой воздуха на выходе из рекуператора, равенством:

$$V_b \cdot C_b' \cdot t_b' = V_b \cdot C_b'' \cdot t_b'' - V_b \cdot C_b'' \cdot \delta t_b, \quad (19)$$

где δt_b — падение температуры воздуха на пути от рекуператора до горелочных устройств печи вследствие потерь теплоты в окружающую среду, $^\circ\text{C}$; C_b'' , t_b'' — средняя объемная теплоемкость и температура воздуха на выходе из рекуператора, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Подставив (19) в уравнение (18), получим выражение для определения расхода топлива на печной агрегат с радиационными трубами:

$$B = \frac{D}{(E + C_b'' \cdot V_b \cdot t_b'')}, \quad (20)$$

где

$$E = Q_n^p \cdot (1 - R_2) + C_m' \cdot t_m' - C_r' \cdot t_r' \cdot V_r - V_r \cdot R - V_b \cdot C_b'' \cdot \delta t_b, \quad (21)$$

$$D = Q_{\text{м}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{мп}} + Q_{\text{ам}} + Q_{\text{охла}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{ак}} - Q_{\text{экз}}. \quad (22)$$

Исходя из условия установки рекуператора на каждой радиационной трубе печного агрегата, выражения для определения расхода топлива на одну радиационную трубу примет вид:

$$B = \frac{D}{n_m \cdot (E + C_b'' \cdot V_b \cdot t_b'')}, \quad (23)$$

где n_m — число радиационных труб в печи, шт.

Величина поверхности нагрева H_p рекуператора определяется из выражения [5]:

$$H_p = \frac{B \cdot \eta_b \cdot V_b \cdot (C_b'' \cdot t_b'' - C_b' \cdot t_b')}{K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot \nu}, \quad (24)$$

где η_b — коэффициент, учитывающий потери воздуха в рекуператоре; C_b' , t_b' — средняя объемная теплоемкость и температура воздуха на входе в рекуператор,

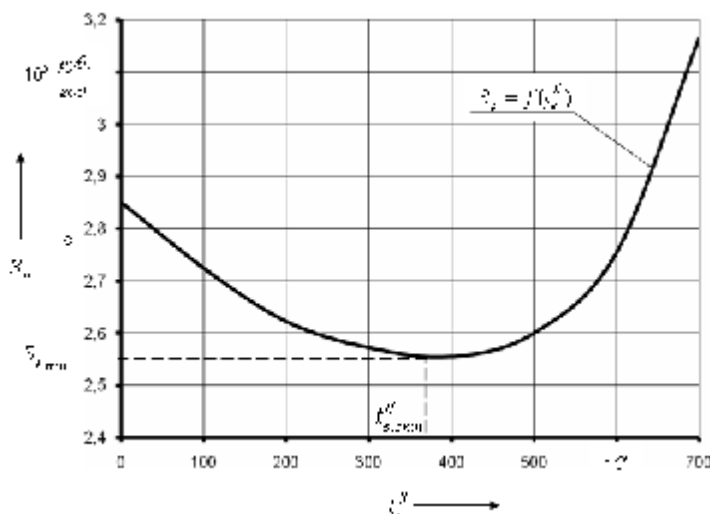


Рис. 1. Зависимость дисконтированных затрат по рекуператору и топливу от температуры подогрева воздуха

$\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; K — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\varepsilon_{\Delta t}$ — поправочный коэффициент при сложной схеме теплообмена; ν — средний температурный напор, $^{\circ}\text{C}$.

Средний температурный напор ν в рекуператоре определяется по приближенной формуле [6]:

$$\nu = A \cdot (t_r'' - t_b') + B \cdot (t_r' - t_b''), \quad (25)$$

где t_r' , t_r'' — температура газов на входе и выходе из рекуператора, $^{\circ}\text{C}$; A и B — коэффициенты, зависящие от соотношения $(t_r'' - t_b')/(t_r' - t_b'')$, и имеют численные значения.

В зависимости от соотношения $(t_r'' - t_b')/(t_r' - t_b'')$ коэффициенты A и B принимают следующие численные значения:

при $(t_r'' - t_b')/(t_r' - t_b'') = 1 \div 3$ коэффициенты равны $A = 0,43$, $B = 0,57$;

при $(t_r'' - t_b')/(t_r' - t_b'') = 3 \div 6$ коэффициенты равны $A = 0,35$, $B = 0,735$.

Такое допущение дает отклонение от средне-логарифмического значения величины ν не более чем на 2 %.

Температура газов на входе в рекуператор t_r' определяется из выражения (26) связывающим ее температуру уходящих газов на выходе из радиационной трубы печи [7, с. 94]:

$$t_r' = \frac{C_z \cdot t_z + \Theta \cdot C_g' \cdot t_g'}{(1 + \Theta) \cdot C_z} - \delta t_z, \quad (26)$$

где δt_z — падение температуры газов на пути до рекуператора вследствие потерь тепла в окружающую среду, $^{\circ}\text{C}$; Θ — коэффициент, учитывающий разбавление уходящих газов воздухом на пути до рекуператора.

Температура уходящих газов на выходе из рекуператора t_r'' определяется из уравнения теплового баланса [7, с. 96]:

$$t_r'' = \frac{C_z' \cdot t_z' - \frac{V_g \cdot \eta_g \cdot (C_g'' \cdot t_g'' - C_g' \cdot t_g')}{m \cdot V_z \cdot \eta_z \cdot C_z'' \cdot (1 + \Theta)}}{C_z''}, \quad (27)$$

где C_r' , C_r'' — средние объемные теплоемкости газов на входе и выходе из рекуператора, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; m — ко-

эффициент, учитывающий выбивание продуктов сгорания из радиационной трубы; η_r — коэффициент, учитывающий тепловые потери через ограждающие стенки рекуператора в окружающую среду.

Подставив выражение (27) в уравнение (25), получим:

$$\nu = U - W \cdot t_b'', \quad (28)$$

где

$$U = \left(A \cdot \frac{C_z'}{C_z''} + B \right) \cdot t_z' + \left(\frac{V_g \cdot \eta_g \cdot C_g'}{m \cdot V_z \cdot \eta_z \cdot C_z'' \cdot (1 + \Theta)} - 1 \right) \cdot A \cdot t_g'; \quad (29)$$

$$W = \frac{A \cdot V_g \cdot \eta_g \cdot C_g''}{m \cdot V_z \cdot \eta_z \cdot C_z'' \cdot (1 + \Theta)} + B. \quad (30)$$

Подставив выражения для B (23) и для ν (28) в уравнение (24), получим искомую зависимость $H_p = f(t_b'')$ в следующем виде:

$$H_p = \frac{D \cdot \eta_g \cdot V_g \cdot (C_g'' \cdot t_g'' - C_g' \cdot t_g')}{n_m \cdot (E + V_g \cdot C_g'' \cdot t_g'') \cdot K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot (U - W \cdot t_b'')} \cdot (31)$$

Взяв первые производные по t_b'' из выражений для расхода топлива (23) и поверхности нагрева рекуператора (31), получим:

$$\frac{\partial B}{\partial t_g''} = - \frac{D \cdot C_g'' \cdot V_g}{n_m \cdot (E + C_g'' \cdot V_g \cdot t_g'')^2}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial H_p}{\partial t_g''} = \frac{D \cdot \eta_g \cdot V_g}{n_m \cdot K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot (E + C_g'' \cdot V_g \cdot t_g'')^2} \cdot \frac{[N + L]}{(U - W \cdot t_b'')^2}, \quad (33)$$

где

$$N = C_g''^2 \cdot V_g \cdot W \cdot t_g''^2 - 2 \cdot C_g' \cdot t_g' \cdot C_g'' \cdot V_g \cdot W \cdot t_b'', \quad (34)$$

$$L = C_{\epsilon}^{II} \cdot E \cdot U + C_{\epsilon}^I \cdot t_{\epsilon}^I \cdot (C_{\epsilon}^{II} \cdot V_{\epsilon} \cdot U - W \cdot E). \quad (35)$$

Подстановка выражений (32) и (33) в уравнение (10) позволяет получить уравнение, позволяющее определить значение оптимальной температуры подогрева воздуха $t_{\epsilon, \text{онм}}^{II}$, подаваемого на горение топлива.

$$a \cdot t_{\epsilon}^{II2} + b \cdot t_{\epsilon}^{II} + d = 0, \quad (36)$$

$$t_{\epsilon, \text{онм}}^{II} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot d}}{2 \cdot a}, \quad (37)$$

где

$$a = C_p \cdot \eta_{\epsilon} \cdot C_{\epsilon}^{II2} \cdot V_{\epsilon} \cdot W - K \cdot \epsilon_{\Delta t} \cdot C_{\epsilon}^{II} \cdot C_m \cdot W^2; \quad (38)$$

$$b = 2 \cdot (K \cdot \epsilon_{\Delta t} \cdot C_m \cdot U - C_p \cdot \eta_{\epsilon} \cdot C_{\epsilon}^I \cdot t_{\epsilon}^I \cdot V_{\epsilon}) \cdot C_{\epsilon}^{II} \cdot W; \quad (39)$$

$$d = C_p \cdot \eta_{\epsilon} \cdot [C_{\epsilon}^{II} \cdot E \cdot U + C_{\epsilon}^I \cdot t_{\epsilon}^I \cdot (C_{\epsilon}^{II} \cdot V_{\epsilon} \cdot U - W \cdot E)] - K \cdot \epsilon_{\Delta t} \cdot C_{\epsilon}^{II} \cdot C_m \cdot U^2. \quad (40)$$

В качестве расчетного принимается выражение:

$$t_{\epsilon, \text{онм}}^{II} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot d}}{2 \cdot a}, \quad (41)$$

поскольку значения величины оптимальной температуры подогрева воздуха $t_{\epsilon, \text{онм}}^{II}$, вычисленные по выражению

$$t_{\epsilon, \text{онм}}^{II} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot d}}{2 \cdot a}, \quad (42)$$

как показали проведенные расчеты, всегда отрицательные, что не имеет физического смысла.

На основании полученных выражений разработан алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха на выходе из рекуператора для конкретной температуры уходящих газов, на выходе из радиационной трубы печного агрегата.

Проведенные расчетные исследования показали, что значение оптимальной температуры подогрева

воздуха $t_{\epsilon, \text{онм}}^{II}$ определенное по выражению (41), отвечает минимуму целевой функции (рис. 1).

Реализация разработанного алгоритма применительно к конкретным условиям эксплуатации печного агрегата с радиационными трубами производительностью 400 кг/ч и температурой нагрева металла 870 °С на одном из предприятий г. Омска, использующего в качестве топлива природный газ с $Q_n^p = 34,5 \text{ МДж/м}^3$, $P_m = 2,5 \text{ руб./м}^3$, $h = 4300 \text{ ч/год}$, дала следующие результаты: $t_{\epsilon, \text{онм}}^{II} = 382 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $3_{p, \text{мин}} = 2,554 \cdot 10^5 \text{ руб./год}$. Удельный расход топлива на нагрев изделий, подвергаемых термической обработке, уменьшился на 35 %. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 252 тыс. рублей в год.

Выводы. Разработан алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха идущего для горения топлива в термических печах с радиационными трубами. Результаты исследования подтверждают целесообразность его использования при проектировании и эксплуатации термических печей с радиационными трубами.

Библиографический список

1. Зайцев, Н. Л. Экономика организации [Текст] / Н. Л. Зайцев. — М.: Экзамен, 2004. — 624 с.
2. Некрасов, А. С. Экономика энергетики процессов нагрева [Текст] / А. С. Некрасов, Ю. В. Синяк. — М.: Энергия, 1975. — 136 с.
3. Батищев, Д. И. Методы оптимального проектирования [Текст] / Д. И. Батищев. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.
4. Тымчак, В. М. Расчет нагревательных и термических печей [Текст] / В. М. Тымчак, В. Л. Гусовский. — М.: Металлургия, 1983. — 480 с.
5. Тебеньков, А. М. Рекуператоры для промышленных печей [Текст] / А. М. Тебеньков. — М.: Металлургия, 1975. — 222 с.
6. Бакластов, А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок [Текст] / А. М. Бакластов. — М.: Энергия, 1970. — 568 с.
7. Парамонов, А. М. Повышение тепловой эффективности и экономичности работы нагревательных печей [Текст] / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов. — М.: Спутник +, 2006. — 225 с.

РЕЗАНОВ Евгений Михайлович, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Статья поступила в редакцию 28.05.2010 г.

© Е. М. Резанов

Книжная полка

621.311/К88

Кудрин, Б. И. Электрооборудование промышленности [Текст]: учеб. / Б. И. Кудрин. — М.: Академия, 2008. — 423 с. — ISBN 978-5-7695-4094-3.

Рассмотрено электрооборудование различных отраслей промышленности, включая машиностроение и металлообработку, металлургию, химию, общепромышленное электрооборудование, электрооборудование для повышения качества жизни населения и др. Освещены проблемы диагностики, ремонта и повышения эффективности использования электрооборудования и электроэнергетики.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ДИСТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ—СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ— ФИЛИАЛОВ ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»

В данной статье рассматриваются особенности проведения энергообследований дистанций электроснабжения. Приводится список обязательных видов работ и дополнительных форм к энергетическому паспорту при обследовании системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: энергообследование, энергетический паспорт, дистанция электроснабжения, тяга поездов.

На современном этапе развития страны одной из приоритетных задач является повышение эффективности потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) во всех отраслях промышленного производства, в том числе и на железнодорожном транспорте.

Основным нормативным документом, регулирующим отношения в области энергосбережения, является Федеральный закон № 261 от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

В соответствии с данным законом одним из ключевых решений в области повышения энергоэффективности использования ТЭР является проведение энергетических обследований.

Следует отметить, что все объекты ОАО «Российские железные дороги» (РЖД) подлежат обязательному энергетическому обследованию в соответствии со ст. 16 ФЗ-261, так как ОАО «РЖД» относится к ряду организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности.

Основными целями энергетического обследования являются:

- 1) получение объективных данных об объеме используемых энергетических ресурсов;
- 2) определение показателей энергетической эффективности;
- 3) определение потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности;
- 4) разработка перечня типовых, общедоступных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и проведение их стоимостной оценки.

В настоящее время существует ряд обстоятельств, затрудняющих проведение энергетического обследования в холдинговой компании «Российские железные дороги».

1. Не подготовлена нормативная база для проведения энергетических обследований — отсутствует положение о системе энергетического аудита в холдинге «РЖД».

2. Методическая база для проведения энергетических обследований не отвечает требованиям сегодняшнего дня:

— руководящим документом по проведению энергетического обследования структурных подразделений ОАО «РЖД» являются устаревшие инструктивно-методические указания «Методика проведения энергетических обследований потребляющих устройств, обеспечивающих тягу поездов и ремонтное производство на железнодорожном транспорте», утвержденные 27 декабря 2003 г. руководителем департамента лицензирования и технической политики Министерства путей сообщения России [1];

— отсутствуют дополнительные формы энергетического паспорта, которые должны отражать особенности и специфику потребления топливно-энергетических ресурсов в автономной и электрифицированной тяге поездов, а также в системе тягового электроснабжения.

При проведении энергетического обследования объектов ОАО «РЖД» необходимо учитывать проходящее в настоящее время в структурное реформирование, в рамках которого выделяются узкоспециализированные вертикально-интегрированные структуры (дирекции), которые в дальнейшем должны войти в холдинговую компанию «Российские железные дороги» в качестве акционерных обществ —

Таблица 1

Сведения о сглаживающих фильтрах тяговых подстанций

№ п/п	Наименование тяговой подстанции	Схемы выпрямления	Схема сглаживающего фильтра	Параметры параллельной части фильтра	Индуктивность реактора, мГн
1	ЭЧЭ №1	12-пульсовая последовательного типа	Апериодический	Апериодический контур: C = 200 мкФ	3
2	ЭЧЭ №2	6-пульсовая мостовая	Резонансно-апериодический	Апериодический контур: C = 350 мкФ Резонансный контур: C = 72 мкФ, L = 31,7 мГн	3

Таблица 2

Сведения об обеспечении сальдированного учета электрической энергии

№ п/п	Класс напря- жения*	Объем электроэнергии, возвращенной по приборам учета на вводах тяговых подстанций, тыс. кВтч					Объем возвращенной электроэнергии, принятой к расчетам энергосистемой, тыс. кВтч					Доля возвращенной электроэнергии, принятой к оплате энергосистемой, %				
		базовый год (отчетный)	предшествующие годы				базовый год (отчетный)	предшествующие годы				базовый год (отчетный)	предшествующие годы			
			2008	2007	2006	2005		2008	2007	2006	2005		2008	2007	2006	2005
1	220 кВ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	110 кВ	280,0	260,0	255,0	150,0	145,0	280,0	160,0	0	0	0	100	61	0	0	
3	27,5 кВ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4	10 кВ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	6 кВ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

* в столбце «класс напряжения» указывается граница балансовой принадлежности, на которой установлены приборы учета возврата электроэнергии (двунаправленные приборы учета)

самостоятельных юридических лиц. Соответственно, энергетическое обследование должно выполняться для структурных подразделений указанных вертикально-интегрированных структур, с последующим созданием сводных энергетических паспортов по каждой структуре.

Одной из существенных особенностей функционирования железнодорожного транспорта является наличие системы тягового электроснабжения (СТЭ), бесперебойное функционирование которой обеспечивается дистанциями электроснабжения.

При проведении энергетического обследования СТЭ необходимо выполнение ряда «критических» работ, выполняемых только при обследовании дистанции электроснабжения. К таким работам следует отнести:

- составление баланса приема и распределения электроэнергии по тяговым подстанциям;
- анализ динамики потребления электроэнергии тяговыми подстанциями. Выявление неравномерности загрузки смежных тяговых подстанций;
- определение уровня технических потерь электроэнергии с использованием имитационного моделирования;
- оценка величины уравнивающих токов в межподстанционных зонах и разработка рекомендаций по их снижению (для полигона переменного тока);
- оценка состояния выпрямительных и выпрямительно-инверторных преобразователей, выбор оптимальной схемы выпрямления (для полигона постоянного тока);
- оценка состояния трансформаторного оборудования, определение степени загрузки трансформаторов;
- оценка параметров сглаживающих фильтров, выбор рациональной схемы по условию снижения

потерь электроэнергии в реакторе в зависимости от типа автоблокировки;

- анализ технических решений по обеспечению качества электрической энергии. Характеристика фильтрокомпенсирующих устройств;

- оценка качества электроэнергии на вводах тяговых подстанций;

- оценка возможности внедрения сальдированного учета электроэнергии;

- оценка состояния тяговой сети и выбор рациональных схем питания межподстанционных зон.

Следует отметить, что в настоящее время требования к структуре и содержанию энергетического паспорта предприятия устанавливаются ГОСТ Р 51379-99 «Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. Типовые формы». В то же время в соответствии с приказом Минэнерго №13 от 10.03.2010 г. вводятся в действие новые формы энергопаспорта в составе 22 приложений. Однако представленные в указанных документах формы не позволяют с необходимой полнотой отразить особенности функционирования СТЭ железнодорожного транспорта и представить результаты выполнения «критических» работ, выполняемых при обследовании дистанций электроснабжения. Поэтому представляется необходимой разработка дополнительных форм энергетического паспорта для дистанций электроснабжения, характеризующих особенности СТЭ железнодорожного транспорта. Примеры таких форм представлены в табл. 1 – 3.

Форма, представленная в табл. 1, содержит сведения о сглаживающих фильтрах тяговых подстанций постоянного тока и их основных технических характеристиках. Форма, приведенная в табл. 2, содержит информацию о наличии сальдированного

Таблица 3

Сведения о количестве и типе преобразовательных агрегатов тяговых подстанций

№	Наименование показателя	Тип/мощность	Динамика изменения по годам, ед.				
			Базовый (отчетный)	предшествующие годы			
				2008	2007	2006	2005
1.1	Схема выпрямления	6-пульсовая нулевая	1	1	1	2	3
1.2		6-пульсовая мостовая	4	4	4	4	4
1.3		12-пульсовая последовательного типа	20	20	20	19	18
1.4		12-пульсовая параллельного типа	4	4	4	4	4
1.5		24-пульсовая	—	—	—	—	—
2.1	Преобразовательный трансформатор	6,3 МВ·А	1	1	1	1	1
2.2		12,5 МВ·А	25	25	25	25	25
2.3		16,0 МВ·А	2	2	2	2	2
2.4		20,0 МВ·А	—	—	—	—	—
3	Выпрямительно-инверторный преобразователь		2	2	2	1	1

Таблица 4

Расчетное значение технологических потерь электроэнергии, обусловленных наличием уравнительных токов

Наименование зоны	Значение составляющей уравнительного тока (одного пути), А		Потери электроэнергии по участку, тыс. кВт·ч в год	
	поперечная	продольная	поперечная	продольная
Сызрань Южная — Громово	2,8	23,1	0,179	12,154

учета электроэнергии на тяговых подстанциях, объеме возвращенной и принятой к оплате энергосистемами электрической энергии. Форма, представленная в табл. 3, характеризует тип и мощность преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока.

Формы, приведенные в табл. 2 и 3, характеризуют динамику изменения показателя за пять лет и в итоге позволяют формировать обобщенный энергетический паспорт службы электроснабжения и железной дороги — филиала ОАО «РЖД».

В соответствии с указанными выше направлениями было выполнено энергетическое обследование дистанции электроснабжения «Сызрань» Куйбышевской железной дороги — филиала ОАО «РЖД». По результатам выполненных работ разработан ряд организационно-технических мероприятий, направленных на повышение эффективности использования электроэнергии в системе тягового электроснабжения. В частности, было выявлено наличие перетоков мощности в тяговой сети участка Сызрань Южная — Громово. Измерения выполнены с помощью измерительно-вычислительных комплексов ИВК «Омск-М» при подключении к цепям защиты фидеров контактной сети тяговых подстанций. Критериями наличия уравнительного тока являются синусоидальность формы кривой (рис. 1) и равенство

мгновенных значений токов обоих путей (при отсутствии тяговой нагрузки на обоих путях) [2, 3].

Подобные измерения не требуют изменений в графике движения поездов. При подключении необходимо лишь несколько переключений схемы питания (для проверки правильности подключения приборов) с последующим возвратом к нормальной схеме.

С использованием описанных критериев определяются интервалы времени протекания уравнительного тока. Дальнейшая статистическая обработка значений токов производится уже только для этих интервалов, в течение которых вычисляются средние квадратичные значения уравнительного тока:

$$\delta[I_{(2)ур.т}] = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^n (I_{(2)ур.т})^2\right)}, \quad (1)$$

где n — номер текущего значения уравнительного тока фидера;

N — количество результатов измерений значений уравнительного тока фидера;

$I_{(2)ур.т}$ — действующее значение уравнительного тока первого или второго фидера n -го измерения, А.

Для выбора мероприятий по снижению перетоков мощности необходимо определить продольную и поперечную составляющие уравнительного тока.

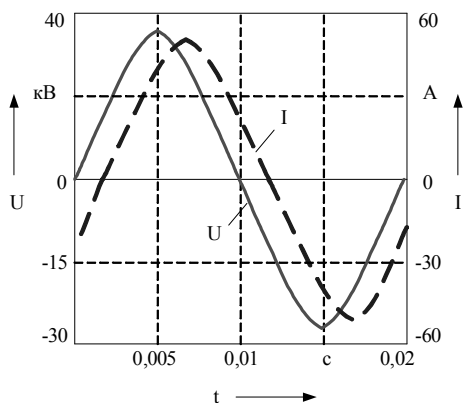


Рис. 1. Кривая напряжения и уравнивающего тока на участке Сызрань Южная – Громово

Продольная составляющая уравнивающего тока характеризуется разностью модулей напряжения смежных подстанций и определяется по выражению:

$$I'_{yp} = I_{yp} \cdot \cos(\beta - \varphi), \quad (2)$$

где φ — угол сдвига между вектором напряжения плеча питания и вектором уравнивающего тока, который определяется по результатам измерений;

β — угол сдвига между вектором разности напряжений смежных тяговых подстанций, питающих межподстанционную зону, и вектором уравнивающего тока, который определяется по выражению.

Поперечная составляющая уравнивающего тока определяется расхождением входных сопротивлений в систему внешнего электроснабжения и падением напряжения в системе внешнего электроснабжения за счет транзита мощности в ЛЭП системы:

$$I''_{yp} = I_{yp} \cdot \sin(\beta - \varphi). \quad (3)$$

На основании полученных значений уравнивающих токов в тяговой сети межподстанционных зон определяются технологические потери электроэнергии от их протекания.

Потери электроэнергии от протекания уравнивающего тока в межподстанционной зоне определяются по выражению, кВт·ч:

$$\Delta W_{yp} = I_{yp}^2 \ell \operatorname{Re}(Z_{TC}) T \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где I_{yp} — значение уравнивающего тока, А; ℓ — длина межподстанционной зоны, км; T — время, за которое производится определение потерь электроэнергии от протекания уравнивающего тока, ч; $\operatorname{Re}(Z_{TC})$ — удельное активное сопротивление участка, Ом/км.

Книжная полка

621.31/H56

Нестеренко, В. М. Технология электромонтажных работ [Текст] / В. М. Нестеренко. — 6-е изд., стер. — М.: Академия, 2008. — 589 с. — ISBN 978-5-7695-5557-2.

Приведены материалы по курсу «Технология электромонтажных работ» для подготовки рабочих по специальностям электротехнического профиля. Особое внимание уделено межпредметным связям и теоретическому объяснению наиболее сложных вопросов и тем.

Результаты выполненных измерений приведены в табл. 4.

Для устранения потерь электрической энергии в тяговой сети от протекания продольной составляющей уравнивающего тока, обусловленной разностью напряжений на шинах смежных тяговых подстанций, необходимо выполнить регулировку напряжения на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций в границах участка Сызрань Южная — Громово.

Таким образом, учет представленных особенностей функционирования СТЭ при проведении энергетических обследований дистанций электрообеспечения позволит сформировать эффективную программу организационно-технических мероприятий, направленных на снижение расхода электрической энергии на тягу поездов.

Библиографический список

1. Методика проведения энергетических обследований потребляющих устройств, обеспечивающих тягу поездов и ремонтное производство на железнодорожном транспорте [Текст]: Инструктивно-методические указания комплексной системы энергетического обследования / Под общ. ред. В.Т. Черемисина. — Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2003. — 429 с.
2. А. с. 1643228 СССР, МКИ В 60 М 3/02. Способ определения уравнивающего тока на участке тяговой сети переменного тока при двухстороннем питании [Текст]/Б.И. Косарев, С.П. Власов, А.В. Фролов, В.А. Мансуров. — № 97101068/28; заявл. 15.08.1989; опубл. 23.04.1991. Бюл. № 7. — 4 с.: ил.
3. Пат. 2116206 Российская Федерация, МПК В 60 М 3/02. Способ определения уравнивающего тока на участке тяговой сети переменного тока при двухстороннем питании [Текст] / В. Т. Черемисин, В. А. Квашук, А. М. Бенис, Н. М. Лапенко. — № 97101068/28; заявл. 23.01.1997; опубл. 27.07.1998. Бюл. № 21. — 4 с.: ил.

КАШТАНОВ Алексей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части.

КОМЯКОВ Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

НИКИФОРОВ Михаил Михайлович, кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость».

Адрес для переписки: e-mail: kesh-al@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 03.06.2010 г.

© А. А. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НУЖДЫ В СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрен вопрос нормирования тепловой энергии в стационарной теплоэнергетике железнодорожного транспорта (ж.-д. транспорт), задачей которого является разработка норм расхода различных видов энергии и топлива на отдельные технологические операции и производственные процессы. Определена методика по определению удельных норм расхода тепловой энергии на технологические процессы, на основе анализа статистических данных структурных подразделений ОАО «РЖД».

Ключевые слова: стационарная теплоэнергетика железнодорожного транспорта, удельные нормы расхода тепловой энергии, нормирование тепловой энергии, технологический процесс.

Структура потребления топливноэнергетических ресурсов в отрасли определяется структурой энергетики ж.-д. транспорта, которая объединяет под общим названием совокупность топливноэнергетических и энергогенерирующих установок ж.-д. транспорта, а также систем обеспечивающих их работу.

В широком смысле энергетику ж.-д. транспорта принято разделять на тяговую и нетяговую. Границы областей, охватываемых этими понятиями, в значительной мере условны. Тем не менее к тяговой энергетике относят энергетические установки электровозов, тепловозов, паровозов, электро- и дизель поездов, автомотрис, мотовозов, а также систем, непосредственно обеспечивающих их эксплуатацию. Устройства электроснабжения, вспомогательные электрические машины, тяговые трансформаторы, вспомогательные системы дизелей тепловозов (топливная, масляная, водяная, воздухооборудования), системы охлаждения тяговых генераторов и двигателей, теплообменники этих систем и т. п. [1].

При энергетическом обследовании стационарной теплоэнергетики ж.-д. транспорта встал вопрос о том, что при определении расхода тепла на технологические нужды на некоторые технологические операции не существует официально утвержденных удельных норм расхода тепловой энергии в нормативных документах ОАО «РЖД» [2–4]. Предлагается на основе анализа статистических данных определить удельные нормы расхода тепловой энергии на ряд технологических операций в стационарной теплоэнергетике ж.-д. транспорта. Удельные нормы составляют расчетную основу потребления, распределения и экономии всех видов ресурсов и эффективность их использования. Известно, что затраты на приобретение топливноэнергетических ресурсов в целом по сети дорог составляют около 11% от общесетевых эксплуатационных расходов, при этом ежегодно в нетяговой энергетике затрачивается около 27 млрд рублей. Следовательно, один процент экономии потребления ТЭР в нетяговой энергетике обеспечивает сбере-

жение порядка 270 млн рублей ежегодно. Поэтому вопрос определения рациональных удельных норм расходы ТЭР является важным и актуальным.

Нормы расхода топлива и энергии выступают в качестве одного из критериев оценки совершенства технологического процесса производства, а также являются фактором стимулирующим внедрение новых технологий и более эффективных теплоэнергетических процессов.

Нормы удельных расходов энергии и топлива не являются стабильными. Они должны периодически пересматриваться и уточняться в связи с изменяющимися условиями производства (рост производственной программы, изменение ассортимента продукции и качества сырья, изменение технологии производства, автоматизация производственных процессов, улучшение организации производства и труда, сезонные факторы и т.д.). Величина удельных норм может изменяться как в сторону снижения, так и повышения. Поэтому каждая удельная норма относится, к соответствующим нормализованным условиям производства.

Основным из основных методов выявления и установления правильных пропорций потребления и прогнозирования потребления ТЭР при функционировании ж.-д. транспорта является составление топливно-энергетического баланса (ТЭБ). Он показывает структуру расхода энергии и отражает взаимосвязи между первичными параметрами и технико-экономическими показателями.

ТЭБ – это статистическая характеристика динамической системы энергетического хозяйства за определенный интервал времени.

Структура баланса потребления и динамика расходования энергоресурсов, а следовательно и финансовых средств на их приобретение, в конечном итоге, определяются объемами работ во всех сферах деятельности ж.-д. транспорта и удельными нормами расхода энергоресурсов на единицу продукции. Тепловой баланс структурного предприятия ж.-д. транспорта рассчитывается по следующей формуле:

Таблица 1

Перечень проанализированных предприятий

№ п/п	Полное название структурного подразделения	Сокращенное название
1	Пассажирское вагонное депо Омск	ЛВЧД-1
2	Пассажирское вагонное депо Новокузнецк	ЛВЧД-26
3	Моторвагонное депо Новосибирск	ТЧ-32
4	Грузовое вагонное депо ст. Омск-Сортировочный	ВЧД-2
5	Локомотивное ремонтное депо Москва	ТЧ-1
6	Локомотивное депо Новокузнецк	ТЧ-15
7	Пассажирское вагонное депо Красноярск	ЛВЧД-2
8	Локомотивное депо Златоуст	ТЧ-Златоуст
9	Локомотивное ремонтное депо Инская	ТЧ-5
10	Вагонное депо Ленинск-Кузнецкий	ВЧД-1
11	Пассажирское вагонное депо Новосибирск	ЛВЧД-7
12	Вагонное пассажирское депо Кемерово	ЛВЧД-12
13	Локомотивное депо Новосибирск	ТЧ-4
14	Локомотивное депо Красноярск	ТЧ-2
15	Вагонное депо Белово	ВЧД-22
16	Локомотивное депо Барабинск	ТЧ-3
17	Локомотивное депо Карасук	ТЧ-10

Таблица 2

Энергетические балансы расхода тепловой энергии на технологические процессы в структурных подразделениях ж.-д. транспорта

Тех. процесс	мойка колесных пар, т/год	мойка букс, т/год	мойка рол-х подшипников, т/год	сушка унитазов, шт/год	мойка аккумуля-х батарей, шт/год	стирка белья, т/год	сушка белья, т/год	глажение белья, т/год	дезокамера, т/год	наружная обмывка вагонов, шт/год	мойка редукторов, т/год	мойка гасителей колебаний, т/год	ММД-13М, т/год	химчистка раб. одежды, т/год	сушка древесины, т/год	мойка тележек, т/год	Суммарный расход тепла, Гкал/год
Обозначение уа. расхода	q ₀	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	q ₁₀	q ₁₁	q ₁₂	q ₁₃	q ₁₄	q ₁₅	Q
ЛВЧД-1	3562,5	327,01	16,992	400	7920	2400,4	1320	360	650	14601	0	0	0	0	0	0	2658,3
ЛВЧД-26	4562,5	468	230,4	0	0	3416,4	1879	512,5	613,2	0	108	19,44	0	0	0	0	1582,1
ТЧ-32	1275	132,6	65,28	0	0	108	59,4	16,2	0	0	0	16,11	10040	0	0	0	1051,3
ВЧД-2	3765	180,7	224,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	210,8	120,5	18819,26	1704,4
ТЧ-1	0	0	120,48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16064	210,8	0	0	1491,2
ТЧ-15	2000	208	102,4	0	266	0	0	0	0	7665	79,8	0	0	0	0	26918,94	2645,2
ЛВЧД-2	6061,25	630,37	310,336	0	0	1930,1	1061,5	289,5	0	0	0	0	0	55	300	48091,14	4697,9
ТЧ-ЗЛАТ	0	400	200,8	0	0	2628	292	0	0	0	0	0	15860	200,8	0	0	2163,3
ТЧ-5	1275	132,6	65,28	0	0	108	62,2	24,5	0	0	0	11,052	15600	48,7	0	0	1562,9
ВЧД-1	10040	803,2	401,6	0	0	1168	642,4	175,2	0	0	0	0	16540	0	0	0	2657,5
ЛВЧД-7	8190	942	512	1512	0	2372	1304,6	355,8	0	27200	96	0	0	0	0	58773,8	7647,5
ТЧ-2	5028,75	440	0	0	0	0	0	0	0	3000	0	0	15050	230	500	0	2076,2
ТЧ-4	0	0	14,08	0	0	4380	2409	657	0	5380	124,5	0	12048	0	0	0	2892,1
ВЧД-22	251	65,26	160,6	0	0	1148	635	483	0	0	0	3,744	0	0	870	0	641,6
ТЧ-3	9312,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16064	331,3	0	0	2127,5
ТЧ-10	0	0	46,7504	0	0	0	0	0	0	108	0	6,84	10000	137	630	0	1079,9

$$Q = Q_{от} + Q_{тех} \quad (1)$$

где $Q_{от}$ – общие затраты тепла на отопление, вентиляцию и ГВС, Гкал;

$Q_{тех}$ – общие затраты тепла предприятием на технологические нужды, Гкал.

Удельные нормы расхода тепловой энергии в стационарной теплоэнергетике ж.-д. транспорта могут быть рассчитаны на основании объемов работ по операциям технологического процесса с учетом составления теплового баланса общего потребления тепловой энергии предприятием на технологические операции за рассматриваемый период, по следующей формуле:

$$Q = Q_{мм} + Q_{са} + Q_{п.с} + Q_{прач} + Q_A + Q_x \quad (2)$$

где $Q_{мм}$ – расход теплоты на моечные машины, используемые в структурных подразделениях ж.-д. транспорта, Гкал;

$Q_{са}$ – расход тепловой энергии на сушку лесоматериалов, Гкал;

$Q_{п.с}$ – расход тепловой энергии на обогрев подвижного состава, Гкал;

$Q_{прач}$ – расход тепловой энергии на обработку белья в прачечных (стирка белья, сушка, глажение), Гкал;

Q_A – расход тепловой энергии в дезокамере, Гкал;

Q_x – расход тепловой энергии на химчистку рабочей одежды, Гкал.

Произведем разложение формулы (2), выделив удельные расходы и объемы работ:

$$Q_{тех} = \sum_{i=1}^n q_{м.м.i} G_i + \sum_{j=1}^m q_{с.л.j} V_j + q_{п.с} N + G_6 (\sum q_{ст} + \sum q_{с.б} + \sum q_{гл}) + q_d G_{изд} + q_x G_{р.о} \quad (3)$$

где $q_{мм}$ – удельная норма расхода теплоты на 1 т обрабатываемых деталей в моечных машинах, Гкал/т; G_i – масса деталей, обрабатываемых в моечных машинах за планируемый или отчетный период (месяц, квартал, год и т.д.);

Таблица 3

Найденные удельные расходы тепловой энергии на технологические операции в структурных подразделениях ж.-д. транспорта

Удельные нормы расхода тепловой энергии	Обозначение	Результат
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку колесных пар, Гкал/т	q_0	0,068
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку букс, Гкал/т	q_1	0,073
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку роликовых подшипников, Гкал/т	q_2	0,071
Удельные нормы расхода тепловой энергии на сушку унитазов после окраски, Гкал/шт	q_3	0,096
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку аккумуляторных батарей, Гкал/шт	q_4	0,066
Удельные нормы расхода тепловой энергии на стирку белья, Гкал/т	q_5	0,234
Удельные нормы расхода тепловой энергии на сушку белья, Гкал/т	q_6	0,143
Удельные нормы расхода тепловой энергии на глажение белья, Гкал/т	q_7	0,098
Удельные нормы расхода тепловой энергии в дезокамере, Гкал/т	q_8	0,149
Удельные нормы расхода тепловой энергии на наружную обмывку вагонов, Гкал/шт	q_9	0,065
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку редукторов, Гкал/т	q_{10}	0,087
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку гасителей колебаний, Гкал/т	q_{11}	0,077
Удельные нормы расхода тепловой энергии на моечную машину ММД-13М, Гкал/т	q_{12}	0,091
Удельные нормы расхода тепловой энергии на химчистку рабочей одежды, Гкал/т	q_{13}	0,098
Удельные нормы расхода тепловой энергии на сушку древесины, Гкал/т	q_{14}	0,231
Удельные нормы расхода тепловой энергии на мойку тележек, Гкал/т	q_{15}	0,073

$$\begin{aligned}
 &3565,2q_0 + 327,015q_1 + 16,992q_2 + 400q_3 + 7920q_4 + 2400,4q_5 + 1320q_6 + 360q_7 + 650q_8 + 14601q_9 = 2658,3 \\
 &4562,5q_0 + 468q_1 + 230,4q_2 + 3416,4q_3 + 1879q_4 + 512,5q_5 + 613,2q_6 + 108q_{10} + 19,44q_{11} = 1582,1 \\
 &1275q_0 + 132,6q_1 + 65,28q_2 + 108q_3 + 59,4q_4 + 16,2q_5 + 16,11q_{11} + 10040q_{12} = 1051,3 \\
 &3765q_0 + 180,7q_1 + 224,4q_2 + 210,8q_{13} + 120,5q_{14} + 18819,26q_{15} = 1704,4 \\
 &120,48q_2 + 16064q_{12} + 210,8q_{13} = 1491,2 \\
 &2000q_0 + 208q_1 + 102,4q_2 + 266q_4 + 7665q_9 + 79,8q_{10} + 26918,9q_{15} = 2645,2 \\
 &6061,25q_0 + 630,37q_1 + 310,336q_2 + 1930,1q_3 + 1061,5q_4 + 289,5q_5 + 55q_{13} + 300q_{14} + 48091,1q_{15} = 4697,9 \\
 &400q_1 + 200,8q_2 + 2628q_3 + 292q_4 + 15860q_{12} + 200,8q_{13} = 2163,3 \\
 &1275q_0 + 132,6q_1 + 65,28q_2 + 108q_3 + 62,2q_4 + 24,5q_5 + 11,05q_{11} + 15600q_{12} + 48,7q_{13} = 1562,9 \\
 &10040q_0 + 803,2q_1 + 401,6q_2 + 1168q_3 + 642,2q_4 + 175,2q_5 + 16540q_{12} = 2657,5 \\
 &8190q_0 + 942q_1 + 512q_2 + 1512q_3 + 2372q_4 + 1304,6q_5 + 355,8q_6 + 27200q_9 + 96q_{10} + 58773,8q_{15} = 7647,5 \\
 &5028,75q_0 + 440q_1 + 3000q_2 + 15050q_{12} + 230q_{13} + 500q_{14} = 2076,2 \\
 &14,8q_2 + 4380q_3 + 2409q_4 + 657q_5 + 5380q_9 + 124,5q_{10} + 12048q_{12} = 2892,1 \\
 &251q_0 + 65,26q_1 + 160,6q_2 + 1148q_3 + 635q_4 + 483q_5 + 3,744q_{11} + 870q_{14} = 641,6 \\
 &9312,5q_0 + 16064q_{12} + 331,3q_{13} = 2127,5 \\
 &46,7q_2 + 108q_3 + 6,84q_{11} + 10000q_{12} + 137q_{13} + 630q_{14} = 1079,9
 \end{aligned}$$

Рис.1. Система уравнений энергетических балансов расхода тепловой энергии на технологические процессы в анализируемых структурных подразделениях ж.-д. транспорта

$q_{c,aj}$ — удельная норма расхода теплоты на 1 м³ высушиваемой древесины, Гкал/м³; V_j — объем лесоматериалов, загруженных за нормируемый период в сушила деревообделочного цеха, м³; $Q_{n,c}$ — удельная норма расхода теплоты на наружную обмывку подвижного состава, Гкал/секция; N — количество единиц подвижного состава (вагонов, электросекций, локомотивов), подвергаемых обмывке за нормируемый период, секция/период; $q_{ст}$ — удельная норма расхода теплоты на стирку белья, Гкал/т; G_b — масса белья, постиранного в прачечной, т; $q_{c,b}$ — удельная норма расхода теплоты на сушку белья, Гкал/т; $q_{г,а}$ — удельная норма расхода теплоты на глажение белья, Гкал/т; q_d — удельная норма расхода теплоты в дезокамере, Гкал/т;

$G_{изд}$ — масса изделий, обработанных в дезокамере, т; q_x — удельная норма расхода теплоты на химчистку рабочей одежды, Гкал/т; $G_{p,o}$ — масса рабочей одежды, очищаемой при химчистке, т; n — число работающих моечных машин на предприятии; m — число работающих сушил деревообделочного цеха.

Для расчета удельных норм расхода тепловой энергии на технологические нужды в стационарной теплоэнергетике ж.-д. транспорта был проведен анализ результатов энергетических обследований 16 структурных подразделений Западно-Сибирской и Красноярской железных дорог (табл. 1), а также составлены энергетические балансы расхода ТЭР на технологические процессы в данных предприятиях (табл. 2).

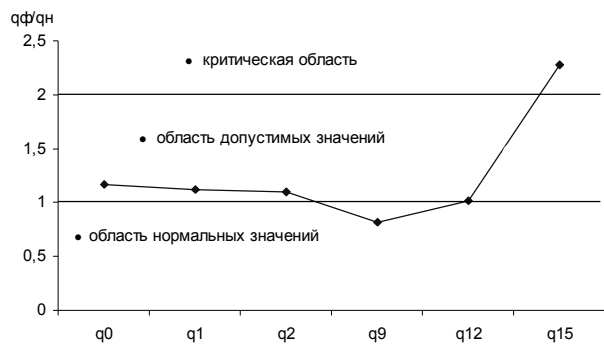


Рис. 2. График соотношения фактического и нормативного расхода по технологическим процессам анализируемых структурных подразделений ж.-д. транспорта

На основе составленного баланса тепловой энергии записывается следующая система уравнений (рис. 1), из которой выразим средние значения удельных расходов по видам технологического процесса.

Данная система состоит из шестнадцати уравнений, содержит шестнадцать неизвестных и решается матричным способом, с использованием среды вычислений MathCAD. Представлена матрица найденных значений средних удельных расходов тепловой энергии по видам технологического процесса (табл. 3).

Найденные расчетные значения удельных расходов энергоресурсов можно сравнить с нормативными показателями некоторых технологических операций, которые представлены в [2–4]. Показатель $q_{ф}/q_{н}$ дает возможность проанализировать достоверность найденных значений. Представлен график (рис. 2) данного показателя, откуда видно, что большая часть из представленных значений удельных расходов находится в области нормальных или допустимых значений, что говорит о правильности выбранного подхода для расчета удельных норм.

Остальные полученные удельные расходы тепла на обработку единицы продукции ($q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_{10}, q_{11}, q_{13}, q_{14}$) в литературе были не определены, поэтому сравнить их с нормативными показателями невозможно.

Несколько повышенные значения удельных расходов тепловой энергии, полученные на основе анализа статистических данных, объясняются тем, что на многих предприятиях в стационарной теплоэнергетике ж.-д. транспорта, во-первых, технологические процессы организованы недостаточно оптимально, а во-вторых, используемое в них оборудование имеет высокую степень износа, что негативно отражается на потреблении ТЭР, либо применяются машины не заводского, а собственного изготовления с повышенными удельными расходами.

Например, в технологии ремонта подвижного состава часто применяются моечные машины собственного изготовления с типовой тепловой схемой. На предприятии, как правило, не удается найти технический паспорт машины, сведений об испытании и определении удельного расхода тепла на единицу массы очищаемых деталей, машины не оснащены современными измерительными средствами.

Особенно актуальна проблема нормирования в железнодорожных прачечных, где потребляется большая доля производственного расхода тепла. Анализ показал, что оборудование прачечных физически изношено, тепловые схемы использования тепла несовершенны, отсутствуют паспортные характеристики оборудования и сведения о нормативном потреблении тепла.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие основные выводы:

- 1) количество технологических процессов, по которым существуют официально утвержденные нормы расхода тепла на единицу продукции, весьма незначительно и составляет для анализируемой совокупности предприятий шесть из шестнадцати (38%);
- 2) актуальной остается задача разработки соответствующих методик для определения норм расхода тепловой энергии на технологические процессы, не представленные в нормативных документах по нормированию расхода ТЭР на ж.-д. транспорте [2–4];
- 3) предложенный автором подход может использоваться на железнодорожных предприятиях для обоснованного планирования потребности в тепловой энергии, на основе удельных норм расхода и объемов выпускаемой продукции/услуг.

Библиографический список

1. Минаев, Б. Н. Структура потребления топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте/Б.Н. Минаев, И.М. Хрунова // Вопросы теплоэнергетики и экологии на железнодорожном транспорте. — М.: МГУПС, 2001. — С. 9–16.
2. Методика нормирования расхода теплоты и топлива стационарными установками железнодорожного транспорта. — М.: ВНИИЖТ, 2002. — 86 с.
3. Методика планирования расхода топлива на нетяговые нужды и тепловой энергии в ОАО «РЖД». — М.: ВНИИАС, 2007. — 97 с.
4. Нормативная база тепло- и топливopotребления стационарных объектов железных дорог. — М.: ВНИИЖТ, 2001. — 112 с.

ФИНИЧЕНКО Александра Юрьевна, аспирантка кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: e-mail: finichenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.05.2010 г.

© А. Ю. Финиченко

МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ДВУМЯ УРАВНЕНИЯМИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЙ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ

Сформулирована и решена задача турбулентного теплопереноса в топке котла малого объема при сжигании газообразного топлива.

Ключевые слова: турбулентность, горение, топка, температура, конвекция.

Горение всегда сопровождается движением газов — воздуха, газообразного топлива, продуктов сгорания. Это не только химический, но и физический процесс. Точнее сказать, горение есть совокупность взаимообусловленных аэродинамических, тепловых и химических процессов (аэротермохимия). Температура, концентрация реагентов и другие величины изменяются как вследствие химических реакций, так и вследствие различных физических процессов: конвекции, диффузии, теплообмена излучением и прочее, поэтому химические и физические процессы нужно изучать совместно. Часто физические факторы оказывают определяющее влияние на полноту сгорания, условия воспламенения. Только при идеальном перемешивании аэродинамическими процессами можно пренебречь, полагая, что параметры одинаковы в любом месте реакционного объема [1].

Течения жидкостей и газов в технических устройствах, как и в природе, почти всегда турбулентны. Исследование турбулентности является сложным разделом гидродинамики. В процессах горения проблема турбулентности ещё более осложнена дополнительными факторами — химическими реакциями и излучением [1–3].

В литературе описаны различные способы турбулентных течений реагирующих газов [1, 2]. Турбулентные течения могут представляться в виде совокупности стационарных ламинарных, используют как статистические модели и модели с эмпирическими коэффициентами переноса. Но все эти теоретические разработки применяются с определенными ограничениями [2].

Поэтому модель турбулентности с двумя уравнениями широко используется в последнее время, т.к. она является хорошим компромиссом между затратами на численное решение и точностью вычислений. Эта модель более сложна, чем рассмотренные ранее. Значения скорости и значения характерной длины определяются с использованием различных транспортных уравнений (отсюда термин — «два уравнения»).

Эта модель турбулентности получила название k - ε с двумя уравнениями. В них используется гипотеза градиента диффузии для того, чтобы установить зависимость напряжений Рейнольдса от значений градиентов скорости и турбулентной вязкости.

Последняя моделируется как функция от турбулентной скорости и турбулентной характерной длины. В этих моделях турбулентная скорость определяется из величины турбулентной кинетической энергии, которая вытекает из решения соответствующего транспортного уравнения. Турбулентная характерная длина оценивается двумя характеристиками турбулентной области — турбулентной кинетической энергией k и ее величиной рассеивания ε (диссипации). Величина рассеивания турбулентной кинетической энергии определяется из решения соответствующего транспортного уравнения.

Рассмотрим k - ε модель подробнее. Ранее было введено понятие k — турбулентной кинетической энергии, рассмотрим теперь ε — турбулентное рассеивание вихря (показатель, при котором происходит диссипация флуктуаций скорости). Тогда k - ε модель характеризуется следующими уравнениями [4].

Неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0. \quad (1)$$

Моментов

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \\ = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B, \end{aligned} \quad (2)$$

где B — сумма всех сил, действующих на объем газа, μ_{eff} — эффективная турбулентная вязкость, P — давление.

k - ε модель основывается на концепции турбулентной вязкости, поэтому

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad (3)$$

где μ_t — турбулентная кинематическая вязкость. В данной модели предполагается, что турбулентная вязкость связана с турбулентной кинетической энергией и диссипацией через выражение:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где C_μ — справочная константа [4].

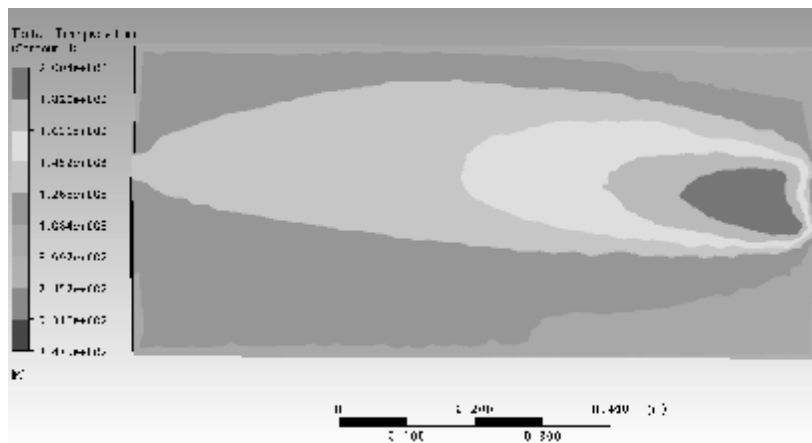


Рис. 1. Распределение температур в топочном объеме

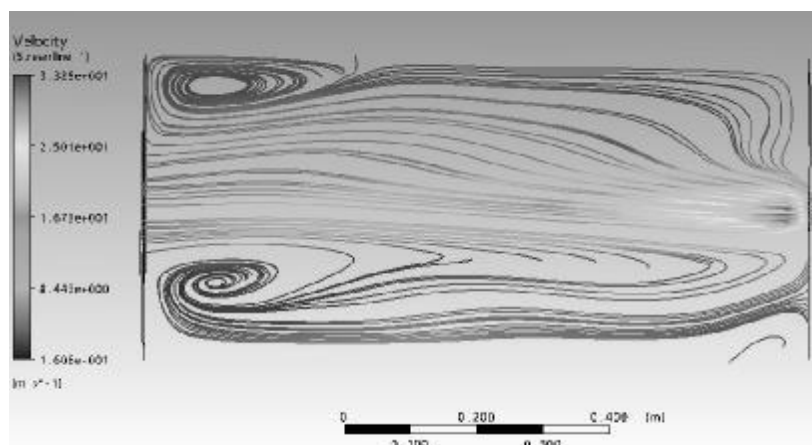


Рис. 2. Распределение скоростей в топочном объеме

Переменные k и ε являются результатом решения дифференциальных транспортных уравнений для турбулентных кинетической энергии и диссипации:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon), \quad (6)$$

где $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε — справочные константы [5]; P_k параметр турбулентности, характеризует соотношение между силами вязкости и силами выталкивающими P_{kb} [4]:

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3 \mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb}. \quad (7)$$

Рассмотренную выше математическую модель возможно использовать при описании процессов турбулентного горения газообразного топлива. В настоящее время представленная k - ε модель (уравнения (1) — (7)) дополняется уравнениями сохранения каждого компонента, участвующего в реакциях окисления, состояния и соответствующими граничными и начальными условиями [5]. Учитываются химические реакции взаимодействия элементов топлива и окислителя. Рассмотрен механизм образования NO_x .

Данная система уравнений в трехмерной постановке решается с использованием программы ANSYS

CFX [4]. Результаты расчетов представлены на рис. 1, 2. Объект исследования — топка котлоагрегата небольшой производительности цилиндрической формы размером 0,5 x 1,0 метр. В правой вертикальной плоскости располагается вход (горелка), в левой — выход для продуктов сгорания. В качестве топлива используется природный газ с преобладанием метана (98 %), окислитель — воздух. Расход топливовоздушной смеси — 0,06 кг/с. Фронт горения кинетический. На представленных иллюстрациях отчетливо видно, что температурные возмущения в топке (рис. 1) сопровождаются конвективными возмущениями (рис. 2).

Очевидно, что данная математическая k - ε модель горения позволяет моделировать не только суммарный и локальный теплообмен, но и структуру потоков излучения в топочном пространстве, а также соотношение лучистой и конвективной составляющих теплопереноса к каждому участку стен, помогает отыскать оптимальные значения при выборе размеров и формы топочной камеры и расположение горелок.

Библиографический список

1. Пашков, А.Т. Основы теории горения / А.Т. Пашков. — М.: МЭИ, 2002. — 136 с.
2. Госмен, А.Д. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / А.Д. Госмен, В.М. Пан, А.К. Ранчел. — М.: Мир, 1972. — 328 с.
3. Алексеев, Б.В. Физическая газодинамика реагирующих сред / Б.В. Алексеев, А.М. Гришин. — М.: Высшая школа, 1985. — 464 с.

4. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0 / ANSYS, Inc. // Southpointe 275 Technology Drive. — Canonsburg: PA 15317, 2006. — 312 p.

5. Михайлов, А.Г. Расчет процессов переноса теплоты в топке котла / А.Г. Михайлов, С.В. Теребилов // Омский научный вестник. — 2009. — № 1 (77). — С. 151 — 152.

НЕНИШЕВ Анатолий Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнер-

гетики Омского государственного технического университета.

МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики Омского государственного технического университета.

ТЕРЕБИЛОВ Сергей Викторович, инженер МП «Тепловая компания», г. Омск.

Адрес для переписки: 644050, Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 03.06.2010 г.

© А. С. Ненишев, А. Г. Михайлов, С. В. Теребилов

УДК 620.9.001.12/18

В. П. АНУФРИЕВ

В. Е. СИЛИН

Г. И. УСОВА

Уральский центр энергосбережения
и экологии, г. Екатеринбург

Уральский государственный
технический университет-УПИ
им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

В статье представлены результаты исследований и технико-экономических проработок, проведенных в ООО «УЦЭЭ» и на теплоэнергетическом факультете УГТУ по двум инновационным проектам. Рассмотрены современные технологии использования древесных отходов в качестве экологически безопасного альтернативного источника энергии: технологический процесс производства жидкого котельного топлива из древесных отходов и получение энергии из отработанных деревянных шпал.

Ключевые слова: древесные отходы, биомазут, отработанные деревянные шпалы, газификация.

Введение

Древесные отходы — естественный и неизбежный продукт биологического круговорота жизненных материалов и энергии. В условиях неантропогенного природного биоценоза этот продукт «нарабатывается» с течением времени и непосредственно участвует в его формировании. В «точках взаимодействия» техно- и биоценозов (парковые зоны в городе, деревообрабатывающие предприятия, подразделения железной дороги, городские свалки) нарушается (под воздействием человеческого фактора) естественный баланс и образуются несвойственные концентрации древесных отходов. Это приводит к специфическим последствиям, неблагоприятным для природы [1].

Наиболее очевидные негативные факторы накопления древесных отходов:

- отчуждение территорий под складирование древесных отходов;
- пожароопасность древесных отходов.

Для исключения этих факторов древесные отходы необходимо максимально полно вовлекать в технологический оборот, в пределах стремясь к стопроцентному использованию древесины. Это особенно

актуально в настоящее время в связи с широким развитием ресурсосберегающих методов энергопроизводства и природопользования.

Инновации в области использования древесных отходов. Древесная биомасса, будучи, вероятно, первым топливом человеческой цивилизации, к середине XX века была вытеснена более качественными ископаемыми топливами — углем, а затем нефтью и газом. Однако сейчас она испытывает «ренессанс», вновь вовлекаясь в энергетику [2]. Энергетическое использование древесных отходов является обширным направлением их утилизации и обеспечивает такие положительные моменты, как экономия кондиционного топлива и улучшение экологии энергоисточника в сравнении с углями, мазутом [3].

Современной сырьевой базой для производства биотоплив в России являются отходы лесопромышленного комплекса и деревообработки (20 млрд т у.т. — всего; ежегодно можно производить до 1 млрд т у.т.).

Можно выделить ряд инновационных направлений использования древесных отходов, получивших развитие за рубежом в настоящее время:

- получение различных видов жидкого топлива;
- получение энергии кондиционного качества из

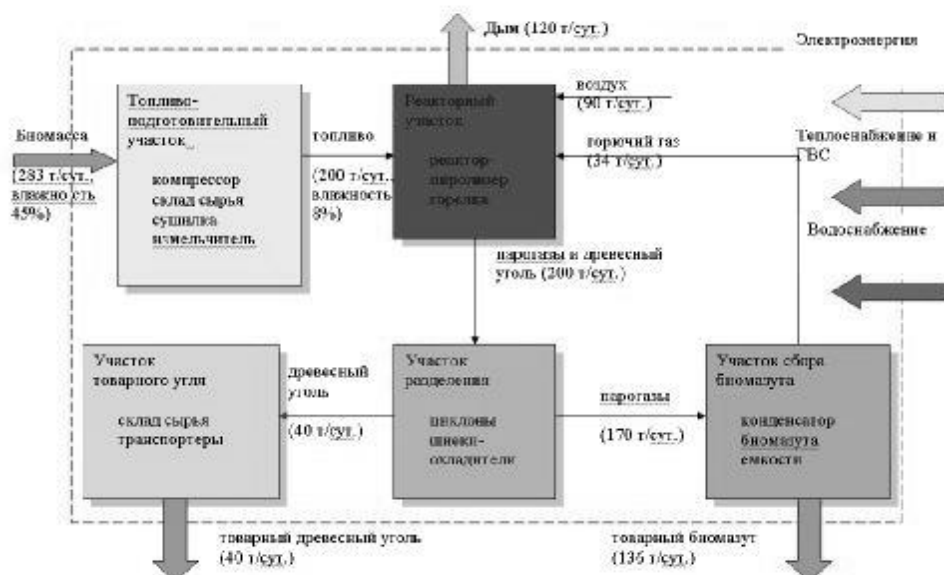


Рис. 1. Структурная схема производства биомазута

загрязненных промышленных древесных отходов (например, отработанных деревянных шпал, являющихся опасным отходом 3-го класса).

Критерии эффективности, отличающие их от использовавшихся ранее:

- большее энергосодержание конечного продукта в сравнении с исходным, что повышает его транспортабельные свойства и переводит из разряда местных топлив в разряд кондиционных экспортных;
- большие масштабы производственных процессов и связанная с этим их меньшая удельная энергоемкость;
- меньшее негативное воздействие на окружающую среду.

Получение жидких топлив. Около 90% мирового производства биодизельного топлива приходится на страны ЕС, лидером среди которых является Германия. Можно отметить, что на то есть исторические предпосылки, сложившиеся еще до Второй мировой войны. Для производства жидких топлив из твердых используются процессы газификации — получения горячего газа из органической твердой горючей массы. Германию можно считать «прародиной» трех основных технологий газификации, разработанных в первой половине XX века: в плотном слое — Лурги, в кипящем слое — Винклер, в спутном потоке — Копперс-Тотцек. Процессы газификации, появившиеся во время энергетического кризиса XX века за пределами Германии, во многом базируются на трех указанных технологиях, являясь их развитием [4, 5].

В промышленно развитых и отдельных развивающихся странах для того, чтобы обеспечить быстрые темпы производства биотоплива и сделать его конкурентоспособной отраслью (в сравнении с производством бензина и обычного дизельного топлива), оказывается государственная поддержка в виде высоких протекционистских тарифов на него, масштабных государственных субсидий, выплачиваемых производителям биотоплива, а также установления высоких тарифов на импорт этанола. Необходимо специально подчеркнуть, что только активная государственная поддержка правительствами производства экологически чистого жидкого биотоплива делает экономически выгодным этот вид бизнеса.

Одним из ценных жидких продуктов переработки древесных отходов является биомазут — высокотехнологичный продукт, имеющий ряд преимуществ перед обычным жидким топливом:

- принадлежит к разряду «зеленого» топлива — обеспечивает экологическую безопасность при сжигании;
- имеет низкую температуру застывания (-33°C), что облегчает использование в качестве топлива на значительной части территории РФ с пониженными зимними температурами.

Основная сфера применения — топливо для котельных и газотурбинных установок (выработка тепла и электроэнергии). Кроме того, может применяться в химической промышленности: для получения ацеталей, сложных эфиров, глиоксаля, других химических веществ, для создания эмульсий, растворителей и смол, а также — высококачественного дизельного топлива путем каталитического риформинга.

Технологический процесс производства биомазута представлен на схеме (рис. 1). Сырье (древесная щепа) поступает на склад от внешнего поставщика и далее проходит на топливopодготовительном участке необходимую подготовку: сушку до требуемой по технологии влажности (не более 8%), измельчение. Производство биомазута проводится в реакторе кипящего слоя. На выходе реактора образуются следующие потоки:

- биомазут (до 70% масс. от подачи), товарный продукт;
- древесный уголь (до 20% масс.), товарный продукт;
- неконденсируемые газы (порядка 10% масс.), продукт, полностью использующийся на собственные нужды технологии (для обогрева реактора).

Биомазут накапливается в резервуарах предприятия и используется для последующей продажи или переработки. Древесный уголь собирается в специальном накопительном бункере на складе угля для последующей продажи. Биомазут может являться не только товарным продуктом, отпускаемым потребителю, но и промежуточным продуктом для последующих переделов (например, в биодизель).

Экономические оценки создания в России производства биомазута с годовой выработкой порядка

Химические реакции в котле и газогенераторе

Топка котла	Газогенератор
<p><i>Зона горения</i></p> <p>1. Углерод и водород древесины (шпала) и угля $C + O_2 = CO_2$ $C + CO_2 = 2CO$ $C + H_2O = CO + H_2$</p> <p>2. Каменноугольные масла шпалы и УВ (например, крезол) $CH_3C_6H_4OH + aO_2 = bCO + nCO_2 + kC_6H_5OH$ a, b, n, k — термодинамически зависимые коэффициенты</p>	<p><i>Зона горения</i></p> <p>1. Углерод и водород древесины (шпала) и угля $C + O_2 = CO_2$ $C + CO_2 = 2CO$ $C + H_2O = CO + H_2$</p> <p>2. Каменноугольные масла шпалы и УВ (например, крезол) $CH_3C_6H_4OH + aO_2 = bCO + nCO_2 + kC_6H_5OH$ a, b, n, k — термодинамически зависимые коэффициенты</p>
<p><i>Зона газификации</i></p> <p>Отсутствует; должен использоваться дожигатель</p>	<p><i>Зона газификации</i></p> <p>3. Фенолы, проходя через слой раскаленного углерода, разлагаются с образованием простых газов $nC_6H_5OH + kC = mCO_2 + qCO + zH_2$ n, k, m, q, z — термодинамически зависимые коэффициенты</p>

50 000 тонн на базе зарубежной технологии, показали необходимость государственной поддержки производства, в том числе — экономической (с учетом опыта стимулирования производства биотоплива в США и ряде европейских стран). Это является обязательным условием выхода проекта на заданную рентабельность и его инвестиционной привлекательности.

Утилизация отработанных деревянных шпал. Ежегодно на железной дороге в результате путе-ремонтных работ извлекается значительное количество отработанных деревянных шпал (ОДШ) и такая перспектива сохраняется до 2017 года. Для предотвращения гниения ОДШ пропитаны антисептиками, что делает их отходом 3 класса экологической опасности, не допускающим сжигание в неспециализированных устройствах.

Вредное воздействие антисептиков (каменно-угольные масла) обусловлено действием токсичных компонентов, входящих в его состав, наиболее опасным из которых является бенз(а)пирен, классифицирующийся как вероятно канцерогенный для человека и как канцероген при воздействии на животных [6]. Среднесуточная предельно допустимая концентрация бенз(а)пирена в атмосферном воздухе составляет 10^{-6} мг/м³, он относится к 1 классу опасности.

Необходимым условием безопасной и полной термической утилизации материалов, содержащих бенз(а)пирен и прочие углеводороды (УВ), относящиеся к 1–2 классам опасности, является их разложение до простых газов (CO , CO_2 , H_2 , CH_4) и дожигание последних. Известные режимные параметры, при которых может выполняться разложение:

- температурный уровень — не менее 1200°C,
- длительность выдержки газов при этой температуре — не менее 2 секунд.

Наличие в раскаленной среде восстановителей типа углерода повышает полноту разложения.

В РФ проверена реальность и экономическая целесообразность огневой утилизации шпал с получением тепловой энергии на одной из станций Восточно-сибирской железной дороги по способу с использованием дополнительного кондиционного топлива. ОДШ в специальных устройствах сжигаются с помощью природного газа или жидкого топлива.

За рубежом ОДШ сжигаются наравне с ТБО в специализированных топках, в том числе — по технологии с пиролизом на первой стадии и дожиганием газов на второй стадии, не подразумевающей

использования дополнительного кондиционного и дорогостоящего топлива.

Упрощенно химизм процессов, происходящих в топке угольного котла и в газификаторе, качественно представлен в табл. 1.

При сжигании ОДШ в топке каменноугольные смолы и тяжелые УВ частично догорают только до веществ типа фенолов и выносятся с газовым потоком в дымовую трубу. В газогенераторном процессе газы так же проходят через слой раскаленного углерода, где происходит дополнительная термическая деструкция. За счет наличия зоны термического разложения веществ на углероде степень обезвреживания в газогенераторном процессе значительно увеличивается по сравнению с обычным сжиганием.

В РФ на сегодняшний день нет серийно выпускаемых газогенераторных устройств, в которых был накоплен практический опыт утилизации ОДШ. Тем не менее, нет и принципиальных сложностей в том, чтобы скомплектовать систему топливоподготовки и сжигания мини-ТЭС на ОДШ отечественным (пилотным) оборудованием.

В ходе поисковых НИОКР проработана структурная схема (рис. 2), подобрано оборудование и проведены предварительные технико-экономические расчеты мини-завода электрической мощностью 1,75 МВт и тепловой мощностью 9 Гкал/ч по экологически безопасной утилизации шпал.

Шпалы доставляются на склад-накопитель откуда поступают в топливоприготовительный цех, где проходят необходимую механическую обработку и измельчение. После этого продукт переработки шпал складывается на специальном складе.

Со склада сырье раздается в приемные бункера газогенераторов. Воздух из узла загрузки газогенератора отсасывается аспирационной системой и сбрасывается на дожигание содержащихся в нем горючих газовых примесей. В газогенераторе за счет неполного сгорания топлива производится горючий газ. Газ после системы очистки и охлаждения разделяется в газораспределительном устройстве на два потока. Первый поток (1/3 объема) направляется в мини-ТЭЦ, где сгорает в газопоршневом двигателе. В мини-ТЭЦ производится электрическая и тепловая энергия.

Отходящие дымовые газы после системы утилизации теплоты двигателя с температурой 120–150°C сбрасываются через дымовую трубу в атмосферу. Второй поток горючего газа подается в водогрейный котел, способный работать на генераторном газе

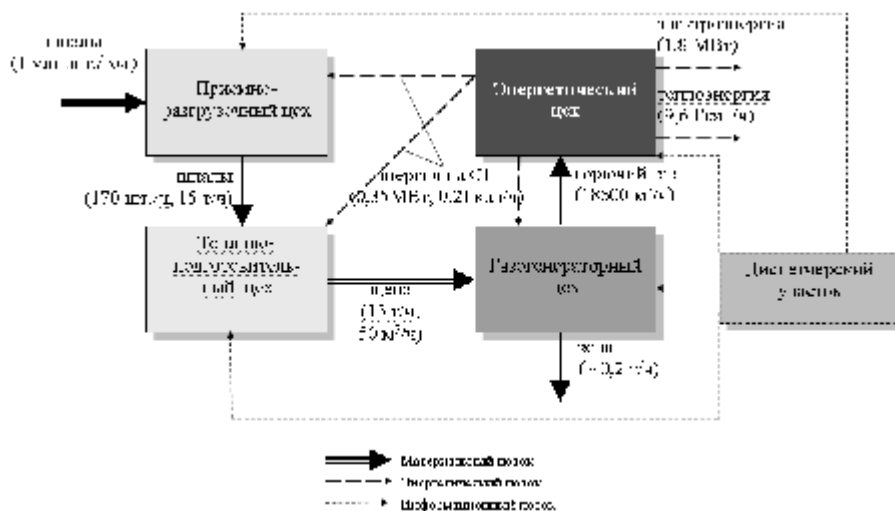


Рис. 2. Структурная схема завода по утилизации отработанных древесных шпал

и каменном угле (в качестве резервного топлива). Получаемая тепловая энергия используется на нужды отопления и в системе ГВС.

Экономические оценки показывают инвестиционную привлекательность проекта при учете положительных эффектов от снижения экологических платежей, а также потенциальной возможности привлечения инвестиций в рамках механизмов Киотского протокола.

Заключение. В результате технико-экономической проработки двух инновационных полномасштабных проектов по энергетическому использованию древесных отходов выявлен их малорентабельный и венчурный характер, как и в целом — проектов по энергетическому использованию местных топлив, не предоставляющих очевидной экономической выгоды, если не учитывать возможности сокращения платы за размещение отходов, в том числе — высоких классов опасности.

Есть ряд моментов, которые способны в перспективе повысить привлекательность этого направления. Использование различных форм древесных отходов приводит к выполнению целей Президента РФ по увеличению доли использования ВИЭ (цель — 4,5% к 2020 году), снижает эмиссию парниковых газов, подходит под критерии энергосберегающих проектов, финансируемых Европейским банком реконструкции и развития (ЕБРР) в рамках программы RUSEFF.

Библиографический список

1. Лотош, В.Е. Переработка отходов природопользования / В. Е. Лотош. — Екатеринбург : Полиграфист, 2007. — 503 с.
2. Гелетуха, Г. Г. Обзор современных технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии /

Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбережение. — Ч. 1 — 1999. — № 5. — С. 3—12.

3. Дунаевская, Н.И. Технологии совместного сжигания биомассы и угля в пылеуловительных топках/Н.И. Дунаевская [и др.] // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2007. — № 3. — С. 38.

4. Рыжков, А.Ф. Обзор индустрии мировой газификации / А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин // Энергетика за рубежом: приложение к журналу «Электрические станции». — 2008. — № 3—4. — С. 13—20.

5. Попов, А.В. Управляемый процесс газификации биомассы / А.В. Попов, А.Ф. Рыжков // Промышленная энергетика. — 2008. — № 1. — С. 27—31.

6. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей. В 3 т. Т. I. Органические вещества / Под ред. засл. деят. науки проф. Н.В. Лазарева и док. мед. наук Э. Н. Левиной. — Л. : Химия, 1976.

АНУФРИЕВ Валерий Павлович, доктор экономических наук, профессор (Россия), директор ООО «УЦЭЭ»; профессор кафедры энергосбережения и кафедры безопасности жизнедеятельности и Уральского государственного технического университета-УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УГТУ-УПИ).

СИЛИН Вадим Евгеньевич, кандидат технических наук, руководитель отдела энергоэффективности ООО «УЦЭЭ», старший преподаватель кафедры энергосбережения УГТУ-УПИ.

УСОВА Галина Ивановна, инженер-теплоэнергетик ООО «УЦЭЭ», студентка группы Т-55032, специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», теплоэнергетический факультет УГТУ-УПИ.

Адрес для переписки: e-mail: mail@ucee.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.08 г.

© В. П. Ануфриев, В. Е. Силин, Г. И. Усова

БАЗОВОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СОЛНЕЧНУЮ ЭНЕРГИЮ

Аналитически получена зависимость температура воды от времени суток в двухконтурном солнечном источнике горячего водоснабжения. Источник представляет собой замкнутый контур циркуляции антифриза, включающий солнечный коллектор и теплообменник (бойлер-аккумулятор) для нагревания воды. Интенсивность солнечного излучения, температура наружного воздуха и расход воды, нагреваемой в бойлере-аккумуляторе, меняются в течение суток.

Ключевые слова: горячее водоснабжение, солнечный нагреватель, нестационарные условия.

В последнее время все более широкое распространение находят солнечные водонагреватели. Между тем анализ их работы в нестационарном режиме в доступной литературе отсутствует [1–6].

В данной статье делается попытка в определенной мере заполнить этот пробел.

Постановка задачи:

Имеем установку солнечного нагревателя для ГВС. Ее схема представлена на рис. 1.

Будем считать известными и не изменяющимися во времени $c_a, M_a, k, F, F_{\text{кол}}, c_b, M_b$, где c_a, M_a, c_b, M_b — удельная теплоемкость и масса антифриза и воды соответственно;

k — коэффициент теплопередачи от антифриза к воде;

F — поверхность змеевика с антифризом;

$F_{\text{кол}}$ — площадь коллектора.

Также известны периодические функции $G_b = f(\tau)$ и $q = f(\tau)$, графики которых изображены на рис. 2.

Необходимо найти: зависимость температуры горячей воды на выходе из установки и температуры антифриза, циркулирующего по контуру, от времени $t_b = f(\tau)$ и $t_a = f(\tau)$.

Рассмотрим случай, когда кратность циркуляции антифриза настолько велика, что его температура во всех точках контура одинакова. Решаем нестационарную задачу — прогрев и охлаждение антифриза в течение суток:

$$c_a M_a dt_a = q F_{\text{кол}} d\tau - k F (t_a - \bar{t}_b) d\tau,$$

где \bar{t}_b — средняя по объему температура воды в бойлере-аккумуляторе.

Разделив обе части этого уравнения на $d\tau$, получим:

$$c_a M_a \frac{dt_a}{d\tau} = q F_{\text{кол}} - k F (t_a - \bar{t}_b). \quad (1)$$

Для простоты мощность теплопотерь в единицу времени от бойлера-аккумулятора (через его изоляцию) $Q_{\text{пот}}$ примем постоянной.

$$G_b c_b (t_b - t'_b) d\tau + M_b c_b dt_b + Q_{\text{пот}} d\tau = k F (t_a - \bar{t}_b) d\tau,$$

или

$$G_b c_b (t_b - t'_b) + M_b c_b \frac{dt_b}{d\tau} + Q_{\text{пот}} = k F (t_a - \bar{t}_b). \quad (2)$$

Будем считать перемешивание в бойлере-аккумуляторе идеальным, т.е. $\bar{t}_b = t_b$. Подставив значение $\bar{t}_b = t_b$ в уравнение (2), найдем температуру антифриза:

$$t_a = \frac{G_b c_b}{k F} (t_b - t'_b) + \frac{M_b c_b}{k F} \frac{dt_b}{d\tau} + \frac{Q_{\text{пот}}}{k F} + t_b,$$

$$\frac{dt_a}{d\tau} = \frac{c_b}{k F} \frac{d}{d\tau} [G_b (t_b - t'_b)] + \frac{M_b c_b}{k F} \frac{d^2 t_b}{d\tau^2} + \frac{dt_b}{d\tau}. \quad (3)$$

Подставив уравнения (2) и (3) в уравнение (1), получим:

$$c_a M_a \left\{ \frac{c_b}{k F} \frac{d}{d\tau} [G_b (t_b - t'_b)] + \frac{M_b c_b}{k F} \frac{d^2 t_b}{d\tau^2} + \frac{dt_b}{d\tau} \right\} = \\ = q(\tau, t_a) \cdot F_{\text{кол}} - G_b c_b (t_b - t'_b) - M_b c_b \frac{dt_b}{d\tau} - Q_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Введем избыточную температуру $\theta = t_b - t'_b$.

Подставим θ в уравнения (4). После несложных преобразований получим:

$$\frac{c_a M_a c_b M_b}{k F} \cdot \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + \left[\frac{c_a M_a c_b}{k F} \cdot G_b(\tau) + c_a M_a + c_b M_b \right] \frac{d\theta}{d\tau} + \\ + \left[\frac{c_a M_a c_b}{k F} \cdot \frac{dG_b}{d\tau} + G_b c_b \right] \theta - q \cdot F_{\text{кол}} + Q_{\text{пот}} = 0.$$

Введем безразмерный расход воды $m = G_b / \bar{G}_b$, где \bar{G}_b — средний за сутки расход воды; и безразмерное время $x = \tau / \tau_*$, где τ_* — длительность суток (или другой выбранный характерный отрезок времени).

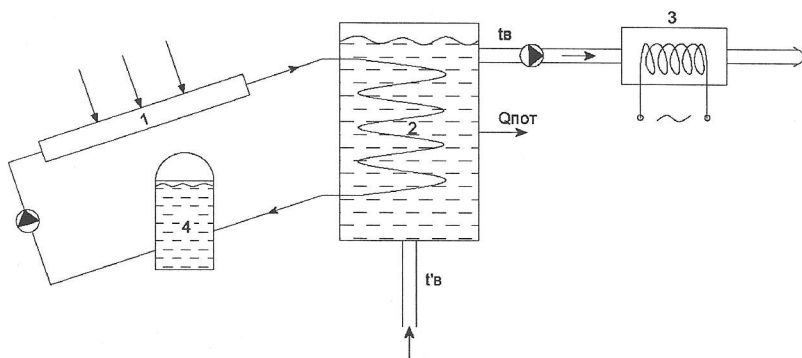


Рис. 1. Схема установки солнечного нагревателя для горячего водоснабжения:
1 – коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – электронагреватель; 4 – бак-расширитель для антифриза

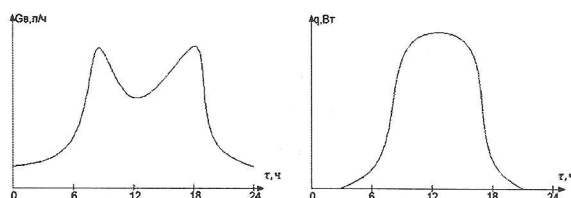


Рис. 2. Графики потребления горячей воды и прихода теплоты

$$\begin{aligned} & \frac{c_a M_a c_B M_B}{kF\tau^2} \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2} + \left[\frac{c_a M_a c_B \bar{G}_B}{kF\tau} \cdot m(x) + \right. \\ & \left. + \frac{c_a M_a}{\tau} + \frac{c_B M_B}{\tau} \right] \frac{d\theta}{dx} + \\ & + \left[\frac{c_a M_a c_B \bar{G}_B}{kF\tau} \cdot \frac{dm}{dx} + \bar{G}_B c_B m(x) \right] \theta - \\ & - q \cdot F_{\text{кол}} + Q_{\text{ПОТ}} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Приведем уравнение (5) к безразмерному виду, выбрав масштаб температуры.

Пусть $\theta_{\text{МАКС}} = t_{\text{МАКС}} - t'_B$, где $t_{\text{МАКС}}$ – максимально допустимая температура воды в бойлере-аккумуляторе.

$$y = \frac{\theta}{\theta_{\text{МАКС}}};$$

$$\theta = y\theta_{\text{МАКС}}.$$

Тогда уравнение (5) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\theta_{\text{МАКС}} c_a M_a c_B M_B}{kF\tau^2} \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + \left[\frac{\theta_{\text{МАКС}} c_a M_a c_B \bar{G}_B}{kF\tau} \cdot m(x) + \right. \\ & \left. + \frac{\theta_{\text{МАКС}} c_a M_a}{\tau} + \frac{\theta_{\text{МАКС}} c_B M_B}{\tau} \right] \frac{dy}{dx} + \\ & + \left[\frac{\theta_{\text{МАКС}} c_a M_a c_B \bar{G}_B}{kF\tau} \cdot \frac{dm}{dx} + \theta_{\text{МАКС}} \bar{G}_B c_B m(x) \right] y - q \cdot F_{\text{кол}} + Q_{\text{ПОТ}} = 0. \end{aligned}$$

Здесь: q есть функция от времени x и разности температур $(t_a - t_0)$, где t_a – связана с искомой переменной t_B уравнением (2); t_0 – температура окружающей среды.

Поделив все члены уравнения на $\frac{\theta_{\text{МАКС}} c_B M_B}{\tau}$, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{c_a M_a}{kF\tau} \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + \left[\frac{c_a M_a \bar{G}_B}{M_B kF} \cdot m(x) + \frac{c_a M_a}{c_B M_B} + 1 \right] \frac{dy}{dx} + \\ & + \left[\frac{c_a M_a \bar{G}_B}{M_B kF} \cdot \frac{dm}{dx} + \frac{\bar{G}_B}{M_B} m(x) \right] y - \frac{q \cdot F_{\text{кол}} \tau}{\theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} + \frac{Q_{\text{ПОТ}} \tau}{\theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} = 0. \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$E = \frac{\bar{G}_B \tau}{M_B}; \quad \omega = \frac{c_a M_a}{c_B M_B}; \quad N = \frac{c_B \bar{G}_B}{kF}.$$

Тогда уравнение будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\omega N}{E} \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + [N\omega \cdot m(x) + \omega + 1] \frac{dy}{dx} + \left[N\omega \cdot \frac{dm}{dx} + \right. \\ & \left. + E \cdot m(x) \right] y - \frac{F_{\text{кол}} \tau}{\theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} q(x, y) + \\ & + \frac{Q_{\text{ПОТ}} \tau}{\theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} = 0. \end{aligned}$$

Поделив на $\frac{\omega N}{E}$, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 y}{dx^2} + E \left[m(x) + \frac{1}{N} \left(1 + \frac{1}{\omega} \right) \right] \frac{dy}{dx} + E \left[\frac{dm}{dx} + \right. \\ & \left. + \frac{E}{\omega N} \cdot m(x) \right] y - \frac{EF_{\text{кол}} \tau}{\omega N \theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} q + \\ & + \frac{EQ_{\text{ПОТ}} \tau}{\omega N \theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Тепловой поток q , получаемый антифризом на единице поверхности коллектора, зависит от температуры антифриза и меняется с течением времени:

$$\begin{aligned} q &= I\eta_{\text{ОПТ}} - (t_a - t_0)(k_1 + k_2) = I\eta_{\text{ОПТ}} + t_0(k_1 + k_2) - \\ & - (k_1 + k_2) \left[\frac{G_B c_B}{kF} (t_B - t'_B) + \frac{M_B c_B}{kF} \frac{dt_B}{d\tau} + \frac{Q_{\text{ПОТ}}}{kF} + t_B \right], \end{aligned}$$

где I интенсивность солнечного излучения, падающего на единицу поверхности коллектора, Вт/м²; $\eta_{\text{ОПТ}}$ — оптический КПД коллектора.

С учетом этого запишем предпоследний член уравнения (6):

$$\frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau}}{\omega N \theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} q = \frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau}}{\omega N \theta_{\text{МАКС}} c_B M_B} \{I \eta_{\text{ОПТ}} + t_0 (k_1 + k_2) - (k_1 + k_2) \left[\frac{G_B c_B}{kF} (t_B - t'_B) + \frac{M_B c_B}{kF} \frac{dt_B}{d\tau} + \frac{Q_{\text{ПОТ}}}{kF} + t_B \right] \}.$$

Подставив полученное выражение в уравнение (6), получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} + E \left[m(x) + \frac{1}{N} \left(1 + \frac{1}{\omega} \right) \right] \frac{dy}{dx} + E \left[\frac{dm}{dx} + \frac{E}{\omega N} m(x) \right] y - \\ - \frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau}}{\omega N c_B M_B} \left(\frac{I \eta_{\text{ОПТ}} + t_0 (k_1 + k_2)}{\theta_{\text{МАКС}}} \right) + \frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau} (k_1 + k_2) G_B}{\omega N M_B kF} m y + \\ + \frac{EF_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)}{\omega N kF} \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau} (k_1 + k_2) Q_{\text{ПОТ}}}{\omega N c_B M_B kF \theta_{\text{МАКС}}} + \frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau} (k_1 + k_2)}{\omega N c_B M_B} y + \\ + \frac{EF_{\text{КОЛ}} \bar{\tau} (k_1 + k_2)}{\omega N c_B M_B \theta_{\text{МАКС}}} t'_B + \frac{EQ_{\text{ПОТ}} \bar{\tau}}{\omega N c_B M_B \theta_{\text{МАКС}}} = 0. \end{aligned}$$

Подставив значения E , ω и N после упрощений окончательно получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} + \left[\frac{G_B \bar{\tau}}{M_B} m(x) + \frac{\bar{\tau} kF}{c_B M_B} \left(1 + \frac{c_B M_B}{c_a M_a} \right) + \frac{\bar{\tau} F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)}{c_a M_a} \right] \frac{dy}{dx} + \\ + \left[\frac{G_B \bar{\tau}}{M_B} \cdot \frac{dm}{dx} + \left(\frac{G_B \bar{\tau}}{M_B} \cdot \frac{\bar{\tau} kF}{c_a M_a} + \frac{\bar{\tau}^2 F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2) G_B}{c_a M_a M_B} \right) m(x) + \right. \\ \left. + \frac{\bar{\tau}^2 kF F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)}{c_a M_a c_B M_B} \right] y - \\ - \frac{\bar{\tau}^2 kF F_{\text{КОЛ}}}{c_a M_a c_B M_B} \left(\frac{I \eta_{\text{ОПТ}} + t_0 (k_1 + k_2)}{\theta_{\text{МАКС}}} \right) + \\ + \frac{\bar{\tau}^2 F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)}{c_a M_a c_B M_B} \left(1 + \frac{kF}{F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)} \right) \frac{Q_{\text{ПОТ}}}{\theta_{\text{МАКС}}} + \\ + \frac{\bar{\tau}^2 kF F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)}{c_a M_a c_B M_B} \cdot \frac{t'_B}{\theta_{\text{МАКС}}} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Дополнительно к введенным ранее комплексам E , ω и N , обозначим:

$$A = \frac{\bar{\tau} kF}{c_B M_B}; \quad \alpha = \frac{\bar{\tau} F_{\text{КОЛ}} (k_1 + k_2)}{c_a M_a}; \quad \Pi = \frac{\bar{\tau} Q_{\text{ПОТ}}}{c_B M_B \theta_{\text{МАКС}}}.$$

В результате уравнение (7) запишется в более компактном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} + \left[Em(x) + A \left(1 + \frac{1}{\omega} \right) + \alpha \right] \frac{dy}{dx} + \\ + \left[E \cdot \frac{dm}{dx} + E \left(\frac{A}{\omega} + \alpha \right) m(x) + \alpha A \right] y - \\ - A \frac{\bar{\tau} F_{\text{КОЛ}}}{c_a M_a} \left(\frac{I \eta_{\text{ОПТ}} + t_0 (k_1 + k_2)}{\theta_{\text{МАКС}}} \right) + \\ + \Pi \left(\alpha + \frac{A}{\omega} \right) + \alpha A \cdot \frac{t'_B}{\theta_{\text{МАКС}}} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Отрицательный член в этом уравнении зависит от времени (т.е. от x) вследствие изменения интенсивности I падающего на коллектор излучения и температуры t_0 атмосферного воздуха в течение суток, поэтому он не скомпонован в безразмерный комплекс.

Уравнение (8) может быть решено либо численно на ЭВМ, либо путем разложения в ряд заданных функций $m(x)$ (т.е. G_B от τ), $t_0(\tau)$ и $I(\tau)$.

Библиографический список

1. Берковский, Б.М. Возобновляемые источники энергии на службе человека / Б.М. Берковский, В.А. Кузьминов; под ред. А.Е. Шейдлина. — М.: Наука, 1987. — 126 с. — ISBN 1-11-1.
2. Бутузов, В.А. Солнечные коллекторы в России и на Украине: конструкции и технические характеристики / В.А. Бутузов // Теплоэнергетика. — 2003. — № 1. — С. 37–40.
3. Иванов, В.П. Солнечные коллекторы: обзор конструктивных исполнений / В.П. Иванов // Промышленная энергетика. — 2004. — № 2. — С. 48–51.
4. Лазебный, В.В. Использование солнечной энергии для теплоснабжения в Бурятии / В.В. Лазебный // Промышленная энергетика. — 2002. — № 10. — С. 51–53.
5. Дэвинс, Д. Энергия [Текст]: пер. с англ. / Д. Дэвинс; ред. Д. Б. Вольфберг. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 360 с.
6. Gliddon-Bush, Charlotte Catching rays / Charlotte Gliddon-Bush // Power Engineering International. — 2002, February. — P. 32–33.

БАСКАКОВ Альберт Павлович, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Уральского федерального университета.

ЗИНЧЕНКО Дарья Антоновна, инженер ЗАО «Институт гражданского проектирования» Атомстройкомплекс, отдел отопления и вентиляции.

ВАРАНКИН Максим Викторович, студент группы Т-37023, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», специальность «Энергообеспечение предприятий», Уральский федеральный университет.

Адрес для переписки: e-mail: Max_varankin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

© А. П. Баскаков, Д. А. Зинченко, М. В. Варанкин

ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Выполнен анализ разведанных запасов основных энергетических ресурсов: нефти и газа на перспективу до 2300 года в разных странах мира и прогноз добычи угля, нефти и газа в России до 2020 г. Приведена приближенная оценка эффективности инженерно-технических мероприятий для котельных малой мощности; приведены некоторые результаты испытаний котлов фирмы «Октан» на газе.

Ключевые слова: ресурсы, прогноз, добыча, теплоэнергетика, экономичность, контроль.

Современная структура топливноэнергетического баланса в значительной степени определяется заметным истощением запасов нефти и продолжающимся повышением мировых цен на нефть, превысивших уровень 50 долларов за баррель (158,987 л). Мировые ресурсы разведанных месторождений составляют около 150 млрд т нефти (из них в странах бывшего СССР — примерно 10 млрд т, или около 7 % мировых запасов нефти) [1]. Россия добывает около 10 % от мирового производства нефти [1]. Но основными поставщиками жидких углеводородов на мировой рынок являются страны Ближнего Востока (Ирак, Саудовская Аравия, Иран), обладающие наибольшими сырьевыми ресурсами (рис. 1) [2]. В настоящее время в мире ежегодно добывается около 3 млрд т нефти. При сохранении такого уровня добычи нефти ее запасов может хватить на 50 лет. Причем из-за роста спроса на нефть будет непрерывно нарастать ее дефицит, который к 2025 г. достигнет 16 млн баррелей в день.

В Российской Федерации ситуация осложняется прогнозируемым падением добычи нефти после 2010 г. К этому времени Россия будет испытывать дефицит нефтепродуктов в размере до 10 млн т в год [1]. В то же время добыча каменного угля и природного газа в период до 2020 г. будет увеличиваться (рис. 2) [3].

Малую теплоэнергетику Омского региона характеризуют следующие признаки: значительное число объектов и большая суммарная мощность, малые мощность единичных агрегатов и капиталоемкость отдельно взятых объектов, отсутствие нормативной базы, существенная социальная значимость, значительный износ основных фондов, отсутствие квалифицированного персонала. На теплоснабжение области работают более 2000 муниципальных и ведомственных котельных. Из них более 40 расположены в Омске, а остальные в сельских районах. Эти котельные обеспечивают не менее 60 % и потребности в тепловой энергии в социальной сфере [4].

Омская областная целевая программа энергоресурсосбережения была принята в регионе одной из первых еще в 2003 г. В соответствии с губернаторской программой газификации и схемой газоснабжения области и оказалась логически связанной с более поздней программой технического перевооружения жилищно-коммунального комплекса [4].

Поэтому рациональное энергосбережение является главной задачей в практике эксплуатации теплоэнергетического оборудования в промышленной сфере и жилищно-коммунальном хозяйстве. Для решения такой задачи требуется разработка и внедрение энергосберегающих технологий с минимальными удельными расходами энергоресурсов. Это в значительной мере относится к котельным малой и средней мощности [5–7].

На котлах большой мощности, как правило, установлена специальная автоматика для контроля за режимами их работы и оптимизации этих режимов. На котельных малой и средней мощности она часто отсутствует. Это приводит к тому, что котлы со временем начинают работать в неоптимальных режимах, когда расход топлива существенно возрастает, увеличивается количество вредных выбросов.

Причины отклонения от исходного оптимального режима, на который котел настраивается при его пуске — естественная разрегулировка топливосжигающих устройств, смена вида топлива, его сорта или качества и т.д. В любом случае результатом является нерациональное (неоптимальное) использование топлива, например, его неполное сгорание, увеличение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Учитывая, что малых котельных — огромное количество, обеспечение постоянного контроля за режимами работы становится серьезной народно-хозяйственной проблемой как в области энергосбережения, так и в области охраны окружающей среды [4–8].

Анализ материалов по экономии и рациональному расходованию топлива и топливноэнергетических

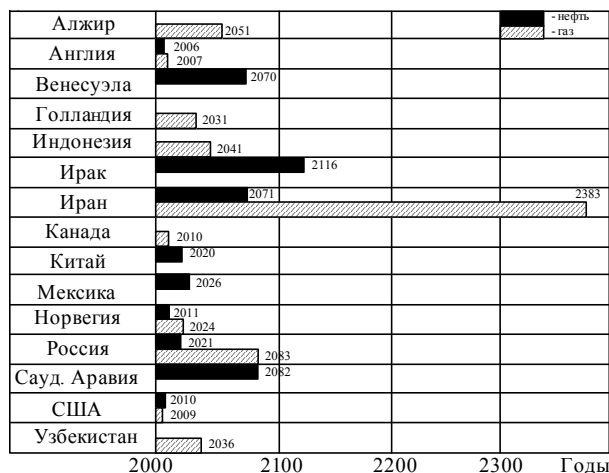


Рис. 1. Разведанные запасы полезных ископаемых в разных регионах мира (по данным организации стран-экспортеров нефти ОПЕК) с указанием прогнозируемых сроков истощения месторождений нефти и природного газа

ресурсов применительно к промпредприятиям и организациям, потребляющих тепловую энергию, позволяет наметить следующие основные пути экономии топлива: технические мероприятия, касающиеся энергоустановок, вырабатывающих тепловую энергию; технические мероприятия, касающиеся потребителей тепловой энергии; организационные мероприятия, позволяющие более точно нормировать расход тепловой энергии потребителями.

Наибольший эффект дают следующие технические мероприятия: дополнительный подогрев питательной воды котла благодаря использованию бросовой теплоты выпускных газов; перевод котлов с твердого и жидкого топлива на газообразное; уменьшение накипеобразования на поверхностях нагрева котлов; переоборудование паровых котлов в водогрейные.

Технические мероприятия по экономии топлива, касающиеся потребителей тепловой энергии, весьма разнообразны. Наиболее целесообразно эти вопросы решать непосредственно для конкретного промышленного предприятия.

К таким мероприятиям можно отнести: более полное и качественное утепление производственных и жилых помещений; снижение или полное отключение выдачи теплоты нагревателям в период длительного (более 7–8 ч) отсутствия людей в помещении (в цехе, на участке и т. д.), а в остальное время поддержание температуры в помещении не более рекомендуемой санитарными нормами; более качественную теплоизоляцию трубопроводов (особенно паровых); снижение утечек пара, воды; более полную утилизацию теплоты отработанного технического пара и т. д.

Расчеты показывают, что наличие 1 м² неизолированного паропровода с давлением 0,5 МПа приводит к перерасходу основного топлива на 0,4 кг/ч, а парение через отверстие 1 мм² при 0,7 МПа — 3,6 кг/ч.

При работе котлов необходим постоянный или периодический контроль за составом продуктов горения, позволяющий определить степень завершенности процесса сгорания (количество продуктов неполного сгорания), условия сгорания топлива (коэффициент избытка воздуха α и т. д.).

При неполном горении топлива в продуктах сгорания могут быть окис углерода, водорода, метана и другие углеводороды.

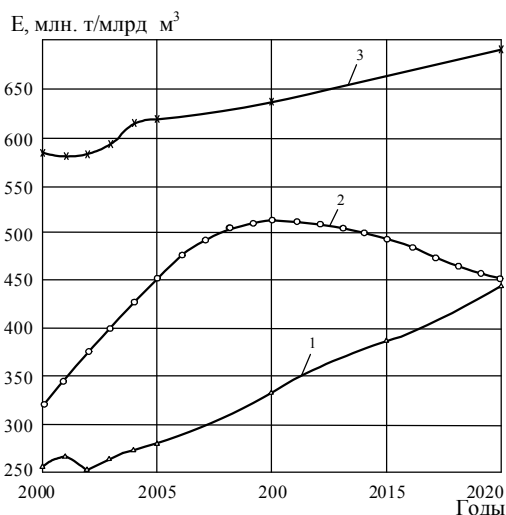


Рис. 2. Прогноз добычи каменного угля (1), нефти (2) и природного газа (3) в России на период до 2020 г.

Метан в выпускных газах может вызвать неравномерность смешения топлива с воздухом и наличие локальных низкотемпературных зон и др. Оценивать химическую неполноту сгорания топлива только по присутствию в продуктах горения СО, особенно при сжигании природного газа, недопустимо, поскольку наличие в продуктах горения даже небольшого количества метана приводит к значительным ошибкам в определении химической неполноты сгорания топлива.

Иногда при испытаниях контроль за избытком воздуха ведут только по содержанию СО₂. Однако у такого метода контроля топочного режима ряд недостатков. Содержание СО₂ в продуктах горения при наличии химической неполноты сгорания не определяется однозначно избытком воздуха даже при постоянном составе топлива. Одно и то же значение СО₂ может соответствовать двум разным значениям α . Снижение СО₂ может быть вызвано, с одной стороны, увеличением подачи воздуха в систему, а с другой — снижением α , сопровождающимся значительными потерями теплоты с химической неполнотой сгорания.

Для правильного ведения топочного режима необходим (наряду с другими газами) контроль за содержанием кислорода в выпускных газах. Только в этом случае можно быть уверенным в правильном определении α .

Во время испытаний систематически проверяют правильность и закономерность газового анализа. При этом необходимо учитывать, что: при отсутствии догорания газов в газоходах котла содержание в продуктах горения RO₂, СО, CH₄ будет постепенно уменьшаться из-за подсоса воздуха по мере удаления исследуемого сечения газохода от топки, а содержание O₂ — увеличиваться [8, 9].

Контролируют содержание RO₂ и O₂ по отдельным сечениям газохода. В зависимости от условий результаты анализа газа в каком-либо сечении газохода принимают наиболее достоверные.

Содержание RO₂ и O₂ за выбранным достоверным сечением при отсутствии химической неполноты сгорания контролируют по формуле:

$$Q_2^{\text{II}} = [RO_2^{\text{II}} O_2^{\text{I}} + 21(RO_2^{\text{I}} - RO_2^{\text{II}})] / RO_2^{\text{I}},$$

где RO₂^I и O₂^I — содержание RO₂ и O₂ в наиболее достоверном сечении газохода;

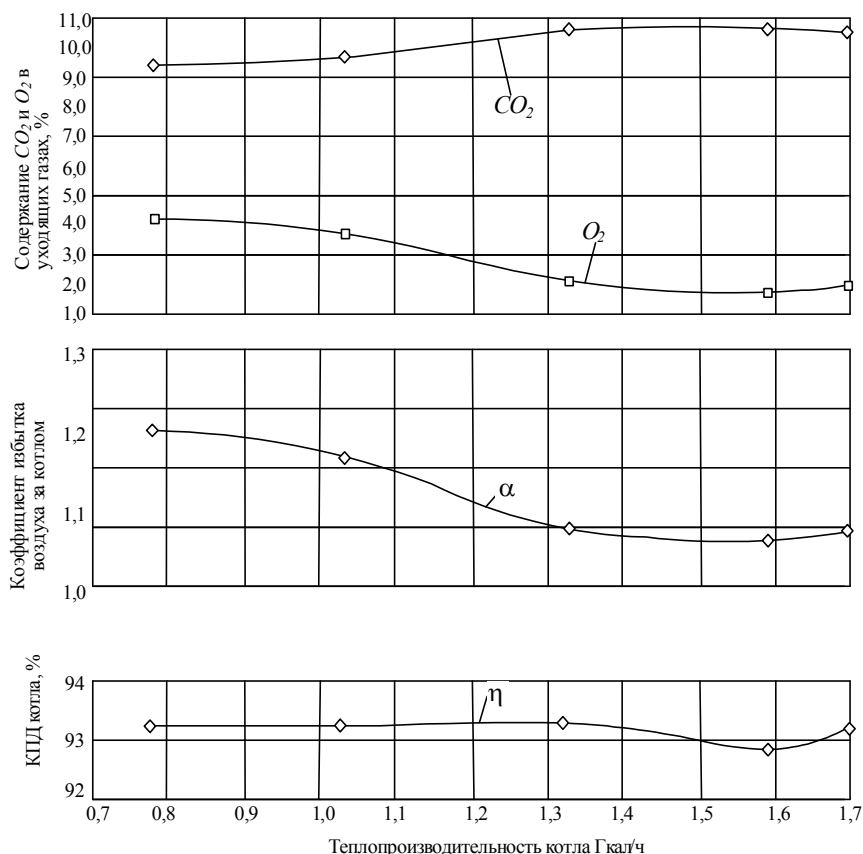


Рис. 3. Результаты пусконаладочных испытаний водогрейного котла типа KBСА-2 Омской фирмы ООО ПФ «Октан» на природном газе (газовая горелка ГТкБ-2,2)

RO_2^H и Q_2^H — то же, во втором (произвольном) сечении газозода.

Для контроля за составом газа наиболее часто применяют газоанализаторы волюметрического и хроматографического типов [8, 9].

Газоанализаторы волюметрического типа (ГХП-2, ГХП-3, ГХП-3М) предназначены для определения RO_2 , O_2 и CO . Их широко используют в производствах с небольшим количеством анализов, где погрешность измерений составляет 2 — 4 %.

В последнее время все чаще в контроле за составом выпускных газов применяют хроматографические методы контроля. С помощью хроматографов можно определить любые горючие и негорючие газы. У хроматографических газоанализаторов более высокая точность измерения, чем у волюметрических. Недостатки хроматографических газоанализаторов — длительная подготовка к работе, необходимость источника питания, использование специальных газоносителей.

По результатам газового анализа определяют тепловые потери котла с выпускными газами и из-за химического недожога.

В современных котельных периодический контроль за котлом следует заменить на непрерывный, что позволит добиться наибольшей экономичности его работы.

Известно, что режимы работы промышленных котлов и установок определяются и регулируются на основе измерений тепловых характеристик сжигания топлива в топке и показателей утилизации, переработки и транспортировки отходящих газов в атмосферу через дымовую трубу. Тепловые характеристики зависят от полноты сгорания топлива, а экологические — от степени выполнения требований

нормативных документов относительно уровня выбросов дымовых газов и содержания в них CO , NO , NO_2 , SO_2 , H_2S , CH_4 и других токсичных газов, а также утечки этих компонентов в рабочую зону помещения котельных.

При наладке топливосжигающего оборудования специализированными организациями оптимизируются режимы его работы с учетом требований максимального энергосбережения и минимального загрязнения окружающей среды вредными выбросами [4]. В результате составляется режимная карта, в которой наряду с другими многочисленными параметрами указываются концентрации CO_2 , O_2 , CO , NO — температуры отходящих топочных газов и дутьевого воздуха, коэффициент избытка воздуха за топочной камерой, КПД котла и соответствующим этим показателям оптимальный расход натурального и условного топлива на 1 Гкал выработки и отпущенной теплоты. Режимная карта утверждается ведомственной топливной инспекцией и является инструктивным документом для технического персонала, обслуживающего котлоагрегат.

На рис. 3 указаны полученные при испытаниях пусконаладочной группой фирмы ООО ПФ «Октан» экспериментальные данные о составе уходящих газов, значения коэффициента избытка воздуха α и КПД брутто водогрейного котла KBСА-2. С увеличением теплопроизводительности длительности котла экологические показатели улучшаются, а КПД брутто остается практически постоянным.

Состав уходящих газов за котлом определяли с помощью анализатора топочных газов Dräger MSI 150 EURO, который был сертифицирован в системе TUV (немецкая техническая надзорная организация) для всех измерительных каналов, поэтому является

надежным и точным средством измерения в теплоэнергетике. Техническая характеристика анализатора и результаты его аттестации приведены в нашей работе [4].

Выводы.

1. Выполнен ретроспективный анализ разведанных запасов полезных ископаемых сырьевых стран на долгосрочную перспективу.
2. Для России результаты прогнозных исследований добычи угля, нефти и газа позволяют говорить о постепенном спаде добычи нефти, начиная с 2010 года, а добыча газа и угля будет расти вплоть до 2020 года.
3. Выполненная оценка эффективности работы стационарных котельных малой мощности позволила разработать комплекс инженерных и организационных решений по повышению экономичности энергоисточников в результате внедрения эффективных методов теплотехнического контроля котлоагрегатов.

Библиографический список

1. Работы дизелей на нетрадиционных топливах / В. А. Марков [и др.]. — М.: Легион-Автодата, 2008. — 464 с.
2. Пронин, Е.Н. В поисках ответов/Е.Н. Пронин//Автозаправочный комплекс + альтернативное топливо. — 2003. — № 6. — С. 5—11.
3. Григорьев, М.В. в центре внимания — центры нефтедобычи / М. Григорьев // Нефть России. — 2004. — № 3. — С. 32—34.
4. Актуальные задачи коммунальной теплоэнергетики Омского региона / В.Р. Ведрученко [и др.]//Омский научный вестник. — 2006. — Вып. 4 (29). — С. 104—108.

5. Алешина, М. Основа добрых перемен / М. Алешина // Энергосбережение и энергетика в Омской области. — 2006. — №2 (19). — С. 3—6.

6. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями / П. А. Щинников [и др.]. — Новосибирск, 2005. — 528 с.

7. Томилов, В.Г. Проблемы теплообеспечения жилищно-коммунального комплекса / В.Г. Томилов // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты. — Новосибирск, 2004. — Вып. 8. — С. 249—263.

8. Пономаренко, И.С. Газоанализатор «Топаз-01» — топливосберегающий и природоохранный измерительный прибор / И.С. Пономаренко, И.А. Серова//Промышленная энергетика. — 2003. — № 6. — С. 13—16.

9. Селиверстов, В.М. Экономия топлива на речном флоте / В.М. Селиверстов, М.И. Браславский. — М.: Транспорт, 1983. — 231 с.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики.

КРАЙНОВ Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.

КОКШАРОВ Максим Валерьевич, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики.

ЖДАНОВ Николай Владимирович, аспирант кафедры теплоэнергетики.

КУЛЬКОВ Михаил Витальевич, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: e-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 31.08.2010 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, М. В. Кокшаров, Н. В. Жданов, М. В. Кульков

Книжные полки

620.9/О-75

Основы современной энергетики [Текст]: учеб. для вузов по направлениям подгот. «Теплоэнергетика», «Электроэнергетика», «Энергомашиностроение»: в 2 т. / под ред. Е. В. Аметистова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2008. — ISBN 978-5-383-00161-5

Т. 1: Современная теплоэнергетика / А. Д. Трухний [и др.]; под ред. А. Д. Трухния. — 2008. — 469, [1] с.: ил., табл., Прил. — Библиогр. в конце глав. — ISBN 978-5-383-00162-2.

Изложены основные закономерности явлений и процессов, на которых базируется современная теплоэнергетика; объясняются основы технологических процессов преобразования энергии первичных теплоносителей в электроэнергию и товарное тепло на тепловых, атомных, геотермальных и водородных электростанциях; рассматриваются проблемы, связанные с созданием нового энергетического оборудования; описываются конструкции паровых и газовых турбин, энергетических котлов и котлов-утилизаторов, ядерных реакторов, подогревателей сетевой воды, конденсаторов и другого оборудования.

628/К59

Козловская, В. Б. Электрическое освещение [Текст]: справочник/В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. — 2-е изд. — Минск: Техноперспектива, 2008. — 269, [2] с.: рис., табл. — Библиогр.: с. 207—208. — Предм. указ.: с. 209—210. — ISBN 978-985-6591-54-2.

В справочнике содержатся основные положения и рекомендации по проектированию электрического освещения производственных объектов и общественных зданий. Рассмотрены и систематизированы вопросы выбора источников света и осветительных приборов, светотехнического и электрического расчета сети освещения, конструктивного выполнения и защиты осветительной сети, проектирования освещения в пожароопасных и взрывоопасных помещениях.

Издание предназначено для специалистов, занятых созданием и эксплуатацией систем электроосвещения промышленных объектов. Может быть полезным при проектировании и эксплуатации осветительных установок общественных и жилых зданий, а также при подготовке специалистов в области электрического освещения.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ ПО КРИТЕРИЯМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ*

Представлена математическая модель вакуумной цементации с использованием переменных коэффициентов массопереноса. Методом функций Грина решены задачи оптимального управления процессом вакуумной цементации по критерию абсолютной точности распределения углерода и по критерию максимального быстродействия при заданной точности. Проведен анализ энергозатрат для оптимального и существующего режимов вакуумной цементации печи VUT — (LCP).

Ключевые слова: вакуумная цементация, альтернативный метод оптимизации, метод функций Грина, задача максимального быстродействия, задача максимальной точности, анализ энергозатрат.

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Цементация является одним из наиболее востребованных видов химико-термической обработки. Основой технологии цементации является поверхностное диффузионное насыщение изделий из малоуглеродистой стали углеродом при нагреве в углеродсодержащей среде, что придает необходимые прочностные свойства и повышает износостойкость. Технология вакуумной цементации позволяет эффективно регулировать профиль распределения углерода в цементованном слое. Это позволяет добиться высокой повторяемости результатов процесса, что приводит к снижению брака и неоправданных энергозатрат на неисправимый или исправимый брак (доцементацию) [1, с. 6 – 28].

Можно выделить основные источники энергозатрат для процесса вакуумной цементации [2, с. 28 – 30; 3, с. 152 – 154]:

— нагрев детали в ходе цементации, на долю которого приходится около 60% от всех расходов, связанных с производством деталей;

— энергообеспечение условий цементации, которое включает энергозатраты на создание науглероживающей атмосферы в печи, рабочее давление; операции, связанные с созданием вакуума; ионизацию и (или) создание защитной атмосферы и т.д.

— подготовительные операции, где производятся энергозатраты на операции по загрузке и выгрузке деталей из печи, промежуточные операции, связанные с транспортировкой деталей внутри печи (многокамерная конструкция) и между агрегатами, обеспечивающими окончательную термообработку деталей (закалка, отпуск).

Анализ энергозатрат позволяет осуществить декомпозицию энергоэффективности технологии вакуумной цементации и выделить частные критерии оптимизации этой технологии (рис. 1).

Существенно влияет на энергоемкость процесса группа критериев, определяющих эксплуатационное

качество процесса, — точность науглероживания. Их низкий уровень приводит к резкому повышению затрат на дополнительный выпуск деталей из-за их низкого эксплуатационного качества, к непроизводительным энергозатратам на производство бракованных деталей и на исправление брака, а также на его утилизацию. Сильное влияние на энергоемкость оказывает производительность установки, так как она определяет экономическую эффективность энерговложений. Для оптимизации технологического режима по этим критериям необходимо поставить и решить соответствующие задачи оптимального управления на базе математической модели процесса вакуумной цементации.

Математическую модель диффузии углерода для вакуумной цементации из атмосферы печи через поверхность детали, с учетом незначительной глубины диффузионного слоя по сравнению с толщиной детали для большинства изделий, обрабатываемая поверхность которых не имеет малых радиусов скруглений, кромок и т.д., можно представить в виде краевой задачи параболического типа для полубесконечной пластины [4, с. 230 – 255]:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}, t \in (0, \infty), x \in (0, \infty). \quad (1)$$

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow 0, C(x, t) \Big|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow C_0 = \text{const}, \quad (2)$$

$$C(x, 0) = f(x). \quad (3)$$

Физику переноса углерода из газовой фазы к поверхности детали наиболее адекватно отражают граничные условия третьего рода [4, с. 238]:

$$-D \cdot \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta \cdot (\varphi(t) - C(x, t) \Big|_{x=0}), \quad (4)$$

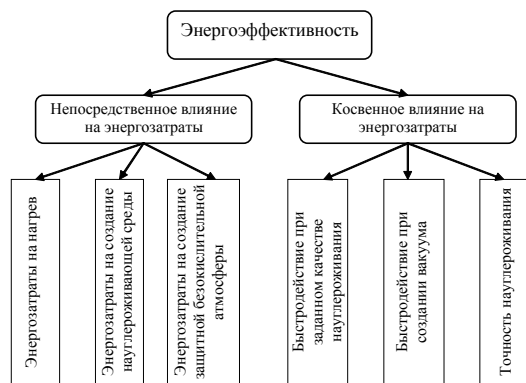


Рис. 1. Критерии энергоэффективности технологии вакуумной цементации

Здесь $C(x, t)$ — концентрация углерода, %; t — время, с.; x — глубина слоя, м.; D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; β — коэффициент массопереноса, $\text{м}/\text{с}$; $\varphi(t)$ — углеродный потенциал атмосферы, %; $f(x)$ — начальное распределение углерода, %.

Технология вакуумной цементации предполагает получение в поверхностном слое детали необходимой концентрации углерода $C(x, t)$ с наименьшим отклонением от заданного по эксплуатационным требованиям распределения $C^*(x)$, который определяет распределение по глубине детали твердости, предел прочности, износостойкость. Превышение локального отклонения $C(x, \tau_i^{(i)})$ от $C^*(x)$ сверх допустимого уровня $\rho(x)$ приводит к повышенному трещинообразованию, к снижению твердости, браку [1, с. 22]. Поэтому точность науглероживания следует оценивать минимаксным критерием, отражающим, в отличие от среднеквадратичного, абсолютное локальное отклонение в заданной пространственной области $x \in [0, h_{\text{сн}}]$ результирующего профиля концентрации углерода от заданного.

В ходе диффузионного насыщения нет необходимости и технической возможности обеспечить в конце процесса точную реализацию заданного профиля $C^*(x)$, так как в производственных условиях всегда на процесс воздействует ряд неконтролируемых возмущений: вариация начального содержания углерода в стали C_0 , нестабильность газового состава среды, неравномерность потока атмосферы и т.д. Кроме того, заданный профиль $C^*(x)$ может не принадлежать решению краевой задачи (1) — (4), что вообще свидетельствует о его принципиальной недостижимости. Поэтому в реальных условиях допустимых диапазонов изменения параметров и состояния модели (1) — (4) требуемое результирующее состояние процесса цементации трансформируется из заданного распределения концентрации $C^*(x)$ в некоторую область Ω — «трубку» допустимых отклонений $C^*(x) \pm \rho(x)$, которая характеризуется Чебышевской мерой [5, с. 5 — 37]:

$$\varepsilon = \max_{x \in [0, h_{\text{сн}}]} |C^*(x) - \rho(x)|, \quad (5)$$

где $h_{\text{сн}}$ — глубина диффузионного слоя, и $|\rho(x)| > 0$ почти всюду на отрезке $x \in [0, h_{\text{сн}}]$. Для получения максимально высокой износостойкости величина ε должна быть минимальной. Удовлетворение условия

$$\min_{0 \leq \varphi(t) \leq \varphi_{\text{max}}} \max_{x \in [0, h_{\text{сн}}]} |C^*(x) - C(x, t)|, t = \tau_i^{(i)}, \quad (6)$$

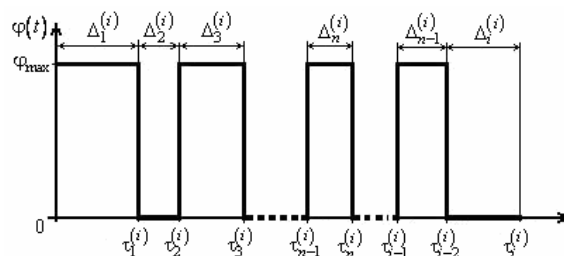


Рис. 2. Общий вид управляющего воздействия

где $\tau_i^{(i)}$ — время окончания процесса цементации, не единственное технологическое требование. Для достижения максимальной производительности и снижения на этой основе удельной энергоёмкости необходимо обеспечить минимум времени цементации $\tau_i^{(i)}$ при условии $\varepsilon = \varepsilon_{\text{min}}^{(i)}$, которое, в свою очередь, обеспечивает заданное качество упрочненного слоя. При этом сокращение времени цементации благоприятно влияет на структуру металла [3, с. 156].

В случае превышения предельного значения концентрации углерода C_{max} на цементируемой поверхности возможно образование карбидной сетки, которая характеризуется высокой хрупкостью и снижает износостойкость детали, поэтому вводится ограничение на максимальный уровень концентрации углерода [1, с. 23; 3, с. 153]:

$$C(x, t) \leq C_{\text{max}}, \forall t \in [0, \tau_i^{(i)}], x \in [0, \infty). \quad (7)$$

Конструкция и ресурсные возможности печи для вакуумной цементации обуславливают ограничения на максимальный расход ацетилена, диссоциация которого определяет максимальный углеродный потенциал φ_{max} атмосферы печи [2, с. 29; 3, с. 154 — 155]:

$$0 \leq \varphi(t) \leq \varphi_{\text{max}}, \quad (8)$$

который рассматривается в качестве управляющего воздействия.

Таким образом, для объекта управления (1) — (4) в условиях ограничений (7), (8), обоснованы задачи:

— максимального быстродействия при заданном качестве науглероживания:

$$J_{\tau}^{\text{опт}} = \min_{0 \leq \varphi(t) \leq \varphi_{\text{max}}} \tau_i^{(i)} \Big|_{C(x, \tau_i^{(i)}) \in \Omega}; \quad (9)$$

— максимальной точности науглероживания при заданной производительности:

$$J_{\varepsilon}^{\text{опт}} = \min_{0 \leq \varphi(t) \leq \varphi_{\text{max}}} \max_{x \in [0, h_{\text{сн}}]} |C(x, \tau_i^{(i)}) - C^*(x)|, t = \tau_i^{(i)}. \quad (10)$$

Поставленные задачи представляют собой задачи оптимального управления с подвижным правым концом траектории в бесконечномерной негладкой области

$$\Omega = \left\{ C(x, t) : \max_{x \in [0, h_{\text{сн}}]} |C(x, \tau_i^{(i)}) - C^*(x)| \leq \varepsilon \right\} \quad (11)$$

допустимых результирующих состояний для заданной $\varepsilon = \varepsilon_3$ или предельно достижимой $\varepsilon = \varepsilon_{\text{min}}^{(i)}$ точности в области допустимых управлений i -го класса [4, с. 170 — 195; 5, с. 41 — 122].

В работах [2, с. 30; 3, с. 155; 5, с. 12 — 133] показано, что решение поставленных задач оптимизации с по-

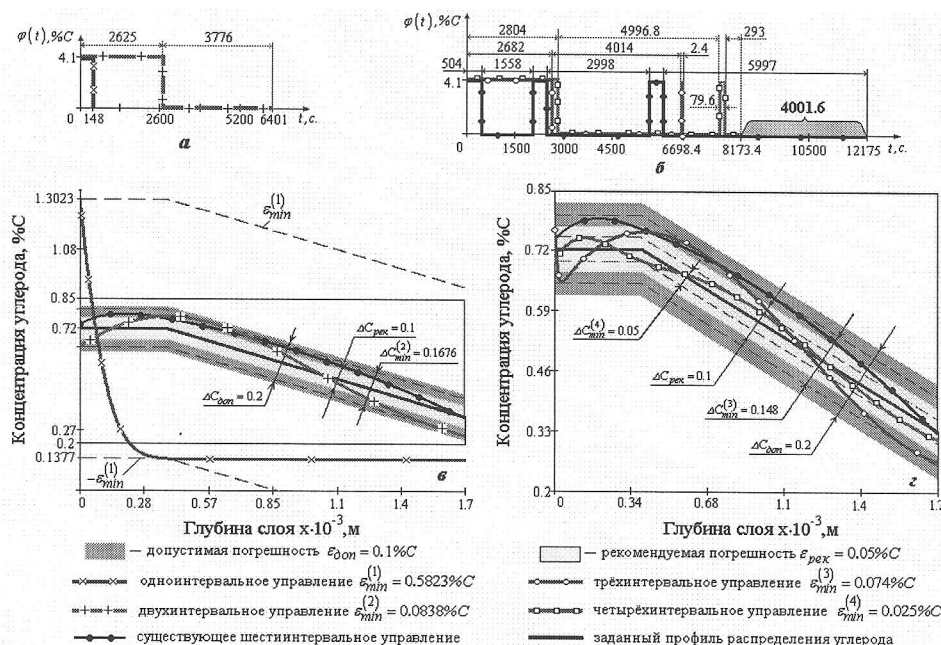


Рис. 3. Оптимальное по точности управление процессом вакуумной цементации

мощью альтернансного метода оптимизации (АМО) сводится к поиску количества i и длительности $\Delta_n^{(i)}$, $n = 1, 2, \dots, i$ интервалов постоянства оптимального управления $\varphi = \varphi^{\text{опт}}(t) = \varphi(\Delta_n^{(i)})$ (рис. 2).

Доказательная часть теории АМО рассмотрена в работе [5, с. 12 – 37]. Метод основан на использовании специфических свойств результирующих состояний оптимального процесса. Эти свойства позволяют получить достаточное количество уравнений вида:

$$\theta(z, \tau_i^{(i)}) \Big|_{z=z_{kj}} = \pm \varepsilon_m; \quad \partial \theta(z, \tau_i^{(i)}) / \partial z \Big|_{z=z_{zj}} = 0, \quad (12)$$

для определения параметров $\Delta_n^{(i)}$, $\varepsilon_{\min}^{(i)}$ поставленных оптимальных задач (9), (10). Здесь $\theta(z, \tau_i^{(i)}) = (C(x, \tau_i^{(i)}) - C^*(x)) / (\varphi_{\max} - C_0)$; $z = x/h$; $\varepsilon_m = \varepsilon(\varphi_{\max} - C_0)$; $z_r = 1, h_{ca}$ – граничные точки функции $\theta(z, \tau_i^{(i)})$; $i = 1, 2, \dots, J$; $z_{kj} = z_{zj} \cup z_r$, $j = 1, 2, \dots, S$; $S = i$ при $\varepsilon_{\min}^{(i-1)} \geq \varepsilon_{\min}^{(i)}$; $S = i + 1$ при $\varepsilon_{\min}^{(i)} < \varepsilon_{\min}^{(i-1)}$; $\tau_i^{(i)} = \Sigma \Delta_n^{(i)}$ для $n = 1, 2, \dots, i$. При этом наименьшая точность $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ достигается на подмножестве одноинтервальных управлений $i = 1$, а наибольшая точность $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(J)} = \varepsilon_{\text{ин}} \geq 0$ обычно достигается на подмножестве определенного количества интервалов $i = J$. Таким образом, решением последовательности задач максимальной точности (9) формируется ряд неравенств:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} < \varepsilon_{\min}^{(2)} < \dots < \varepsilon_{\min}^{(i)} < \dots < \varepsilon_{\min}^{(J)} = \varepsilon_{\text{ин}} \geq 0. \quad (13)$$

Очевидно, для решения определяющей системы (12) необходимо получить прямое решение краевой задачи (1) – (4) относительно $C(x, t)$ для управления в форме (рис. 2):

$$\varphi(t) = \varphi(\Delta_n^{(i)}) = \begin{cases} \varphi_{\max}, n = 1, 3, 5, \dots \\ 0, n = 2, 4, 6, \dots \end{cases}, n = 1, 2, \dots, i. \quad (14)$$

где n – номер стадии, нечетный для стадии насыщения и четный для стадии диффузии.

Приведенная математическая модель (1) – (4) удовлетворительно описывает на качественном уровне распределение концентрации углерода в цементованном слое. Однако коэффициенты массопереноса β и диффузии D изменяются в достаточно широких пределах в зависимости от конструкции печи, свойств обрабатываемого материала и других факторов. Поэтому для адекватного математического описания конкретного технологического процесса необходимо идентифицировать указанные параметры [2, с. 34; 3, с. 156; 5, с. 42 – 99].

Использование в математической модели постоянных коэффициентов массопереноса β и диффузии D , приводит к неудовлетворительному отклонению расчетного профиля распределения углерода от экспериментального. Это объясняется тем, что механизм массопереноса углерода с поверхности детали в глубину на стадиях насыщения и диффузии различен [2, с. 33; 3, с. 156] из-за диссоциации ацетилена на поверхности металла в циклах поступления ацетилена и разуглероживания поверхности в циклах пауз. Поэтому в математической модели вакуумной цементации необходимо использовать переменные коэффициенты массопереноса на стадиях насыщения и диффузии (15).

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_1, t \in (\tau_{i-1}^{(i)}, \tau_i^{(i)}), \text{ при } i = 1, 3, 5, \dots \\ \beta_2, t \in (\tau_{i-1}^{(i)}, \tau_i^{(i)}), \text{ при } i = 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (15)$$

где i – количество полных циклов в программах цементации.

Таким образом, структура управления (14) определяет краевую задачу (1) – (4) как задачу с переменными во времени коэффициентами β в соответствии с зависимостью (15).

Очевидно, что для решения системы (12) необходима явная форма краевой задачи (1) – (4). Для её получения используется метод функций Грина, согласно которому решение представляется в виде

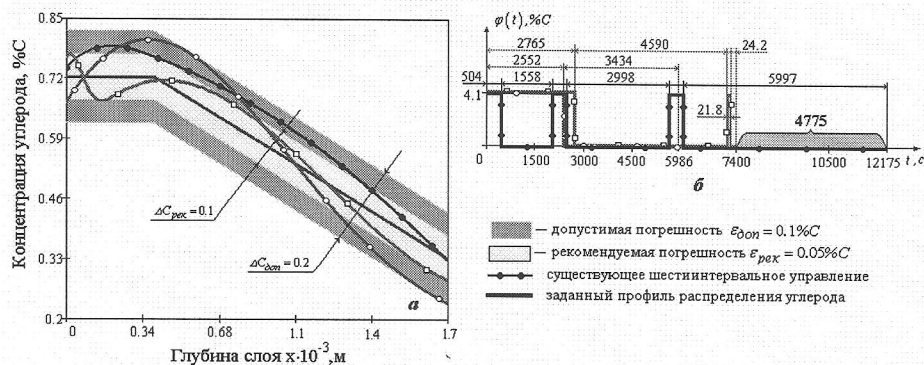


Рис. 4. Оптимальное по быстродействию управление процессом вакуумной цементации

свёртки начальных и краевых условий с функцией Грина и для i -интервального управления имеет вид [6, с. 45–55]:

$$C^{(i)}(x, t) = \int_0^{\infty} C^{(i-1)}(\xi, t) \cdot G(x, \xi, t) \Big|_{t=\tau_i^{(i)}} d\xi - \int_0^t g(\tilde{\tau}) \cdot G(x, 0, t - \tilde{\tau}) d\tilde{\tau}, \quad (16)$$

где функция Грина

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x - \xi)^2}{4Dt} \right] + \exp \left[-\frac{(x + \xi)^2}{4Dt} \right] - \frac{\beta(t)}{D} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{(x + \xi + \eta)^2}{4Dt} \right] \cdot \frac{\beta(t)}{D} \cdot \eta d\eta \right\},$$

$$g(t) = -\frac{\beta(t)}{D} \cdot \varphi(t).$$

Для реального примера $\varphi_{\max} = 4.1\%C$, $\beta_1 = 2.22 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$, $\beta_2 = 6.94 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$, $D = 6.194 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ цементации шарошек буровых долот, согласно технологическим требованиям на допустимую $\varepsilon_{\text{гон}} = 0.1\%C$ и рекомендованную $\varepsilon_{\text{рек}} = 0.05\%C$ погрешности науглероживания, решена задача оптимального управления по критерию абсолютной точности распределения углерода по толщине поверхностного слоя (10). В результате определены минимально возможные погрешности $\varepsilon_{\min}^{(i)}$ в заданном классе управлений i и соответствующие им длительности интервалов постоянства $\Delta_{\eta}^{(i)}$ углеродного потенциала (рис. 3).

Из рис. 3в, г видно, что области $\Delta C_{\text{рек}} = 0.1\%C$, соответствующей рекомендованной технологией погрешности $\pm \varepsilon_{\text{рек}}$, отвечает только четырёхинтервальное управление $C_{\min}^{(4)} = 0.05\%C$. При сравнении общей длительности процесса (рис. 3а, б) существующего шестиинтервального управления, предложенного разработчиками оборудования, и оптимального четырёхинтервального управления выигрыш по времени составил 4001,6с.

Однако достижимая здесь точность зачастую превышает требования реального производства. Поэтому для допустимой $\varepsilon_{\text{гон}}$ и рекомендованной $\varepsilon_{\text{рек}}$ погрешностей решены задачи оптимального управления по критерию максимального быстродействия (9) при заданной точности (рис. 4). При сравнении оптимального по быстродействию алгоритма (рис. 4б), удовлетворяющим области $\Delta C_{\text{рек}}$ (рис. 4а), с существующим шестиинтервальным управлением,

удовлетворяющим области $\Delta C_{\text{гон}} = 0.2\%C$, которая обозначает отклонение допустимой погрешности $\pm \varepsilon_{\text{гон}}$, выигрыш по времени составил 4775с.

Таким образом, из рис. 3 и 4 видно, что для вакуумной печи VUT – (LCP) производительностью 0,25 т/час полученные оптимальные алгоритмы управления обеспечивают снижение удельной энергоёмкости на 370 кВт/т за счет увеличения производительности печи на 13%, что соответствует годовому снижению энергозатрат на величину около 600 МВт при полной загрузке оборудования (7200 часов за год).

Библиографический список

1. Корецкий, Я. Цементация стали [Текст] / Ян Корецкий; перевод с чеш. Ю. Н. Савенкова; под ред. И. Т. Баруздина — Л.: Госуд. союзное изд-во судостроительной промышленности, 1962. — 231 с.
2. Деревянов, М.Ю. Системная оптимизация упрочнения поверхности контактирующих деталей методами ХТО [Текст] / М.Ю. Деревянов, М.Ю. Лившиц, В.Я. Липкинд // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та, Сер. «Технические науки». — 2005. — № 33. — С. 28–34.
3. Головской, А.Л. Оптимизация вакуумной цементации как объекта управления с распределенными и переменными параметрами [Текст] / А.Л. Головской и [др.] // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». — 2007. — № 1(19) — С. 152–158.
4. Егоров, А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами [Текст] / А. И. Егоров. — М.: Наука, 1978. — 464 с.
5. Рапопорт, Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации [Текст] / Э. Я. Рапопорт. — М.: Наука, 2000. — 336 с. — ISBN 5-02013069-9.
6. Дилигенский, Н. В. Современные методы математического моделирования теплопроводности в теплоэнергетике и машиностроении [Текст] / Н. В. Дилигенский и [др.]. — Самара: СамГТУ, 1995. — 335 с. — ISBN 5-230-06494.

ДЕРЕВЯНОВ Максим Юрьевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

ЛИВШИЦ Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

ФЕДОРЧЕНКО Дмитрий Михайлович, аспирант кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

Адрес для переписки: e-mail: mder2007@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 31.06.2010г.

© М. Ю. Деревянов, М. Ю. Лившиц, Д. М. Федорченко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА БАЗЕ АППАРАТОВ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Повышение эффективности установок воздушного охлаждения (УВО) достигается совершенствованием конструкций аппаратов воздушного охлаждения (АВО) с целью повышения их теплового и аэродинамического КПД в том числе за счет многовентиляторных блоков. Рассмотрено сравнение дискретного и частотного способов регулирования расхода охлаждающей среды для УВОГ, состоящей из двухвентиляторных АВО типа 2АВГ-75С в количестве 12 шт., а также УВОГ из многовентиляторных АВО типа АВГ-85МГ в количестве 14 шт.

Ключевые слова: установка воздушного охлаждения, аппарат воздушного охлаждения, способ регулирования, частотно-регулируемый привод.

Эффективность энергосбережения для установок воздушного охлаждения (УВО) технологических потоков представляет собой функцию многих параметров. В основном целью ее является обеспечение оптимальных режимов работы теплообменного оборудования в течение сезонной эксплуатации [1], что во многом определяется средствами регулирования режимов охлаждения, и в частности оснащением теплообменных аппаратов различным числом вентиляторов.

Энергосбережение данных установок обеспечивается в настоящее время в основном при помощи дискретного (порядное отключение части вентиляторов) и частотного регулирования энергопотребления приводов аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1–5].

В свою очередь в последнее время наряду с известными конструкциями двухвентиляторных АВО, например 2АВГ-75С, используемых для установок воздушного охлаждения газов (УВОГ) компрессорных станций магистральных газопроводов [3] разработаны и находят все более широкое применение новые конструкции АВО, типа АВГБ-83, АВГ-БМ-83, АВГ-85МГ, в которых увеличено количество вентиляторов (6 шт.) и понижена мощность приводного двигателя (13,0 и 6,5 кВт) [4–5].

Ощутимым преимуществом многовентиляторных АВО является более равномерный обдув теплообменной поверхности и более высокая точность в достижении требуемого температурного уровня охлаждаемого газа за счет повышения дискретизации регулированием пуск/останов электродвигателей. Среди последних выделяются АВО типа АВГ-85МГ (6 вентиляторов мощностью по 6,0–6,5 кВт), которые при небольших потерях тепловой эффективности обеспечивают существенную экономию электроэнергии на привод вентиляторов за счет разреженной

организации трубного пучка и, соответственно, снижение его аэродинамического сопротивления по охлаждающему воздушному потоку [4].

Однако реализация энергосбережения за счет частотного регулирования приводов (ЧРП) многовентиляторных АВО сопряжена с дополнительными капитальными затратами, связанными с необходимостью обеспечения группового или индивидуального оборудования (преобразователи частоты (ПЧ), система автоматического управления) для большего числа вентиляторов [6–7].

Таким образом, обоснованный выбор наиболее предпочтительных мероприятий, направленных на энергосбережение для установок воздушного охлаждения (и в частности УВОГ), а также уровень их эффективности представляет собой в общем случае задачу оптимизации в зависимости от числа вентиляторов АВО z_b .

При энергетическом решении данной задачи в качестве критерия эффективности может быть принято потребление электроэнергии УВО при охлаждении газа $N_{УВО}$, причем для адекватного сравнения рассматриваемых вариантов необходимо зафиксировать расход охлаждающего воздуха Q_B .

При экономическом решении данной задачи в качестве критерия эффективности можно использовать срок окупаемости $\tau_{\text{окуп}}$ или стоимость жизненного цикла УВО, оснащенной требуемым для этих целей оборудованием [1].

$$C_{ЖЦ}^{УВО} = K + \sum_{i=1}^{T_p} \frac{(C_{\text{охл}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{эсп}})}{(1+E)^i}, \quad (1)$$

где K — капитальные затраты, определяющие состав и стоимость оборудования УВО, в том числе для реализации дискретного или частотного регулирования;

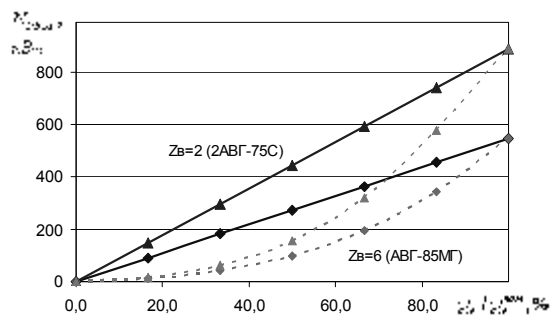


Рис. 1. Потребление электроэнергии для УВОГ на базе 2ABГ-75С и АВГ-85МГ при дискретном (—) и частотном (.....) регулировании производительности

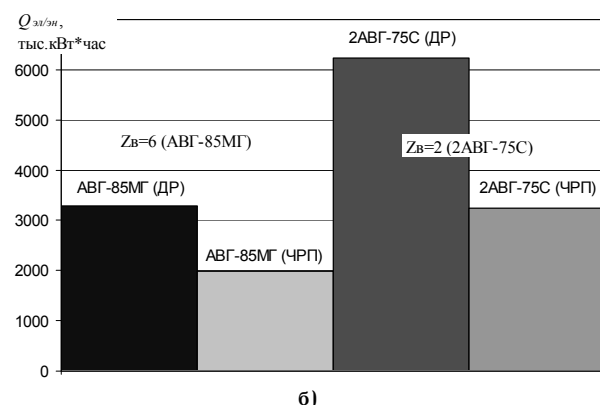
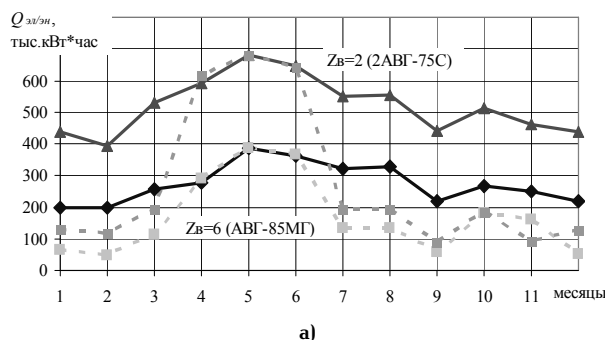


Рис. 2. Расход электроэнергии для УВОГ на базе 2ABГ-75С и АВГ-85МГ при дискретном (—) и частотном (.....) регулировании производительности

$C_{\text{охл}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{экс}} = \mathcal{E}_{\text{год}}$ — годовые эксплуатационные расходы УВО, включающие затраты на привод вентиляторов $C_{\text{охл}}$, затраты на выполнение плановых ремонтных работ $C_{\text{рем}}$ и затраты на финансирование технических экспертиз выработавших ресурс АВО и регулирующего оборудования $C_{\text{экс}}$; E — норма доходности; T_p — расчетный период.

Причем годовые эксплуатационные затраты на привод вентиляторов должны определяться последовательно для каждого месяца при средней температуре наружного воздуха и обоснованном значении $t_{\text{охл}}$. В свою очередь, температура технологического потока на выходе УВО может быть получена на этапе энергетической оптимизации технологического участка (ТУ).

Тогда задача оптимизации обоснованного выбора способа энергосбережения (дискретного или частотного) способа регулирования температуры технологического потока на выходе из установки $t_{\text{охл}}$ мо-

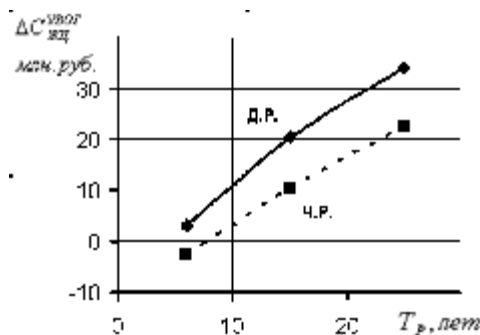


Рис. 3. Приращение стоимости жизненного цикла для УВОГ на базе 2ABГ-75С ($Z_b=2$) и АВГ-85МГ ($Z_b=6$) при дискретном (Д.Р.) и частотном (Ч.Р.) регулировании производительности вентиляторов

жет быть сформулирована в следующем обобщенном виде:

$$\begin{cases} \bar{\psi} = \text{opt}_{Z_b} \bar{\psi} (Q_e, t_{\text{охл}}^{\text{opt}}, \text{CAU ABO}) \\ Q_e = Q_e^{\text{ЧРП}} = Q_e^{\text{ДР}} \\ \text{или} \\ t_{\text{охл}}^{\text{opt}} = t_{\text{охл}}^{\text{ЧРП}} = t_{\text{охл}}^{\text{ДР}} \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{\psi} = \{N_{\text{УВОГ}}, Q_{\text{эл/эн}}, \tau_{\text{окуп}}, C_{\text{жц}}^{\text{УВО}}\}$.

При энергетическом решении обобщенной задачи оптимизации (2) для установки воздушного охлаждения газа на компрессорной станции магистрального газопровода рассматривались варианты компоновки УВОГ на базе двухвентиляторных АВО типа 2ABГ-75С в количестве 12 шт. и многовентиляторных АВО типа АВГ-85МГ в количестве 14 шт.

В качестве локальных критериев эффективности могут быть приняты: потребление электроэнергии УВОГ при охлаждении газа $N_{\text{УВОГ}}$, а также расход электроэнергии $Q_{\text{эл/эн}}$.

$$\begin{cases} \bar{\psi} = \text{opt}_{Z_b} \bar{\psi} (Q_e, t_{\text{охл}}^{\text{opt}}, \text{CAU ABO}) \\ Q_e = Q_e^{\text{ЧРП}} = Q_e^{\text{ДР}} \text{ или } t_{\text{охл}}^{\text{opt}} = t_{\text{охл}}^{\text{ЧРП}} = t_{\text{охл}}^{\text{ДР}} \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{\psi} = \{N_{\text{УВОГ}}, Q_{\text{эл/эн}}\}$.

Сравнение вариантов производилось при фиксированных расходе Q_b (рис. 1) или температуре охлаждения газа $t_{\text{охл}}^{\text{opt}}$ (рис. 2). При использовании ЧРП для каждого заданного уровня Q_b температуры газа после УВОГ ниже, а тепловой КПД выше, чем при дискретном регулировании. Из графиков функций $N_{\text{УВОГ}}$ (рис. 1) и $Q_{\text{эл/эн}}$ (рис. 2) следует, что использование ЧРП обеспечивает существенное снижение энергопотребления по сравнению с дискретным регулированием. При этом для АВГ-85МГ ($Z_b=6$) наблюдается некоторое снижение эффекта от применения ЧРП по сравнению с 2ABГ-75С ($Z_b=2$).

На рис. 2а отражена динамика изменения среднемесячных расходов электроэнергии, затрачиваемой на охлаждение газа до заданной фиксированной температуры $t_{\text{охл}}^{\text{opt}} = t_{\text{охл}}^{\text{ЧРП}} = t_{\text{охл}}^{\text{ДР}}$. На рис. 2б показаны годовые расходы электроэнергии на привод вентиляторов.

При экономическом решении обобщенной задачи оптимизации (2) сравнение вариантов систем регу-

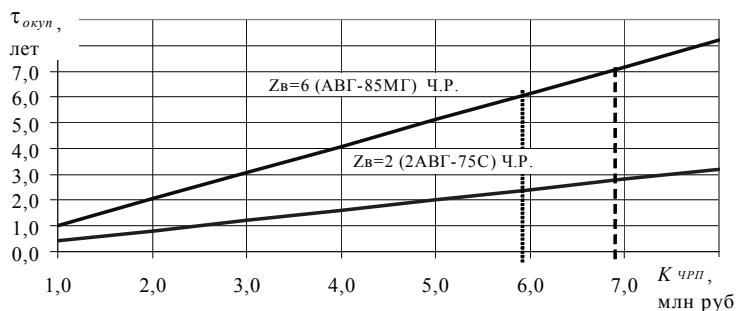


Рис. 4. Срок окупаемости для УВОГ на базе 2АВГ-75С (Zв=2) и АВГ-85МГ (Zв=6) при частотном (Ч.Р.) регулировании производительности вентиляторов

лирования УВОГ производилось при фиксированной оптимальной температуре охлаждения газа $t_{охл}^{opt}$, значение которой может быть рекомендовано или получено на этапе энергетической оптимизации энергозатрат ТУ для заданного режима работы КС и среднемесячной температуры грунта и обеспечивается при дискретном регулировании — количеством включенных вентиляторов АВО, при частотном регулировании путем изменения их производительности.

В качестве локальных критериев эффективности УВОГ приняты срок окупаемости $\tau_{окуп}^{УВОГ}$ и стоимость жизненного цикла УВОГ $C_{жц}^{УВОГ}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\psi} = opt_{Z_b} \bar{\psi}(t_{охл}^{opt}, CAU ABO) \\ t_{охл}^{opt} = t_{охл}^{ЧРП} = t_{охл}^{ДР} \end{array} \right. \quad (4)$$

где $\bar{\psi} = \{ \tau_{окуп}^{УВОГ}, C_{жц}^{УВОГ} \}$.

Результаты расчетов УВОГ, выполненных на базе шестивентиляторных АВГ-85МГ (12 шт.) и двухвентиляторных 2АВГ-75С (14 шт.) при дискретном и частотном способах регулирования, приведены для $\Delta C_{жц}^{УВОГ} = C_{жц}^{УВОГ}(Z_b=2) - C_{жц}^{УВОГ}(Z_b=6)$ на рис. 3, а для $\tau_{окуп}$ на рис. 4.

В результате применения ЧРП по сравнению с дискретным регулированием максимальная экономия электроэнергии за месяц для АВО типа 2АВГ-75С (Zв=2) составляет около 250 тыс. кВт·час, а годовая экономия — около 1900 тыс. кВт·час, что составляет соответственно порядка 60% и 30% в сравнении с дискретным регулированием.

УВОГ, выполненная на базе АВО типа АВГ-85МГ (Zв=6), обладает большей удельной тепловой эффективностью и гибкостью при решении задач сезонного регулирования. Поэтому суммарный годовой расход электроэнергии для УВОГ на базе шестивентиляторных АВО с ЧРП ощутимо (на 1000 тыс. кВт·ч) меньше, чем для аналогичных УВОГ на базе АВО с числом вентиляторов Zв=2.

В то же время максимальная месячная экономия электроэнергии для АВО типа АВГ-85МГ (Zв=6), оснащенных САУ с ЧРП по сравнению с дискретным регулированием составляет не более 140 тыс. кВт·час, а годовая — 700 тыс. кВт·час, или 50% и 22% соответственно.

В результате при использовании ЧРП вместо дискретного регулирования для аппаратов с большим числом вентиляторов (Zв=6) расход электроэнергии и суммарный годовой эффект от внедрения уменьшаются. Это находит выражение и в приращении

стоимости жизненного цикла $\Delta C_{жц}^{УВОГ}$ (рис. 3) и в сроках окупаемости $\tau_{окуп}$ (рис. 4) оценочный срок которых от внедрения системы ЧРП составит применительно к 2АВГ-75С (Zв=2) в пределах 2,5–3,0 лет, а для АВГ-85МГ (Zв=6) — в пределах 6–7 лет.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Экономия электроэнергии в случае применения ЧРП, имеет место и для УВОГ на базе 2АВГ-75С (Zв=2) и для УВОГ на базе АВГ-85МГ (Zв=6), которая может составлять около 1900 тыс. кВт·час и 700 тыс. кВт·час в год, что при существующих тарифах на электроэнергию и стоимости САУ ЧРП определяет срок окупаемости ЧРП в пределах 2,5–3,0 (Zв=2) лет и 6–7 лет (Zв=6) соответственно.

2. Применение дискретного регулирования для многовентиляторных АВО типа АВГ-85МГ (Zв=6) примерно совпадает по энергетической эффективности с применением ЧРП для двухвентиляторных АВО типа 2АВГ-75С (Zв=2).

3. С точки зрения комплексной энергоэкономической оценки для УВО на базе аппаратов с малым числом вентиляторов предпочтительно частотное регулирование привода, а для УВО на базе аппаратов с большим числом вентиляторов — дискретное регулирование.

Библиографический список

1. Крупников, А.В. Анализ эффективности регулирования режимов работы аппаратов воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях / А.В. Крупников, А.Д. Ваняшов, И.А. Январев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2010. — № 1. — С. 20 — 23.
2. Шпотаковский, М.М. Оптимизация режимов работы установок воздушного охлаждения газа на КС / М.М. Шпотаковский // Газовая промышленность. — 2005. — № 11. — С. 51 — 53.
3. Аршакян, И.И. Повышение эффективности работы установок охлаждения газа / И.И. Аршакян, А.А. Тримбач // Газовая промышленность. — 2006. — № 12. — С. 52 — 55.
4. Аппараты воздушного охлаждения нового поколения. Оптимальное сочетание параметров теплообменного блока и вентиляторной установки. Снижение энергопотребления аппарата и удобство его эксплуатации / П.А. Аксенов [и др.] // Нефтегаз. — 2003. — № 2. — С. 109 — 111.
5. Алимов, С.В. Аппараты воздушного охлаждения газа: опыт эксплуатации и пути совершенствования / С.В. Алимов, В.А. Лифанов, О.Л. Миатов // Газовая промышленность. — 2006. — № 6. — С. 54 — 57.
6. Загоринский, Э.Е. Эффективность применения частотно-регулируемых приводов в АВО газа на КС / Э.Е. Загоринский, А.И. Гулиенко // Газотурбинные технологии. — 2007. — № 9. — С. 32 — 35.

7. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ / С.В. Алимов [и др.] // Газовая промышленность. — 2009. — № 4. — С. 54 — 56.

КРУПНИКОВ Антон Владимирович, главный специалист ОАО «Сибнефтьтранспроект».
ВАНЯШОВ Александр Дмитриевич, кандидат техни-

ческих наук, доцент кафедры «Компрессорные и холодильные машины и установки» ОмГТУ.

ЯНВАРЕВ Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики ОмГТУ.

Адрес для переписки: e-mail: iayanvarev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

© А. В. Крупников, А. Д. Ваняшов, И. А. Январев

УДК 620.9.001.12/18

А. Ф. РЫЖКОВ
А. В. ПОПОВ
Т. Ф. БОГАТОВА
В. Е. СИЛИН
П. В. ОСИПОВ

Уральский государственный
 технический университет-УПИ
 им. первого Президента России
 Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ КОНВЕРСИИ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В связи с необходимостью выбора и промышленного освоения новых для российской энергетики эффективных угольных и биотопливных парогазовых технологий проведены расчетно-экспериментальные исследования по повышению тепловой эффективности автотермической конверсии низкосортных топливно-энергетических ресурсов (торф, древесина, бурый уголь и др.) в кондиционный топливный газ и произведена оценка энергетической эффективности их использования в парогазовых установках.

Ключевые слова: автотермический, аллотермический режим, газификация, низкосортные топлива, парогазовый цикл, химический КПД.

Введение. Уверенное внедрение газификационных технологий в российской энергетике может еще долго сдерживаться вследствие низкой эффективности термохимической конверсии (ТХК) топлив в конечные продукты. В случае газификации коэффициент преобразования теплоты сгорания топлива в теплоту сгорания горючих газов — η_k — лежит на уровне 50–65 % для установок с кипящим слоем, 70–83 % — для поточных и слоевых, что связано с нерешенностью ряда теплофизических, технологических и экономических проблем.

Вопросы повышения эффективности технологий ТХК были всегда в центре внимания отечественных разработчиков [1]. Однако, в связи с отсутствием практической востребованности этих исследований, они носили скорее абстрактный, чем практический характер и в аналитическом плане ограничивались обычно рассмотрением процессов с чистым углеродом [2]. В настоящее же время в связи с переходом энергетики на мало- и неуглеродные технологии появляется необходимость учета по возможности всего технического состава натурального топлива.

Тепловой баланс газификации. Для анализа процессов газификации натуральных топлив рассмотрим влияние органической горючей массы топлива на тепловой баланс термохимической конверсии (ТХК), выбрав в качестве переменных относительные молярные доли кислорода O^f/C^f и водорода H^f/C^f .

В отличие от режимов прямого сжигания, где доминирующим является экзотермический эффект от окисления значительной части горючей массы углерода и водорода (за исключением части летучих, вошедших в углекислоту и пирогенетическую воду),

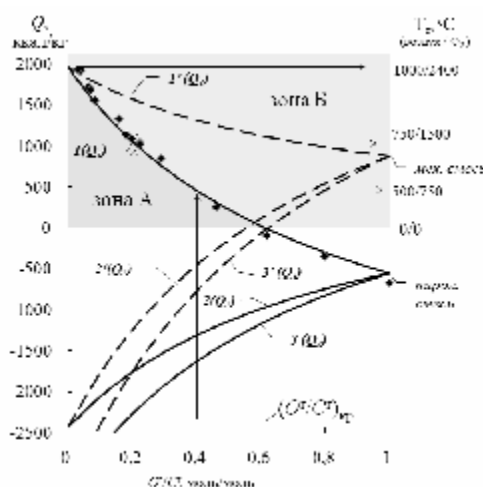


Рис. 1. Тепловой баланс газификации натуральных топлив; точки — расчет для натуральных топлив; T_g — теоретическая температура горения в воздухе и кислороде, Q_1 — тепловые эффекты реакций

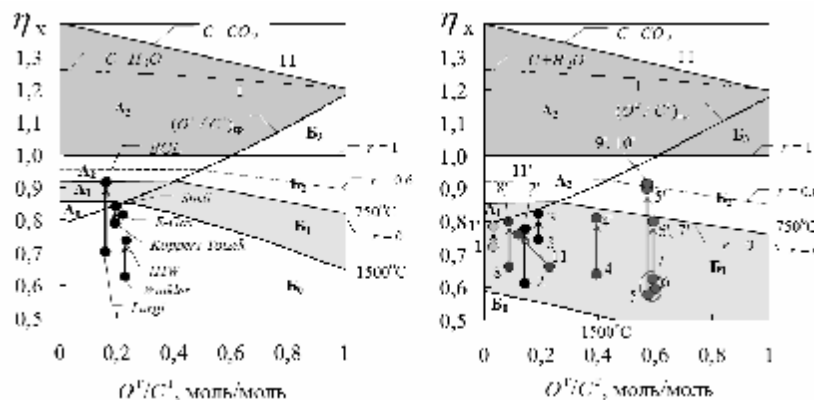


Рис. 2. Химический КПД ТХК горючей массы натуральных топлив:

а) кислородное дутье, б) воздушное дутье: 1 – газификация мазута без регенерации в поточном газификаторе ВНИИ НП [5], 1' – то же, расчет с регенерацией, 2 – газогенератор плотного слоя первого поколения на каменном угле [4], 2' – горновой газификатор ОАО «ВТИ» на каменном угле [6], 3 – газогенератор Mitsubishi без регенерации (расчет), 3' – МНГ с регенерацией (действующий) [4], 4 – газогенератор плотного слоя первого поколения на торфе [7], 4' – аллотермический пиролизер торфа ОИВТАН [8]; 5, 6, 7, 8 – газогенератор плотного слоя первого поколения [7], 5' – газогенератор плотного слоя со сверхadiaбатическим разогревом ИПХФ РАН (расчет) [4], 6' – модернизированный газогенератор обращенного типа УГТУ-УПИ с регенерацией [7], 7' – плазменный газификатор ИЭЭ РАН [9], 8' – трехзонный газогенератор обращенного типа УГТУ-УПИ [7], 9' – газификатор мини-ТЭС Viking в Дании (расчет), 10' – газификатор мини-ТЭС УГТУ-УПИ (расчет), 11 – газификация бурого угля (расчет), 11' – совместная газификация бурого угля с природным газом ВНИИ НП [14]

газификацию обычно проводят при соблюдении определенного баланса экзотермических и эндотермических реакций. На рис. 1 представлены тепловые эффекты, подсчитанные в представлении горючей массы топлива в виде смеси продуктов пиролиза с коксовым остатком (кривые 1, 2, 3) и в виде механической смеси $\{C^r + H^r + O^r\}$ – кривые 1', 2', 3'. Тепловые эффекты брутто-реакций: Q_1 – экзотермический для неполного горения (воздушной или кислородной газификации), Q_2 – эндотермический для реакции паровой конверсии (реакции «водяного газа»), Q_3 – эндотермический для реакции CO_2 – газификации (реакции «регенеративного газа»).

Пересечение кривых 1 и 1' с осью абсцисс, происходящее при критическом составе горючей массы (O^r/C^r)_{кр}, подразделяет топлива на две группы: «А» – топлива, конвертируемые в термонейтральном процессе ($T_p'' = 0$) в идеальную смесь ($CO + H_2$), и топлива группы «Б», идеальная газификация которых требует подвода энергии извне. Варианты с «подсветкой» бедного топлива богатым относятся к первой группе. В зависимости от конечной температуры процесса (T_p'') ширина зон «А» и «Б» изменяется.

Из сравнения хода кривых (1) и (1') видно, что расчет тепловой энергии по модели механической смеси может проводиться с погрешностью менее 15% только для топлив с минимальным выходом летучих (антрацит и тощие угли) и высокоуглеродистых искусственных материалов (технический углерод, древесный, электродный или щеточный уголь).

Выдерживая соответствующий баланс реакций горения и газификации, можно получать различные конечные температуры T_p'' и тепловые режимы, обеспечивающие различные по глубине уровни ТХК.

Тепловые режимы ТХК. Для выделения границ тепловых режимов воспользуемся результатами расчета зависимости эффективности ТХК от состава горючей массы [3], построенными в области $\eta_x > 1$ (рис. 2).

Ниже уровня $\eta_x = 1$ формируется автотермический тепловой режим, который, в свою очередь, делится на три области. Область рабочих температурных режимов в прямом (нерегенеративном) процессе выделена в них как A_1 и B_1 . Границы области определяются термодинамическими условиями проте-

кания реакций и технологическими ограничениями режимов с жидким шлакоудалением.

Как видно из сравнения с фактическими данными [4], наиболее близкую к расчетной идеальной эффективность имеют мощные современные агрегаты с ЖШУ: кислородные (BGL, Shell, E-Gas), воздушные с развитой регенерацией теплоты продуктов конверсии (т. 3' на рис. 2), работающие на каменных и бурых углях ($O^r/C^r < 0.25$). К этому же уровню приближается и технология НТВ на буром угле, претерпевающая в настоящее время серьезную модернизацию с переходом от твердого к жидкому шлакоудалению при сохранении интенсивной рециркуляции. Аналогичный уровень достигается и российскими разработчиками технологий воздушной газификации ископаемых топлив (тт. 1', 2', 11') [4–6].

Ниже зон A_1 и B_1 расположена область (A_0, B_0), не используемая в практической деятельности ввиду высокого уровня конечных температур процесса T_p'' и низкой его эффективности η_x . Выше зон A_1 и B_1 скорость реакции ничтожна и простой процесс не реализуется. Туда можно подняться лишь за счет подвода дополнительной энергии. Для попадания в зоны A_2 и B_2 теоретически достаточно осуществить «ближнюю» регенерацию физической теплоты выходящих из реакционной зоны или реактора газообразных и твердых коксозольных (КЗО) продуктов конверсии по одной из известных схем [7], что в $[1 - (1 - \eta_x) \cdot r]^{-1}$ раз увеличивает эффективность использования топлива (рис. 3). Здесь r – доля «ближней» регенерации.

При этом благодаря замещению экзотермических эффектов на вводимую тепловую энергию и соответствующему уменьшению кислородно-воздушного дутья, синтез-газ обогащается водородом, а в зоне B_2 – уменьшается и концентрация продуктов полного окисления (CO_2 и H_2O).

На практике эффект от «ближней» регенерации наиболее ощутим при воздушной ТХК низкосортных топлив, где ее активно применяют для улучшения состава газа и «подтягивания» фактической ТХК по эффективности к идеальной (точки 1', 3', 5', 6' на рис. 2б). Большой эффект для приближения к зонам A_3 и B_3 можно получить в энергоустановке с интегрированной внутрицикловой газификацией путем сов-

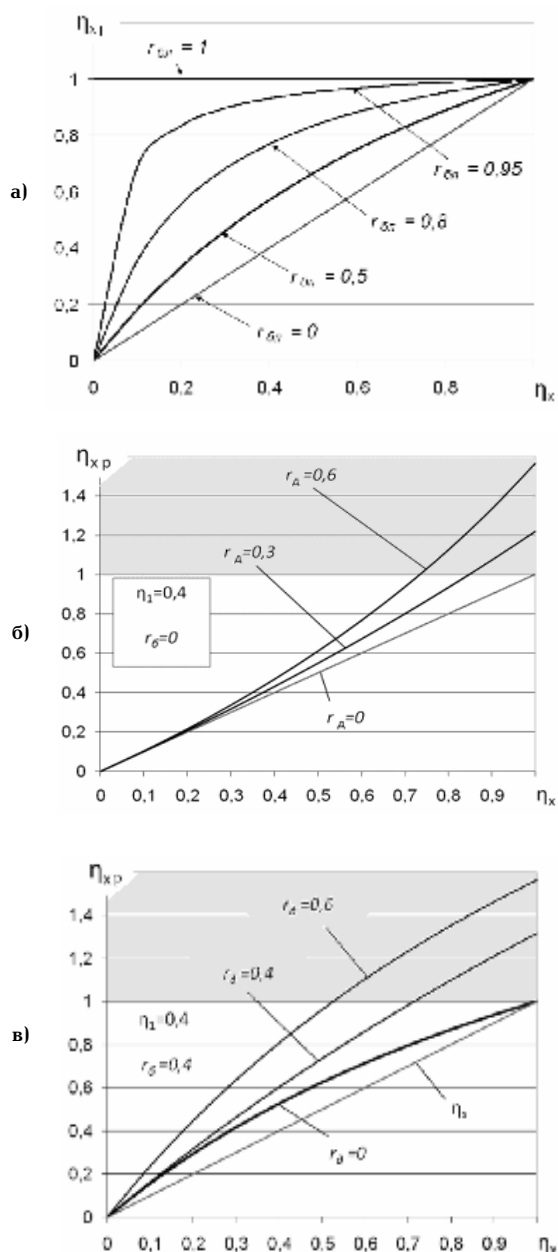


Рис. 3. Количественный потенциал увеличения эффективности ТХК при регенерации:
(а) «ближняя», (б) «дальняя» и (в) «совместная»

мещения «ближней» и «дальней» регенерации тепловой энергии отходящих газов за тепловым двигателем (точки 9', 10' на рис 2б).

Для попадания в зоны A_3 и B_3 и преодоления барьера $\eta_x = 1$ потенциала располагаемого энергоустановкой тепла недостаточно, и для некаталитических процессов приближение к верхнему пределу по η_x (кривые I и II на рис. 2 для ТХК с получением водяного и регенеративного газа) за счет регенерации маловероятно. В качестве внешнего источника теплоты здесь предлагают использовать источники высоких энергий (СВЧ, низкотемпературная плазма), высокотемпературные газоохлаждаемые ядерные реакторы. Однако на практике эффективность ТХК за счет внешних источников повышают относительно немного (тт. 4', 7') [8, 9].

Влияние начальной температуры горючей смеси на эффективность ТХК. В инженерной практике для нужд ТХК разработаны три уровня подогрева

горючей смеси перед сжиганием или газификацией:

- низкотемпературный ($T_0 \leq 500^\circ\text{C}$), поддерживающий процессы низкотемпературного пиролиза (полукоксования) или воспламенения топливной смеси;
- среднетемпературный ($T_0 \approx 600 - 1000^\circ\text{C}$), поддерживающий среднетемпературный пиролиз и горение нестехиометрических смесей;
- высокотемпературный ($T_0 > 1000^\circ\text{C}$), поддерживающий реакции газификации.

Первые два температурных уровня могут быть обеспечены, помимо сжигания части топлива за счет регенерации физической теплоты отходящих продуктов (синтез-газ, КЗО, дымовые газы). Для третьего уровня, создаваемого локально («по месту») используют принцип «внутреннего» сжигания [3] или источники высоких энергий (СВЧ, низкотемпературная плазма).

Проведение низкотемпературного пиролиза в безокислительной, либо слабоокислительной среде повышает эффективность ТХК низкосортных топлив на $\sim 5 - 10\%$, поднимая ее до уровня кондиционных топлив.

Процесс конверсии второго уровня иногда выступает как самостоятельный не смотря на значительный выход коксозольного остатка (более 50%) и высокую концентрацию в первичном газе углеводородных соединений. Примером служит технология ПГУ с карбонизатором, российский вариант которой представлен в [10].

При высокотемпературном нагреве горючей смеси помимо проблем изотермического и струйно-факельного сжигания [11, 12], возникают и специфические, связанные с эндотермической компонентой процесса газификации и приводящие к проблеме выбора траектории перехода на новый уровень из «первоначального» состояния, задаваемого начальной температурой ($T_0 = 0$), долей топлива ($b_2 = 0.48$), пошедшего на предреакционный разогрев топливной смеси в реакторе до температуры $T_p' = 1120^\circ\text{C}$ (т.1', рис. 4), и температурой на выходе из реактора $T_p'' = 900^\circ\text{C}$ (т.1). Эффективность ТХК такого процесса $\eta_x = 0.58$.

В качестве предельных здесь выступают два маршрута.

По первому маршруту повышение начальной температуры смеси от $T_0 = 0^\circ\text{C}$ до $T_0' = 900^\circ\text{C}$ протекает без уменьшения доли сжигаемого топлива ($b_2 = \text{const}$) и без изменения расчетного химического КПД конверсии $\eta_x = 0.58$, но с заметным увеличением предреакционного разогрева до $T_p' \approx 1550^\circ\text{C}$ (т.2' вместо т.1') и конечной температуры процесса до $T_p'' = 1300^\circ\text{C}$ (т.2 вместо т.1), что положительно скажется на кинетике и полноте протекания реакций газификации, чувствительных к температурному фактору, и приблизит фактический КПД к расчетному. Такой процесс эффективен для интенсификации газификации низкосортных топлив в зоне Б.

Так, при воздушной газификации древесины с влажностью 30% подогрев реакционной смеси перед сжиганием и газификацией до 800°C (при доле регенерации теплоты генераторного газа порядка 65 – 70%) позволил при $T_p'' = 750 - 850^\circ\text{C}$ поднять T_p' до 1500°C и η_x до 80% (тт. 6-6' на рис. 2б) [3]. Известны и другие, столь же успешные примеры реализации этого маршрута (тт. 1', 3'-5' рис. 2б).

По второму маршруту повышение температуры смеси T_0 до T_0' при неизменном уровне конечной температуры $T_p'' = \text{const}$ сопровождается двухкратным уменьшением доли топлива, идущего на разогрев до 0.23 (т.3 вместо т.1), соответствующим увеличением расчетного химического КПД η_x до 0.93 (т.3''

ПОПОВ Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры «Энергосбережение».

БОГАТОВА Татьяна Феокистовна, кандидат технических наук, доцент (Россия), заместитель заведующего кафедрой «Тепловые электрические станции».

СИЛИН Вадим Евгеньевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Энергосбережение».

ОСИПОВ Павел Валентинович, ассистент кафедры «Тепловые электрические станции».

Адрес для переписки: e-mail: vsilin@mail.ustu.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2010 г.

© А. Ф. Рыжков, А. В. Попов, Т. Ф. Богатова, В. Е. Силин, П. В. Осипов

УДК 504.05:628.5

Н. В. САКОВА

Рыбинская государственная
авиационная технологическая
академия им. П. А. Соловьева

АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ГАЗОТУРБИННОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Рассмотрены вопросы воздействия на окружающую среду современной газотурбинной теплоэлектростанции. Дана оценка допустимости воздействия теплоэлектростанции на окружающую среду.

Ключевые слова: выбросы в атмосферу, сбросы в водные объекты, отходы, шумовое воздействие.

Производство тепловой и электроэнергии в настоящее время сопровождается достаточно высоким уровнем негативного воздействия на окружающую среду. К основным видам воздействий относят выбросы загрязняющих веществ, сбросы в водоемы, размещение отходов, негативное воздействие шума, вибрации, тепла, электромагнитных полей. Теплоэнергетика в настоящее время занимает «лидирующие» позиции среди других отраслей промышленности по масштабам загрязнения атмосферы: 27,7 % всех выбросов загрязняющих веществ приходится на данную отрасль. Около 77 % от общего объема применяемой в производстве воды приходится на предприятия теплоэлектроэнергетики. Следовательно, снижение негативного влияния отрасли на окружающую среду — это одна из приоритетных задач для дальнейшего развития теплоэлектроэнергетики.

В данной работе дается оценка влияния на окружающую среду одного из объектов теплоэлектроэнергетики — газотурбинной теплоэлектростанции ГТЭС-12 МВт. С 2002 года в г. Рыбинске функционирует лидерная ГТЭС-12, состоящая из 2-х блоков ГТА-6РМ суммарной электрической мощностью 12 МВт и тепловой — 40 тонн пара в час. Эффективность ГТЭС обусловлена высоким КПД (81,5%) при работе в когенерационном цикле с выработкой тепла и электроэнергии.

ГТЭС располагается в промышленной зоне в центральной части города в окружении жилых микрорайонов и больничных учреждений. Расстояния от границ площадок предприятия до жилых зданий колеблются в пределах 35 — 400 м, от источников выбросов до жилых зданий 40 — 450 м.

При использовании для производства энергии газотурбинных агрегатов встает задача оценки допустимости воздействия шума. Источниками шума на рассматриваемом объекте являются:

- основное технологическое оборудование;
 - дымовые трубы;
 - вентиляторы и вентиляционные трубы;
 - газовые компрессоры, ресиверы и их обвязка;
- Распространение шума происходит:
- от оборудования — через оконные проемы здания;
 - от решетки приточной вентиляционной системы;
 - от воздухозаборных устройств ГТД;
 - от труб вытяжных вентиляционных систем;
 - от участков дымовых труб, расположенных выше конька кровли.

Применяемое в данном проекте оборудование имеет высокие значения уровня звуковой мощности во всех октавных полосах частот. С целью исключения влияния объекта на уровень шума в жилой зоне в проекте предусмотрено:

- расположение оборудования внутри здания с высокой шумогасящей способностью ограждений (двойное остекление);
- установка шумоглушителей в воздухозаборе ГТД и на входе в утилизационный котел;
- установка шумоглушителей в вентиляционных системах В-1, В-2, В-3, П-1, П-2.

Из сопоставления данных (табл. 1) следует, что уровень шума газотурбинной теплоэлектростанции ГТЭС-12 МВт не превышает предельно допустимых значений, установленных в жилой зоне для ночного и дневного времени [1].

Источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на ГТЭС-12 МВт и дожимной компрессорной станции (ДКС) являются:

- две дымовые трубы;
- трубы систем вентиляции;
- свечи продувок трубопроводов природного газа;
- факел сжигания сжигаемого природного газа.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ПОСЛЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

В работе представлено аналитическое решение задачи о неравномерном распределении температуры газов после регенеративного вращающегося воздухоподогревателя (РВП). Показано, что имеет место значительный градиент температуры в выходном сечении. Результаты работы позволяют сделать выводы о возможности использования теплоты части уходящих газов для промышленных и бытовых целей.

Ключевые слова: паровой котел, температура газов, регенеративный вращающийся воздухоподогреватель, тепловой поток, металлическая набивка.

В паровых котлах с регенеративными вращающимися воздухоподогревателями (РВП) отбор газов на рециркуляцию выполняют за водяным экономайзером. Температура газов на входе в РВП достигает 350...400°C. На выходе из РВП температура газов остается достаточно высокой, что позволяет использовать теплоту этих газов как для котельной установки, например, для рециркуляции части уходящих газов в топку котла, так и для возможного внешнего потребителя теплоты. Конструкция РВП представлена на рис.1.

Вследствие нестационарности процесса теплообмена в РВП характер изменения температур газов, воздуха и набивки в виде металлических листов различного профиля различен в периоды нагрева и охлаждения.

Как следует из практического опыта [1], на выходе из газовой части РВП в сечении, перпендикулярном к ротору, имеет место заметная разность температур газов: температура газов по периметру выходного сечения потока возрастает в направлении вращения ротора из-за уменьшения теплового потока, передаваемого от газов к набивке. Это позволяет выделить условно «высокотемпературную» часть уходящих газов, а «низкотемпературный» поток газов направить в дымовую трубу.

Распределение температур газов на выходе из РВП описывается решением системы дифференциальных уравнений теплопроводности в горячей и холодной половинах РВП с соответствующими условиями однозначности. Аналитическое решение такой задачи было предложено в [2], но с большим количеством допущений, не всегда, с нашей точки зрения, оправданных. Точное решение такой системы уравнений может быть получено только численными методами. В нашей работе распределение температур оценивалось на основе интегральных балансов тепловых

потоков, записанных для одного канала, образованного листами набивки:

$$\begin{cases} \alpha F \int_0^{\tau} \Delta T(\tau) d\tau = M_n c_n [T_n(\tau) - T_{no}] \\ \alpha F \int_0^{\tau} \Delta T(\tau) d\tau = \dot{M}_z c_{pz} T_o \tau - \dot{M}_z c_{pz} \int_0^{\tau} T_{cl}(\tau) d\tau. \end{cases}$$

Решение полученной системы в предположении, что распределение температуры газа по высоте набивки линейно, имеет вид:

$$T_{cl} = (T_{ol} - T_o) e^{-\gamma \tau} + T_o,$$

$$\text{где } \gamma = \frac{2\alpha F \dot{M}_z c_{pz}}{M_n c_n (\alpha F + 2\dot{M}_z c_{pz})}.$$

В этих формулах α — коэффициент теплоотдачи; F — площадь поверхности набивки по высоте канала; τ — время нахождения набивки в газовой части РВП; $\Delta T(\tau)$ — разность средних по высоте температур газов и набивки в момент времени τ ; M_n — масса набивки в одном канале; c_n — теплоёмкость набивки; $T_n(\tau)$ — средняя по высоте температура набивки в момент времени τ ; T_{no} — средняя по высоте температура набивки в начальный момент времени; \dot{M}_z — массовый расход газов через РВП; c_{pz} — теплоёмкость уходящих газов; T_{ol} — температура газов на выходе из РВП.

Также были приняты следующие граничные условия: T_{ol} — температура газов на входе в РВП, T_o — температура газов на выходе из РВП в момент $\tau = 0$. Расчет коэффициента теплоотдачи от газов при движении в канале набивки в турбулентном режиме выполнялся по критериальной зависимости

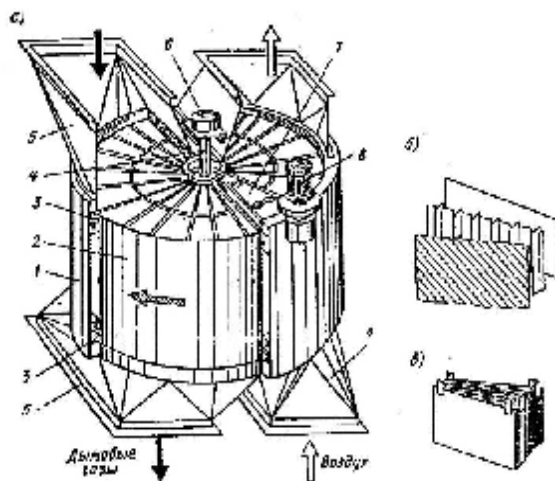


Рис. 1. Конструкция РВП

а) схема движения теплоносителей в РВП; б) листы металлической набивки, в) сегмент набивки с листами: 1–корпус РВП, 2–ротор, 3–периферийные уплотнения, 4–вал, 5–газовые корпуса, 6–подшипники, 7–радиальные уплотнения, 8–электродвигатель с шестерней, 9–воздушные корпуса

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43},$$

где $Re = \frac{w \cdot d_{экв}}{\nu}$ – число Рейнольдса; $Pr = 0,67$ – число Прандтля; $d_{экв} = \frac{4F}{\Pi}$ – эквивалентный диаметр, рас-

считанный по геометрии элемента набивки. Профиль элемента набивки представлен на рис.2.

Теплопроводность и вязкость газов определялись по их средней температуре.

Частота вращения ротора принималась по эксплуатационным данным равной 2 об/мин.

Полученное решение приведено для воздухоподогревателя РВП-68, имеющего следующие технические характеристики:

высота горячего /холодного слоя – 1,18/0,62 м;
толщина листа набивки горячего/холодного слоя – 0,63/1,2 мм;
радиус ротора – 3,15 м;
площадь сечения для прохода газа в РВП – 13,75 м².

Распределение температуры газов на выходе из РВП при работе котла ТГМП-114 на газе и мазуте представлено на рис.3.

Рассмотренное решение может быть применено и для других типоразмеров РВП. Таким образом, экономическую эффективность котельного агрегата можно повысить, если дымовые газы отбирать из зоны с повышенной температурой, исключив возможность их перемешивания с низкотемпературной частью. Конструктивно в патрубке на выходе дымовых газов из РВП устанавливается разделяющая перегородка из листовой стали толщиной 4...5 мм, которая располагается по всей ширине потока дымовых газов и отделяет высокотемпературную зону потока дымовых газов. Из отгороженной перегородкой зоны, где дымовые газы имеют наибольшую температуру, и осуществляется их отбор для дальнейшего использования этой теплоты.

После использования теплоты газы смешиваются с потоком низкотемпературной части уходящих газов и направляются в дымовую трубу. В этом случае средняя температура газов перед дымососом сни-

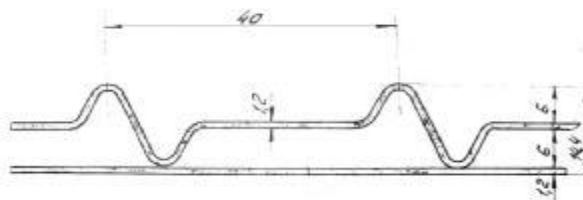


Рис. 2. Профиль набивки холодного слоя

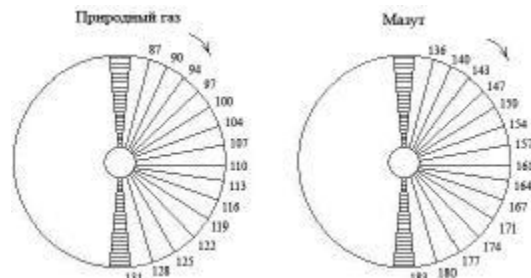


Рис. 3. Распределение температур уходящих газов в выходном сечении РВП

жается. Однако необходимо учитывать и тот факт, что температура уходящих газов на входе в дымовую трубу не должна быть ниже 80...85 °С во избежание образования конденсата на внутренней поверхности футеровки.

Практическое значение полученных результатов заключается в предлагаемых вариантах использования описанного нами метода:

1. Использование высокопотенциальных уходящих газов за РВП в качестве доли газов рециркуляции. Однако здесь необходимо учесть недоотпуск теплоты в топку котла по сравнению с полным отбором газов рециркуляции после водяного экономайзера, либо между пакетами пароперегревателя.

2. Подогрев холодного воздуха перед РВП условно высокотемпературной частью уходящих газов в отдельном теплообменнике. Тем самым можно существенно уменьшить использование прямой сетевой воды в калориферах для подогрева холодного воздуха перед РВП. За счет этого решения можно передать дополнительную тепловую нагрузку.

3. Подогрев высокотемпературной частью уходящих дымовых газов добавочной (сырой) воды перед химводоподготовкой для восполнения потери и утечки теплоносителя как в цикле станции, так и в теплосети.

4. Использование теплоты высокопотенциальных уходящих газов для подогрева воды, служащей в качестве отопления хозяйств (теплоты), предъявляющих низкие требования к параметрам сетевой воды.

На наш взгляд, наиболее востребованным и рациональным вариантом использования теплоты высокопотенциальных дымовых газов может быть подогрев добавочной воды для восполнения потерь в цикле тепловой электрической станции. Нами был просчитан такой вариант на примере одной из ТЭС Свердловской области. В настоящее время для подогрева сырой воды в количестве 90 т/ч, а это примерно 80% нужд всей станции мощностью 1200 МВт отбирается пар из турбины с параметрами $P = 3$ бар, $t = 133^\circ\text{C}$. По нашим расчетам подогрев такого расхода воды с 4 до 30°C в зимнее время обеспечат четыре теплообменника, греющей средой которых будут высокопотенциальные уходящие газы рис.4. Температура

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ В ХАНТЫ-МАНСИЙСКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ — ЮГРЕ

Рассматриваются преимущества применения когенерационных технологий в децентрализованном энергоснабжении отдельных районов Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, с учётом особенностей региона.

Ключевые слова: когенерация, децентрализованное энергоснабжение.

Ханты-Мансийский автономный округ — Югра занимает площадь 534,8 тыс. кв. км. С юга на север он простирается на 900 км, с запада на восток — на 1400 км. Здесь проживает около 1,5 млн человек. В состав автономного округа входят 13 городских округов, 9 муниципальных районов, 26 городских поселений, более пятидесяти отдалённых друг от друга сельских поселений [1].

Автономный округ занимает первое место в России по добыче сырой нефти (55 % общероссийского объёма) и выработке электроэнергии (рис. 1, 2) (почти 7 %), по общему производству промышленной продукции (более 8 %), второе место по объёму инвестиций в основной капитал (около 8 %), второе-третье по добыче природного газа (4 %) [2, 3].

Основу электроэнергетического комплекса Ханты-Мансийского автономного округа — Югры составляют три мощные тепловые электростанции, работающие на газе: Сургутские ГРЭС-1, ГРЭС-2 и Нижневартовская ГРЭС суммарной установленной мощностью 9680 МВт, а также электрические сети напряжением 500 кВ, 220 кВ и 110 кВ общей протяжённостью 21532 км [2, 4].

Отметим, что установленная мощность Саяно-Шушенской ГЭС до аварии 2009 года — 6400 МВт.

Децентрализованно снабжается электрической энергией значительная по площади территория Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, при которой все населённые пункты Берёзовского района и большая часть поселений Октябрьского, Белоярского, Кондинского и Ханты-Мансийского районов. Всего более 50 крупных поселений получают электропитание от автономных источников электроэнергии.

Только в Берёзовском районе из 27 населённых пунктов 16 снабжаются электроэнергией от малых поршневых и турбинных электростанций, обслуживаемых ООО «Югорская генерирующая компания» (ООО «ЮГК», дочернее предприятие ОАО «ЮТЭК»). Электроснабжение трех пунктов Берёзовского района осуществляется от автономных энергоисточников, принадлежащих ООО «Газпром-трансгаз Югорск». Оставшаяся часть населённых пунктов

района снабжается электроэнергией либо от соседних поселений по высоковольтным линиям электропередач на 6 кВ — Берёзово — Деминская, Берёзово — Шайтанка и по высоковольтным линиям электропередач на 10 кВ — Игрим — Ванзетур, также посредством частных генерирующих энергоустановок, имеющих мощности до 15 кВт.

В ряде случаев стоимость тепла и электроэнергии для потребителей от собственных энергоисточников ниже, чем при покупке у традиционных поставщиков. Так ОАО «Сургутнефтегаз» в настоящее время имеет уже более десяти автономных электростанций для обеспечения электроэнергией своих внутренних потребностей [2].

На территории автономного округа применение децентрализованного энергоснабжения указанных районов обусловлено также сложностью, а зачастую и невозможностью строительства и дальнейшей эксплуатации линий электропередач, вызванной «слабыми грунтами», имеющими глиняные, торфяные и болотистые консистенции порядка 90 процентов.

Децентрализованная схема электроснабжения северо-запада автономного округа обусловлена и отсутствием значительных запасов нефти, как следствие энергоемких месторождений и промышленных предприятий, сосредоточенных в основном на востоке Ханты-Мансийского автономного округа — Югры.

Рост цен на органическое топливо, повышение экологических требований, необходимость и потенциал развития децентрализованного энергоснабжения в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре стимулируют развитие энергосберегающих технологий, в том числе когенерационных [5].

Когенерационная установка — автономная энергетическая установка, представляющая собой систему агрегатов по комплексному производству тепла и электроэнергии. Особенностью таких установок является использование тепловой энергии, отбираемой из системы выхлопа или системы охлаждения установки, для нужд теплоснабжения. Таким образом, значительно повышается коэффициент полезного действия использования энергии топлива. Эффективность использования энергетических ресурсов

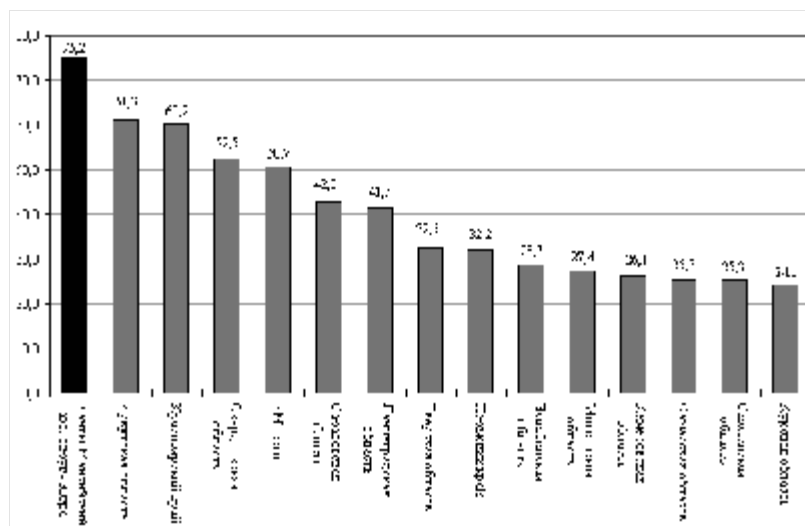


Рис. 1. Производство электроэнергии по регионам России в 2008 году, млрд кВт·час

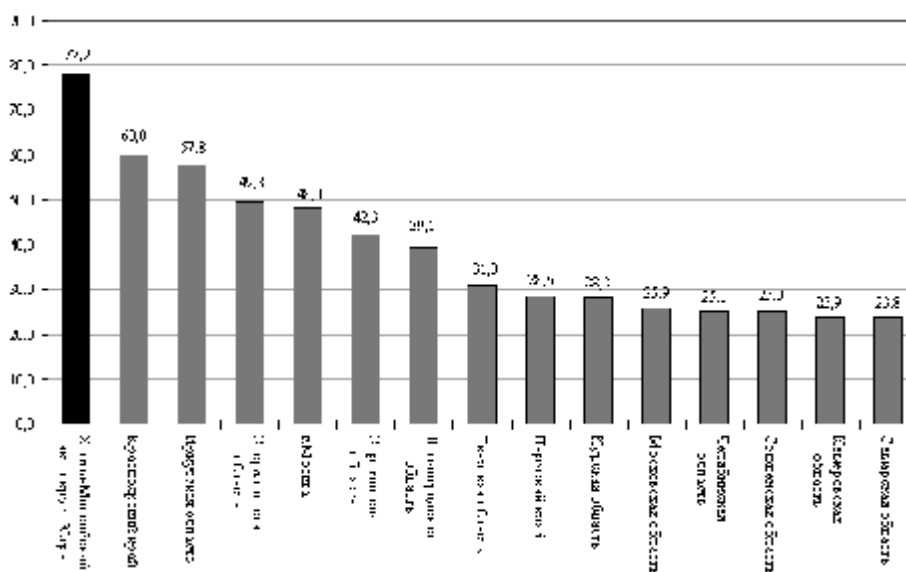


Рис. 2. Производство электроэнергии по регионам России в 2009 году, млрд кВт·час

в таких установках выше более чем на 20 процентов, чем в установках, вырабатывающих только электроэнергию или только тепло [6].

Применение когенерации в децентрализованном энергоснабжении Ханты-Мансийского автономного округа – Югры обусловлено рядом факторов, среди которых основными являются следующие:

- коэффициент полезного действия когенерационных установок выше коэффициента полезного действия установок с раздельным производством тепла и электрической энергии;

- недорогой ввод энергетических мощностей там, где они необходимы в данный момент;

- возможность ввода автономных газовых и дизельных энергетических установок в короткие сроки;

- соизмеримость стоимости производимой электроэнергии и тепла на дизельных энергетических установках и тарифов традиционных поставщиков, а в ряде случаев, особенно при использовании местных сортов топлива, производство энергии с меньшими затратами;

- использование сбросного тепла уменьшает экологическую нагрузку любого энергетического оборудования в среднем в два раза;

- возможность продажи квот выбросов парниковых газов;

- потребитель приобретает энергетическую независимость от сбоев в электроснабжении и аварий в системах теплоснабжения [7, 8].

Одновременно появляется возможность решения актуальной для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры проблемы – утилизация попутного газа, что делает когенерационные технологии в данном регионе предпочтительными.

Библиографический список

1. Официальный веб-сайт органов государственной власти Ханты-Мансийского автономного округа – Югры [Электронный ресурс]. – URL: http://www.admhmao.ru/obsved/frame_5.htm (дата обращения: 15.02.2010).
2. Стратегия социально-экономического развития Ханты-Мансийского автономного округа – Югры до 2020 года: при-

ложение к распоряжению Правительства автономного округа от 14 ноября 2008 г. № 491-рп. — Ханты-Мансийск, 2008. — 108 с.

3. Официальный веб-сайт органов государственной власти Ханты-Мансийского автономного округа — Югры [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.admhmao.ru/statist/frame.htm> (дата обращения 14.02.2010).

4. Концепция социально-экономического развития Ханты-Мансийского автономного округа — Югры // Официальный веб-сайт органов государственной власти Ханты-Мансийского автономного округа — Югры [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.admhmao.ru/economic/strateg/frame.htm> (дата обращения 16.03.2010).

5. Буданов, В.А. Оптимизационные исследования и выбор рациональных схем когенерационных энергокомплексов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Буданов. — М., 2009. — 26 с.

6. Ковалёв, В.З. Тепловая модель когенерационной установки [Текст] / В.З. Ковалёв, П.Н. Ремизов, А.А. Архипов // Современные проблемы информатизации в экономике и обеспечении безопасности: сборник трудов по итогам XV Международной открытой научной конференции. — Воронеж, 2010. — Вып. 15. — С. 89 — 91.

7. Официальный веб-сайт органов государственной власти Ханты-Мансийского автономного округа — Югры [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.admhmao.ru/socium/gkh/energ.htm> (дата обращения: 13.02.2010).

8. Харитонов, Д.А. Разработка методики выбора и рационального использования когенерационных систем в качестве источника электроэнергии на предприятии по технико-экономическим критериям [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д. А. Харитонов. — М., 2007. — 160 с.

9. Ковалёв, В.З. Моделирование электротехнических комплексов и систем как совокупности или взаимодействующих подсистем различной физической природы: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. / В. З. Ковалёв. — Омск, 2000. — 312 с.

АРХИПОВ Александр Владимирович, аспирант кафедры компьютерного моделирования и информационных технологий.

ЗЯБКИН Александр Александрович, аспирант кафедры компьютерного моделирования и информационных технологий.

РЕМИЗОВ Павел Николаевич, инженер отдела технической диагностики и мониторинга Югорского института развития строительного комплекса.

Адрес для переписки: e-mail: Remizov@list.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

© А. В. Архипов, А. А. Зябкин, П. Н. Ремизов

УДК 338.45

М. Ф. БОГДАНОВА

Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

ЗНАЧЕНИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

В статье рассмотрены основные проблемы отраслей топливно-энергетического комплекса и обоснована необходимость создания контрольно-измерительных приборов с целью обеспечения энергетической безопасности страны.

Ключевые слова: контрольно-измерительные приборы, топливно-энергетический комплекс, энергетическая стратегия, износ, энергетика.

Создание и развитие предприятий, занимающихся разработкой контрольно-измерительных приборов (КИП), играет важную роль в развитии экономики страны, а также в её научно-техническом прогрессе.

КИП — это средства измерения, предназначенные для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Средства измерения получили широкое применение во всех отраслях промышленности. КИП используются для:

- различных измерений электрических и неэлектрических величин;
- контроля над работой оборудования на предприятиях, в т.ч. над работой оборудования на опасных производственных объектах (работа во взрывоопасных условиях, при высоких температурах, при высоком давлении);
- контроля и управления производственными процессами;
- обеспечения безаварийной работы предприятий;
- обеспечения экологической безопасности;
- повышения эффективности деятельности предприятий.

Одной из основных характеристик средств измерения и контроля является надежность. Использование для технологических измерений все более сложных измерительных приборов, преобразователей и систем определяет необходимость количественной оценки надежности их функционирования. «В общем случае надежность — свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки на отказ в часах» [1]. Относительно средств измерения такими показателями являются нормируемые метрологические характеристики. Основными параметрами КИП являются [2]:

- диапазон измерений — область значений измеряемой величины, на который рассчитан прибор при его нормальном функционировании (с заданной точностью измерения);
- порог чувствительности — некоторое минимальное или пороговое значение измеряемой величины, которое прибор может различить;
- чувствительность — связывает значение измеряемого параметра с соответствующим ему изменением показаний прибора;

— несовершенство (нарушение) технологии и конструктивное несовершенство технических устройств;

— нарушения трудовой и производственной дисциплины;

— нарушения требований промышленной безопасности эксплуатирующими организациями;

— моральное устаревание применяемых технологий.

Статистический анализ аварий и причин их возникновения на опасных производственных объектах подтверждает необходимость создания надежных механизмов, позволяющих проводить комплексную оценку технического состояния предприятий ТЭК. Большинство аварий можно предотвратить, осуществляя мониторинг реального состояния опасных производственных объектов, проводя своевременные мероприятия по их техническому обслуживанию, ремонту и реконструкции.

Учитывая большую изношенность оборудования, особую актуальность имеет оценка его технического состояния с использованием современных контрольно-измерительных приборов, которые с высокой степенью достоверности позволяют определить его техническое состояние и остаточный ресурс работоспособности.

Подводя итоги проведенного исследования, можно сделать вывод, что разработка и изготовление КИП позволяют повысить безопасность работы предприятий ТЭК, что, в свою очередь, оказывает влияние на энергетическую безопасность страны.

Информация

Конкурс на участие в Международной летней школе

Университет Осло (Норвегия) ежегодно, с конца июня по начало августа, проводит Международную летнюю школу в кампусе Блиндерн, севернее Осло. С 1947 года около 25,5 тысячи участников из 164 стран изучали курсы по гуманитарным и социальным наукам, здравоохранению и энергетическому планированию и охране окружающей среды.

Обучение бесплатное. Участники платят за комнату, питание и регистрационный взнос. Занятия проводят преподаватели университета и другие квалифицированные специалисты.

Студенты размещаются в общежитии, расположенном в парке, примыкающем к университету.

В 2011 году с 25 июня по 05 августа пройдут следующие курсы:

ISSN 1320 Норвежская литература

ISSHF 1142 Норвежская архитектура и дизайн

ISSSV 1850 Скандинавское правление и политика

ISSSV 1753 Современное норвежское общество

ISSSV 1855 Международная политика

ISSJF 4711 Права человека

ISSSV 4854 Мирные исследования

ISSSV 4756 Проблемы международного развития

ISSHF 4957 Средства массовой информации

ISSUM 4180 Энергетика, окружающая среда и устойчивое развитие

ISSMF 4205 Международное здравоохранение

ISSUV 4310 Специальное образование (образование инвалидов)

ISSHF 2060 и 4060 Равенство полов в нордических странах

ISSN 0500 Жизнь и общество в Норвегии,

а также семинар по профессиональному развитию.

Участники должны хорошо владеть английским языком и иметь хорошее здоровье. Ряд курсов требует некоторого профессионального опыта.

Базовая стоимость — 20800 норвежских крон (около 3780 долларов США) покрывает стоимость проживания, питания, регистрационный взнос и некоторые дополнительные расходы. Необязательная четырехдневная экскурсия в Берген — не включена в базовую стоимость. В курсах, где экскурсии являются частью учебного плана, стоимость выше на 90 — 875 долларов. Например, у ISSUM 4180 она выше на 840 долларов.

На школу традиционно выделяется некоторое количество стипендий различной величины.

Заявления о приеме и на стипендию должны быть отправлены **до 1 февраля 2011 г.** (по почтовому штемпелю), но лучше их подать как можно раньше.

Стипендиат обязан участвовать во всей программе курса, сдать выпускной экзамен или написать выпускную работу.

Источник: http://www.rsci.ru/grants/grant_news/268/227739.php (дата обращения 17.11.10)

Библиографический список

1. Никитин, В.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / В.А. Никитин, С. В. Бойко. — 2-е изд. перераб. и доп. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. — 462 с.

2. Атамаян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин — М.: Изд-во «ДРОФА», 2005. — 415 с.

3. Топливо-энергетический комплекс России. 2000 — 2008 гг. (справочно-аналитический обзор) / под общ. ред. проф., д.т.н. В. В. Бушуева, д.э.н. А.М. Мастепанова, к.г.н. А.И. Громова — М.: ИАЦ Энергия, 2009. — 408 с.

4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утвержденная Правительством Российской Федерации от 13 ноября 2009 г., № 1715-р. — М, 2009. — 144 с.

5. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года, утвержденная Правительством Российской Федерации от 28 августа 2003 г., № 1234-р. — М., 2003. — 144 с.

6. Экономическая безопасность России: Общий курс: учебник / под ред. В. К. Сенчагова. — 2-е изд. — М.: Дело, 2005. — 896 с.

7. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2007 году / Колл. авт.; под общ. ред. К.Б. Пуликовского. — М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008. — 548 с.

БОГДАНОВА Мария Фёдоровна, аспирантка кафедры стратегического менеджмента.

Адрес для переписки: e-mail: bogdanova.m.f@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

© М. Ф. Богданова