

Энергетика

УДК 519.816

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ И РАСХОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ

Н.В. Дилигенский¹, А.А. Гаврилова, А.Г. Салов, В.К. Гаврилов

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Исследуется системная эффективность функционирования генерирующего оборудования ТЭС. Выявлена закономерность роста относительной величины собственных нужд в условиях работы оборудования в нерасчётных режимах. Установлено, что эффективность функционирования энергетического предприятия в целом существенно зависит от соотношения производства тепла на технологические нужды и отопление. Обоснована целесообразность проведения мероприятий по повышению тепловой нагрузки генерирующих предприятий.

Ключевые слова: *эффективность, генерирующее предприятие, режимы, баланс, электроэнергия, тепловая энергия, комбинированная выработка, собственные нужды*

Произошедшее в период структурной перестройки экономики снижение объемов производства теплоэлектроцентралями (ТЭЦ) тепловой и электрической энергии, изменение нормативных и расчетных соотношений между выработкой тепловой и производимой на ее основе электрической энергии привело к вынужденной эксплуатации как основного, так и вспомогательного оборудования в нерасчетных режимах.

На рис. 1 приведена динамика отпуска тепловой, электрической энергии и суммарного ее производства энергосистемой Самарской области.

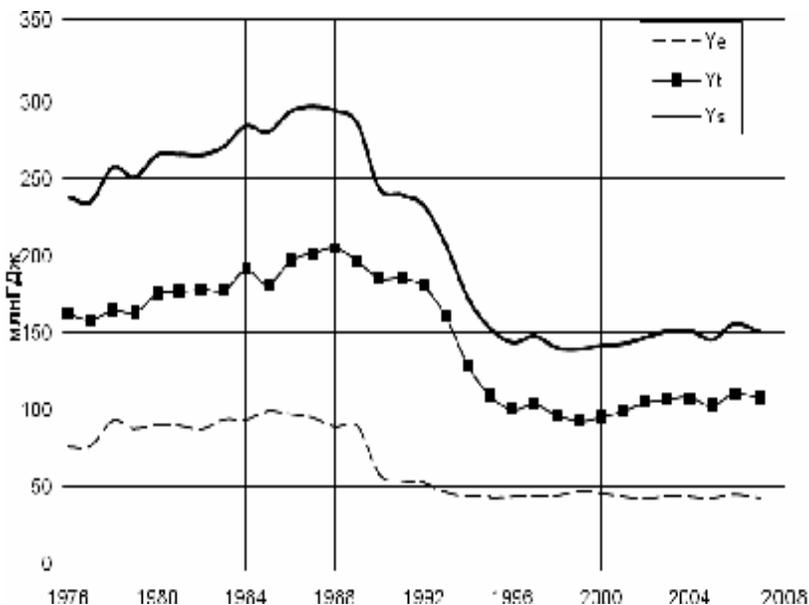
Анализ представленных характеристик показывает, что в 1988-1993 гг. произошло резкое сокращение генерации энергии: тепловой на 40,5% и электрической на 22,1%, что привело к общему снижению производства энергии на 36,5%.

Постоянная в течение года базовая тепловая нагрузка теплоэлектроцентралей в виде производственного пара, имевшая место в 1976-1988 гг., частично заместилась сезонной тепловой нагрузкой в виде горячей воды, идущей на отопление и горячее

¹ Дилигенский Николай Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой.
Салов Алексей Георгиевич, кандидат технических наук, доцент/
Гаврилова Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент.
Гаврилов Валерий Константинович, аспирант.
e-mail: usat@samgtu.ru и incenter@samgtu.ru

водоснабжение. В 1990 г. паровая нагрузка энергосистемы в 1,28 раза превышала тепловую нагрузку по горячей воде, а в 1994 г. она стала в 1,74 раза ниже расхода тепла на отопление.

После 1996 г. характер изменения выработки суммарной энергии практически соответствует изменениям производства тепловой энергии. В целом потребление тепловой энергии в последние годы медленно растет за счет жилищного строительства городов.



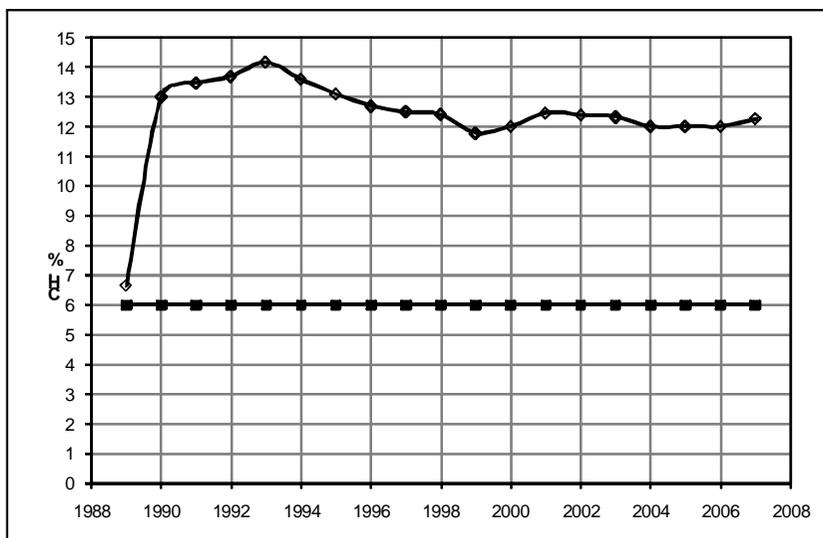
Р и с. 1. Энергосистема 1976-2007 гг.:
 Y_t – отпуск тепловой энергии, Y_e – отпуск электроэнергии,
 Y_s – суммарный отпуск энергии, млн ГДж

Такая ситуация создала неблагоприятные условия для совместной выработки тепловой и электрической энергии. Часть оборудования ТЭЦ энергосистемы выведена из эксплуатации, а оставшаяся используется в нерасчетных режимах. Ухудшились технико-экономические показатели функционирования ТЭЦ: повысились удельные расходы топлива, увеличилась себестоимость энергии. Эксплуатация оборудования в нерасчетных режимах привела в числе других негативных последствий к увеличению расходов электрической энергии на собственные нужды. К этим расходам относятся в основном затраты на привод вспомогательных механизмов, обеспечивающих работу основного оборудования станции (ТЭЦ).

На рис. 2 представлены статистические данные по собственным нуждам энергосистемы за период с 1988 по 2007 гг. Среднее значение величины собственных нужд ТЭЦ при работе её оборудования в расчетных режимах соответствует 6% [1]. Падение производства тепловой и электрической энергии при неизменном количестве эксплуатируемого вспомогательного оборудования привело к росту затрат на собственные нужды более чем в два раза. После 1995 г., когда общее производство энергии стабилизировалось на уровне 63-64% от уровня производства 1989 г., среднегодовой расход электроэнергии на собственные нужды установился в пределах 11,6-13%. После 1995 г. динамика колебания среднегодовых расходов на собственные

нужды соответствует характеру изменения общего производства энергии.

При пониженной нагрузке вспомогательное оборудование потребляет почти такое же количество энергии, что и при номинальной производительности из-за отсутствия эффективных систем регулирования производительности вспомогательного оборудования (различных насосов и тягодутьевых механизмов). Это обстоятельство обуславливает рост относительной величины собственных нужд.



Р и с. 2. Динамика изменения собственных нужд энергосистемы по годам

Ситуацию усугубляет и то обстоятельство, что из-за отсутствия должного финансирования в переходный период не проводилось текущих и капитальных ремонтов вспомогательного оборудования в необходимых объемах, поэтому реальные рабочие характеристики оборудования не соответствуют заводским, нормативным.

Для теплоэлектроцентралей, составляющих Самарскую энергетическую систему и работающих на газе, расход электрической энергии на собственные нужды по группам вспомогательного оборудования в процентах распределяется следующим образом [2]:

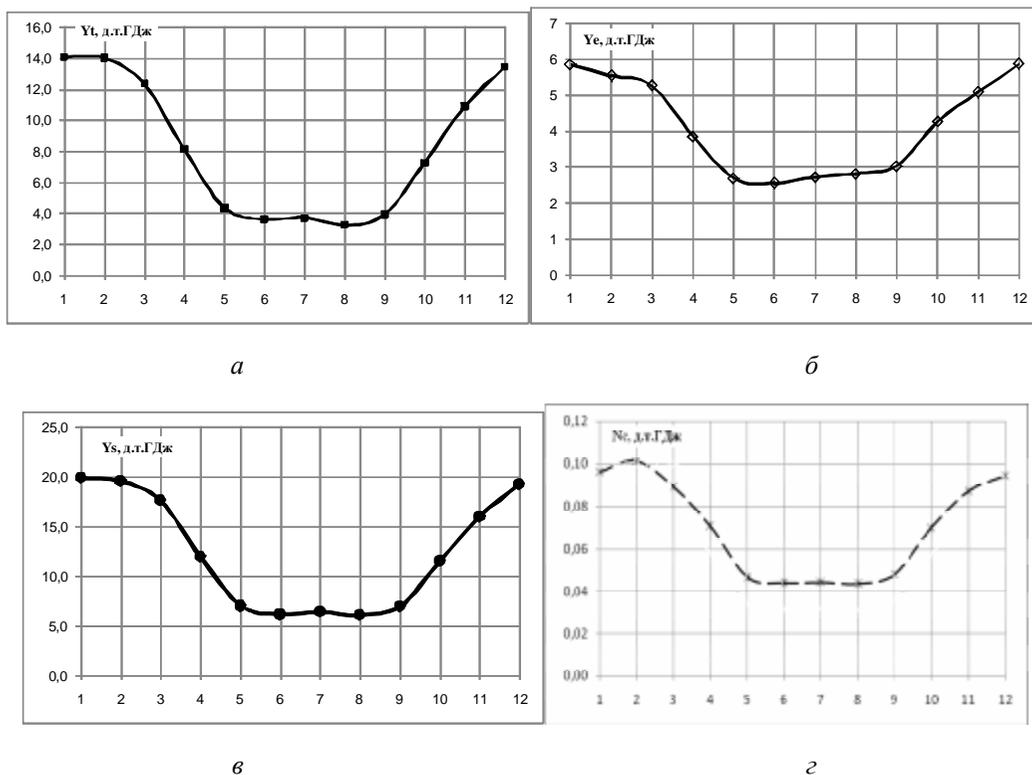
- конденсатно-питательный комплекс 43-49
- тягодутьевой комплекс 26-30
- циркуляционное водоснабжение 10-12
- теплофикационная установка 5,5-7
- водоподготовка 1,2-2,5
- топливоподача 0,3-0,5
- прочие 5-6

Анализ приведённых данных показывает, что конденсатно-питательный и тягодутьевой комплексы, а также теплофикационная установка потребляют основное количество энергии, идущей на собственные нужды, что в сумме составляет 74-86%.

Проведём анализ временных графиков изменения текущей мощности энергосистемы в течение года: тепловой, электрической и суммарной, а также относительных затрат электрической энергии на собственные нужды. На рис. 3 представлены ус-

редненные статистические данные этих значений за период 2000-2007 гг.

Наблюдаются значительное снижение производства энергии в летний период вследствие того, что основной тепловой нагрузкой для ТЭЦ является отопительная, и летом тепловая нагрузка системы падает до 27% среднего значения зимнего отопительного периода. Электрическая нагрузка в среднем снижается меньше – до 49%, поскольку энергосистема является дефицитной по электроэнергии. В летний период оборудование обеспечивает нагрузку в конденсационном режиме с коэффициентом полезного действия 23-24%. В целом глубина спада суммарной нагрузки составляет 30% (рис. 3, в).



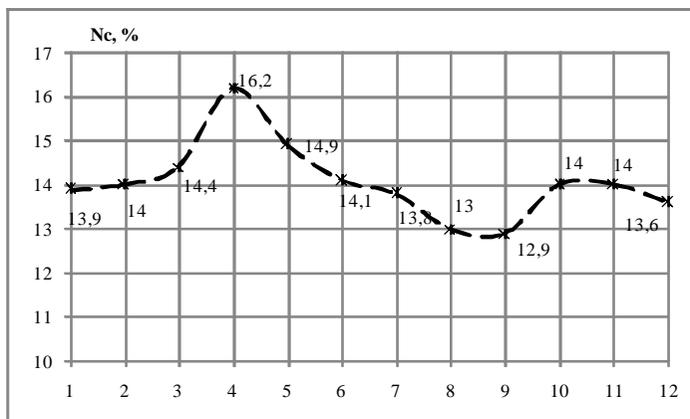
Р и с. 3. Динамика изменения текущей мощности энергосистемы в течение года: а – тепловой Y_t , б – электрической Y_e , в – суммарной Y_s и г – затрат электрической энергии на собственные нужды N_c

На рис. 3, а – г Y_t – тепловая мощность энергосистемы, дес. тыс. ГДж; Y_e – электрическая мощность энергосистемы, дес. тыс. ГДж; Y_s – суммарная мощность энергосистемы, дес. тыс. ГДж; N_c – затраты электрической энергии на собственные нужды, дес. тыс. ГДж; τ – время, мес.

Процентное изменение средней величины расхода электрической энергии на собственные нужды (СН) в течение года приведено на рис. 4.

Анализ приведённых данных показывает, что величина собственных нужд в течение всего периода колеблется в пределах от 12,9 до 16,2% и разброс значений составляет 21%. Характер изменения величины собственных нужд в течение года отличается от кривых изменения производства тепловой, электрической и суммарной энергии.

Проанализируем причину незначительных изменений относительных величин собственных нужд по сравнению с произведённым общим количеством энергии в различные периоды года. На рис. 5 представлены графики изменения среднемесячных значений выработки пара котельным цехом одной из станций Самарской области $D_{ТЭС\ ср}$ с номинальной производительности котлов $D_{ном}$ и среднемесячные значения нагрузки работающих котлов $D_{ср\ котлов}$.

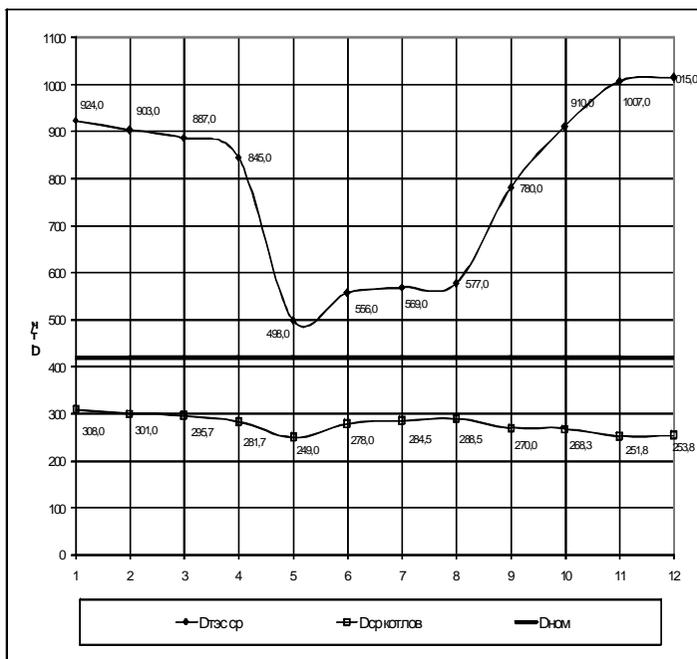


Р и с. 4. Расход электрической энергии на собственные нужды в течение года

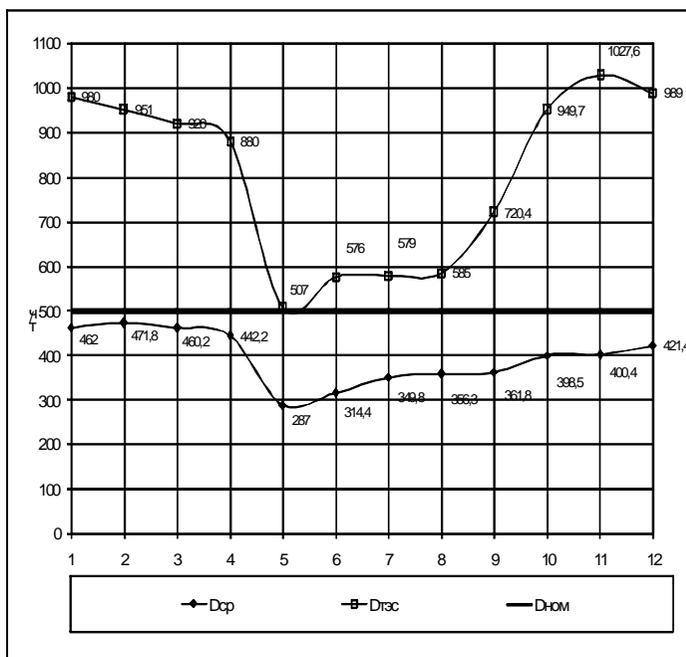
Базовым оборудованием является котельное оборудование производительностью 420 тонн пара в час. В зимние месяцы, когда тепловая нагрузка станции максимальна, котельное оборудование работает с производительностью 60-71% от номинальной нагрузки. При снижении нагрузки котла производительность тягодутьевых механизмов регулируется с помощью шиберов. Такая система регулирования изменяет производительность установки, практически не снижая расхода электрической энергии на её привод. Это обстоятельство привело к тому, что относительная величина расхода электроэнергии на собственные нужды возросла до 12-13% (см. рис. 2).

Существенное снижение паровой производительности котельного цеха до 55-56% в летний период, обусловленное окончанием отопительного сезона, практически не влияет на относительную величину собственных нужд. Это объясняется тем, что снижение общей паровой производительности осуществляется путем отключения оборудования, а не изменением его нагрузки. Колебания средней нагрузки котла в течение года составляют около 20%, что соответствует изменениям относительной величины расхода электрической энергии на собственные нужды. Следует отметить, что колебания паропроизводительности котлов и величины собственных нужд происходят в противофазе. С марта по июнь средняя нагрузка котлов сначала снизилась на 16%, а затем возросла на 10%, в это же время относительная величина собственных нужд увеличилась на 11%, а затем упала практически до начальной величины. Аналогичные изменения средней производительности и относительной величины собственных нужд имеют место и в конце года.

Проанализируем, как изменяется производительность группы питательных насосов и среднемесячная производительность одного питательного насоса. Питательный узел этой станции состоит из восьми питательных насосов одинаковой производительности. Привод каждого осуществляется электродвигателем мощностью 4 МВт.



Р и с. 5. Графики изменения среднемесячных значений выработки пара котельным цехом, номинальной производительности котлов и среднемесячные значения нагрузки работающих котлов



Р и с. 6. Графики изменения среднемесячных значений производительности группы питательных насосов, номинальной производительности одного насоса и среднемесячной нагрузки работающих насосов

На рис. 6 даны графики изменения среднемесячного количества питательной воды, подаваемой питательными насосами $D_{ТЭС}$, номинальная паспортная производительность одного питательного насоса $D_{ном}$ и фактическая среднемесячная производительность одного питательного насоса $D_{ср}$.

Производительность группы насосов обеспечивает паровую производительность котлов и непрерывную продувку, которая при эксплуатации котлов колеблется в пределах 2% от производительности. Таким образом, производительность группы насосов превышает паровую производительность котельного цеха на величину непрерывной продувки, а их кривые, приведенные на рис. 5, идентичны.

Средняя производительность питательного насоса изменяется в пределах 39%. Резкое снижение производительности в летний период отрабатывается также уменьшением числа работающих насосов. Так как производительность питательных насосов регулируется задвижкой на напоре, то потребление электрической энергии на привод насоса практически не меняется при снижении производительности.

С целью разработки мероприятий по снижению затрат электрической энергии на собственные нужды проведен анализ режимов работы оборудования тягодутьевых, конденсатно-питательных комплексов и теплофикационных установок и оценена эффективность применения на них регулируемого привода.

Для определения затрат на привод тягодутьевых механизмов разработана методика, позволяющая оценить потребляемую ими электрическую мощность при различных режимах работы с учетом реального технического состояния котлов. Было установлено, что котлы работают в переменных режимах, на которых можно получить экономию электрической энергии при использовании частотно-регулируемого привода и гидромурфт. Проведенные оценочные расчеты по срокам окупаемости регулируемых приводов показали, что на настоящий момент использование гидромурфт для привода дымососов котлов высокого давления производительностью 420 т/час окупится в течение 5,4-6,4 лет. Для дутьевых вентиляторов этот срок на два года больше.

Применение регулируемого привода увеличивает ресурс технологического оборудования, уменьшает эксплуатационные расходы, а применение современного оборудования обеспечивает требуемое качество электроэнергии.

Анализ режимов работы группы однотипных питательных насосов ТЭЦ мощностью 4 МВт позволил сделать вывод о необходимости использования регулируемого привода на трех насосах из восьми, что позволит обеспечить экономичность регулирования подачи питательной воды в диапазоне 250-4000 м³/час.

Теплофикационные установки ТЭЦ работают по закрытой схеме горячего водоснабжения. Анализ режимов их работы в течение отопительного сезона показал, что производительность сетевых насосов изменяется в пределах 10% от номинальной производительности и что в этих условиях применение регулируемого привода целесообразно. Установлено также, что ряд насосов имеет номинальную производительность, превышающую необходимую на 40-50%, при этом режим их работы в течение отопительного сезона постоянен. В этих условиях экономия электрической энергии на собственные нужды достигается путем замены электрического двигателя повышенной мощности на двигатель, отвечающий потребляемой насосом мощности.

В целом выявлены значительные отклонения реальных нагрузок работы оборудования энергосистемы от номинальных, что существенно увеличивает относитель-

ные затраты электрической энергии на собственные нужды. Изменение соотношения в выработке тепловой энергии в сторону увеличения производства тепловой энергии на отопление привело к существенным колебаниям в выработке суммарного количества энергии в течение года и аналогичным колебаниям расхода электрической энергии на собственные нужды.

Проанализируем на основе статистических данных влияние величин выработки энергии генерирующим предприятием на величину собственных нужд.

В качестве исследовательского аппарата используем производственную функцию (ПФ) в виде зависимости величины собственных нужд S_n от отпускаемых генерирующим предприятием тепловой Y_t и электрической мощностей Y_e :

$$S_n = F(A, Y_t, Y_e); \quad (1)$$

$$S_n = A Y_t^\alpha Y_e^\beta, \quad (2)$$

где A – масштабный коэффициент, α и β – коэффициенты эластичности, являющиеся функциями логарифмической чувствительности величины собственных электрических нужд к изменению отпускаемых мощностей:

$$\alpha = \frac{Y_t}{S_n} \cdot \frac{\partial S_n}{\partial Y_t} = \frac{\partial \ln S_n}{\partial \ln Y_t} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{Y_e}{S_n} \cdot \frac{\partial S_n}{\partial Y_e} = \frac{\partial \ln S_n}{\partial \ln Y_e}.$$

Коэффициенты эластичности численно характеризуют степень влияния тепловой Y_t и электрической Y_e мощности на величину собственных нужд. Значения эластичностей α и β показывают, на сколько процентов изменится расход электроэнергии на собственные нужды S_n при увеличении соответствующих мощностей Y_t и Y_e на 1%.

Коэффициенты модели A , α и β идентифицируем по модели (2) методом наименьших квадратов [3], минимизируя отклонения расчетных модельных значений от фактических данных, приведённых на рис. 3, г.

Значения параметров и показателей качества модели (2)

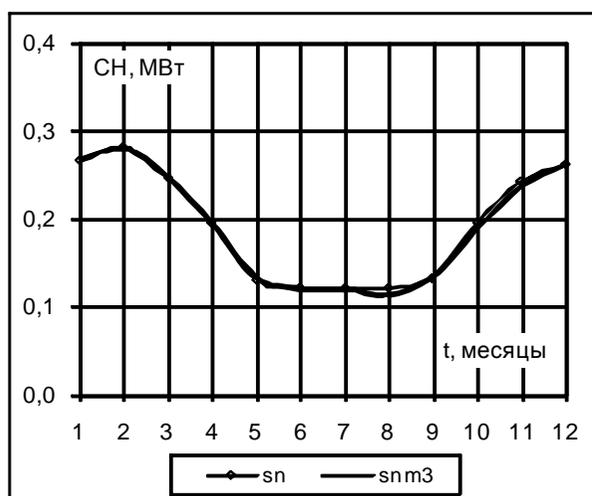
Характеристики	Численные значения
A	0,1074
α	0,4847
β	0,1848
λ	0,6690
DW	2,0792
R^2	0,9942
t_A	-104,1
t_α	9,3
t_β	2,0
F	950,9238
σ	0,0271

Качество модели и её параметров оцениваем значениями коэффициентов детерминации R^2 , t -критерием Стьюдента, F -критерием Фишера, среднеквадратичным отклонением σ и критерием Дарбина-Уотсона DW . Идентифицированные параметры и показатели качества исследуемой модели приведены в таблице. На рис. 7 пред-

ставлено сопоставление результатов расчета по модели (2) с реальными величинами расхода электрической энергии на собственные нужды. Видно, что построенная модель практически точно описывает значения величин расходов на собственные нужды станции в течение года. Среднеквадратичная ошибка погрешности расчётов составила 2,71%, коэффициент детерминации R^2 значим по статистике Фишера и достигает 0,994.

Модель (2) обладает высокими прогнозными свойствами – критерий DW равен 2,08, что свидетельствует об отсутствии автокорреляции остатков [3]. Все идентифицированные параметры модели значимы по критерию Стьюдента.

Полученные параметры модели (2) $a = 0,49$ и $b = 0,19$ показывают, что влияние тепловой нагрузки на величину собственных нужд в 2,67 раза больше влияния электрической. Увеличение тепловой мощности на 1% увеличивает расход на собственные нужды на 0,49%, а увеличение электрической мощности – только на 0,19%.



Р и с. 7. Собственные нужды, средние по месяцам за 2004-2007 гг.:

sn – реальные данные, $snm3$ – расчетные по модели $Sn = AYt^\alpha Ye^\beta$

Таким образом, можно сделать выводы о том, что уменьшение доли выработки тепловой энергии значительно снизило комплексную эффективность совместного производства тепловой и электрической энергии; для повышения эффективности необходимо восстанавливать баланс выработки, который позволит эксплуатировать существующее основное и вспомогательное оборудование в режимах, более близких к расчетным. При этом целесообразны мероприятия, направленные на увеличение тепловой нагрузки в летний период, на повышение доли ГВС.

Заключение

1. Выявлена закономерность роста относительной величины собственных нужд в условиях работы оборудования в нерасчетных режимах.
2. Показано, что рост производства тепловой энергии в виде горячей воды по сравнению с производством тепла на технологические нужды снижает эффективность функционирования генерирующего предприятия в летний период.

3. Обоснована целесообразность действий по повышению тепловой нагрузки генерирующих мощностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 327 с.
2. Теплотехнический справочник. Изд. 2-е, перераб. / Под ред. В.Н. Юренёва и П.Д. Лебедева. – Т.1. – М.: Энергия, 1975. – 744 с.
3. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. – Самара: Офорт, 2005. – 126 с.

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2008 г.

UDC 519.816

COMPLEX ANALYSIS OF RUNNING REGIMES OF CAPITAL EQUIPMENT OF GENERATING PLANTS AND OF AUXILIARY POWER REQUIRMENTS COST

N.V. Diligensky¹, A.A. Gavrilova, A.G. Salov, V.K. Gavrilov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., 443100

System performance of generating equipment of heating and power stations is researched. In the article is shown a regularity growth of relative value of auxiliary when equipment works in of-design conditions. Performance of generating plant in toto considerably depends on correlation of heat production for technological needs and firing. Reasonability of applications realization to extend heat load of cogeneration plants is validated.

Key words: *efficiency, generating plant, conditions, balance, heat energy, combined generation, auxiliaries*

¹ *Nicolay V. Diligensky, Doctor of Technical Sciences, Professor.
Anna A. Gavrilova, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Aleksey G. Salov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Valeriy K. Gavrilov, Postgraduate student.*

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РАВНОМЕРНО ПРИГОДНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ РЕШЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ТЕЛАХ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

*А.П. Ефимов*¹

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Показано, что предложенный ранее подход к построению равномерно пригодных во всей пространственно-временной области асимптотических решений может быть успешно применён и к задачам с краевыми условиями более общего третьего рода.

Ключевые слова: теплопроводность, асимптотическое разложение, решение, нестационарные задачи,

Высокая эффективность и гибкость асимптотических моделей обусловили их широкое распространение для анализа тепловых процессов. В работе [1] был описан подход к построению асимптотических представлений решений задач теплопроводности с граничными условиями первого и второго рода на поверхности. Данный подход может быть применён к задачам с краевыми условиями более общего третьего рода.

В качестве примера рассмотрим нестационарную задачу теплопроводности в пластине конечной толщины L с граничными условиями третьего рода на поверхностях [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \\ T|_{t=0} &= 0; \\ \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} &= 0; \quad -\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=L} = \alpha(T|_{x=L} - T_c). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь T – искомая температура; $x \in [0; L]$ – пространственная координата; $t \in [0; \infty)$ – временная координата; α – коэффициент теплообмена; T_c – температура внешней среды.

Решение данной задачи представимо в виде рядов [2], хорошо работающих при больших или при малых временах. При «средних» временах и при произвольных значениях коэффициента теплообмена α использование этих разложений затруднительно или невозможно. Целью данной работы является получение выражений, являющихся пригодными во всей пространственно-временной области определения задачи и при всех значениях α .

Для достижения этой цели будем следовать [1] и рассмотрим задачу теплопроводности (1) в трансформантах Лапласа. В трансформантах Лапласа решением этой задачи является следующая зависимость:

¹ Ефимов Александр Порфирьевич, кандидат технических наук, доцент.

$$\bar{T} = \frac{\alpha T_c}{p} \cdot \frac{\text{ch}(\sqrt{p}x)}{\alpha \cdot \text{ch}(\sqrt{p}x) + \sqrt{p} \cdot \text{sh}(\sqrt{p}x)}. \quad (2)$$

Первые члены разложений, равномерно пригодных по параметру α ($0 \leq \alpha < \infty$), могут быть записаны в следующем виде:

при малых значениях p

$$\bar{T}^0 = \frac{\alpha T_c}{p} \cdot \frac{1 + \frac{p}{2}x^2}{\alpha + p(\frac{\alpha}{2}L^2 + L)} \cdot \left(1 + O\left(\frac{p^2}{\alpha + p(\frac{\alpha}{2}L^2 + L)} \right) \right), \quad (3)$$

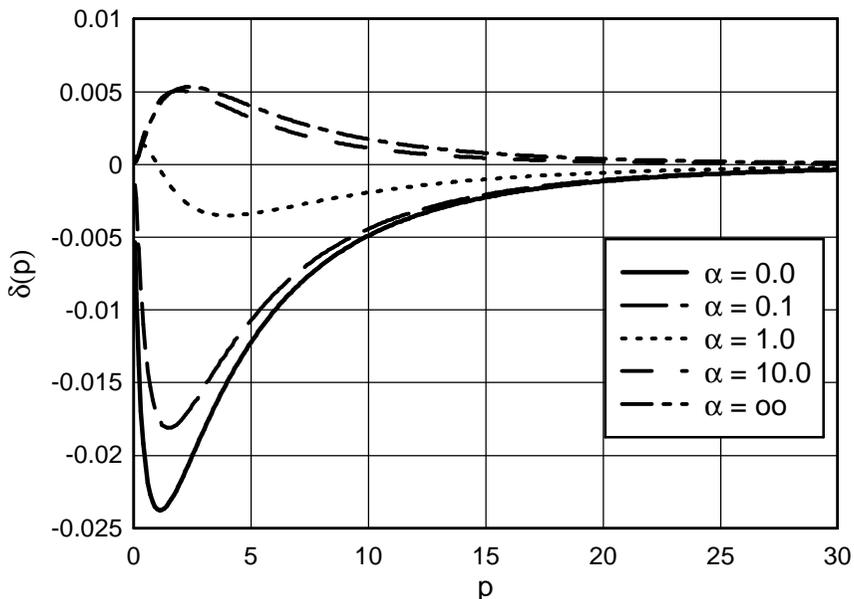
при больших значениях p

$$\bar{T}^\infty = \frac{\alpha T_c}{p} \cdot \frac{2 \cdot \text{ch}(\sqrt{p}x)}{\alpha + \sqrt{p}} \cdot \exp(-\sqrt{p}L) \cdot \left(1 + O\left(\frac{\exp(-2\sqrt{p}L)}{\alpha + \sqrt{p}} \right) \right). \quad (4)$$

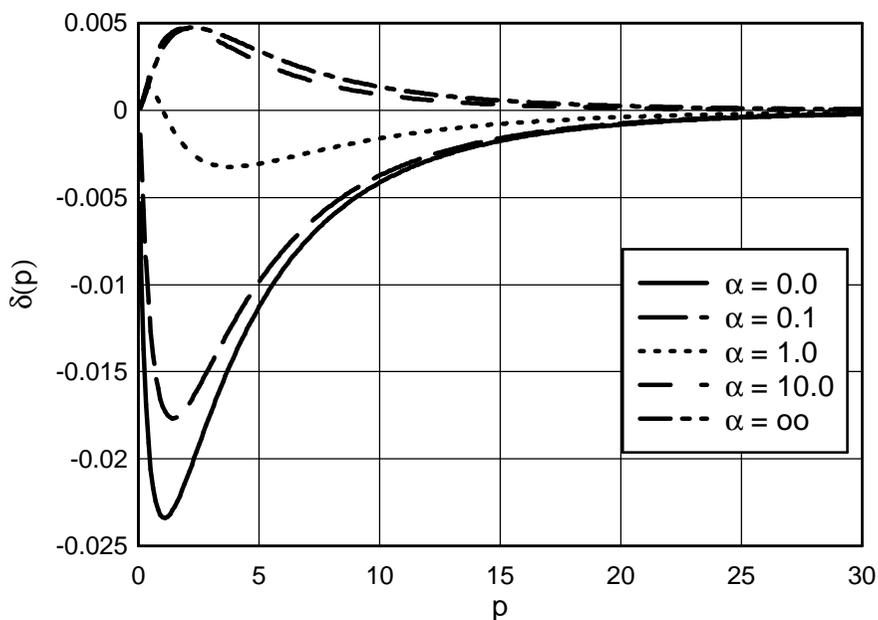
Использование подхода [1] к выражениям (3), (4) позволяет получить требуемое представление в виде

$$\begin{aligned} \bar{T} \sim & \frac{\alpha T_c}{p} \cdot \frac{2 \cdot \text{ch}(\sqrt{p}x)}{\alpha + \sqrt{p}} \cdot \exp(-\sqrt{p}L) - \\ & - \frac{\alpha T_c}{p} \left[\frac{-x^2}{L \cdot (\alpha L + 2)} + 2 \cdot \frac{\alpha^2 x^2 + 2}{(\alpha^2 L^2 + 2\alpha L + 2)(\alpha + \sqrt{p})} - \frac{4\sqrt{p}}{2\alpha + p(\alpha L^2 + 2L)} \cdot \frac{\alpha(L^2 - x^2) + L}{\alpha^2 L^2 + 2\alpha L + 2} - \right. \\ & \left. - \frac{2}{L} \cdot \frac{\alpha(\alpha^2 L^2 + 2\alpha L - 2)x^2 - L(\alpha^3 L^3 + 4\alpha^2 L^2 + 2\alpha L - 4)}{(\alpha L + 2)(2\alpha + p(\alpha L^2 + 2L)(\alpha^2 L^2 + 2\alpha L + 2)} \right] \cdot \exp(-2\sqrt{p}L). \quad (5) \end{aligned}$$

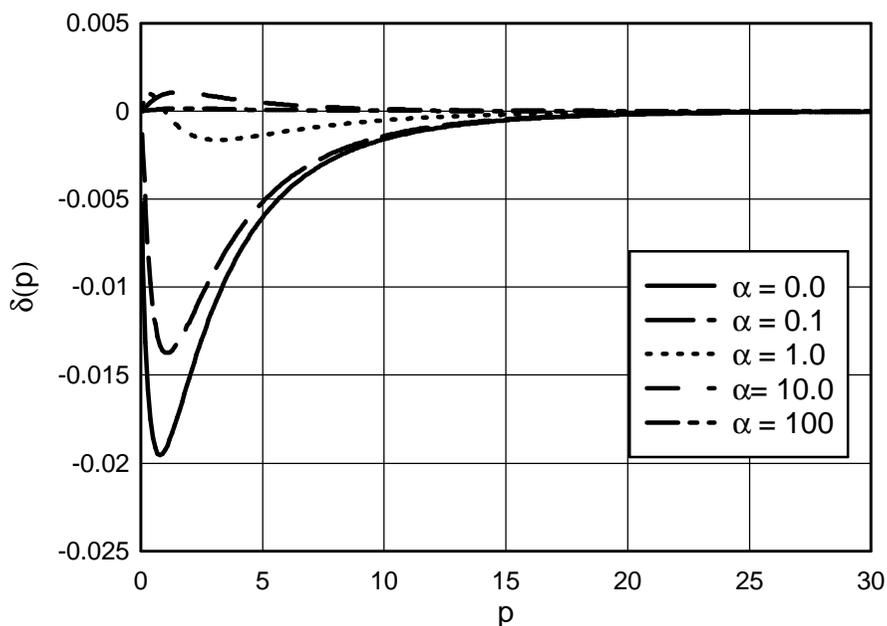
На рис. 1-3 отображены зависимости относительной погрешности $\delta(p) = (\bar{T} - \bar{T} \sim) / \bar{T}$ представления (5) от параметра p .



Р и с. 1. Зависимость относительной ошибки от параметра p при различных значениях коэффициента теплообмена α при $x=0.0$



Р и с. 2. Зависимость относительной ошибки от параметра r при различных значениях критерия α при $x=0.5$



Р и с. 3. Зависимость относительной ошибки от параметра r при различных значениях критерия α при $x=1.0$

Из рисунков видно, что решение (5) является равномерно пригодным во всей пространственно-временной области определения задачи (1). Максимальная относительная погрешность полученного представления решения достигается при $\alpha=0$, т.е. в случае, когда граничные условия третьего рода вырождаются в граничные ус-

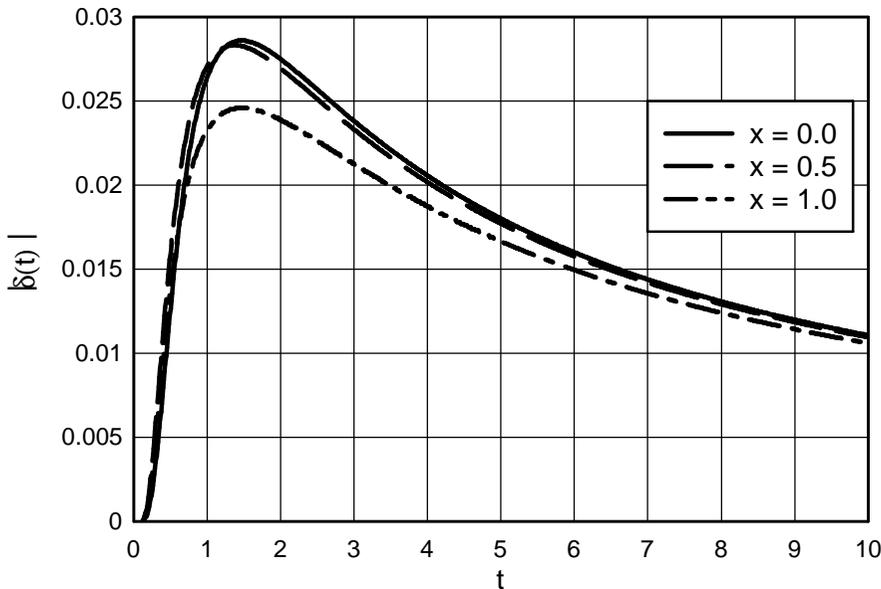
ловия второго рода, и составляет менее 2.5%.

Обратные преобразования Лапласа выражения (5) с использованием таблиц [3] дают следующее представление решения исходной задачи (1):

$$\begin{aligned} \frac{T^{\sim}}{T_c} = & \operatorname{erfc}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{L+x}{2\sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{-(L-x)^2}{4t}\right) \cdot \operatorname{erfcx}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{t}} + \alpha\sqrt{t}\right) - \\ & - \exp\left(\frac{-(L+x)^2}{4t}\right) \cdot \operatorname{erfcx}\left(\frac{L+x}{2\sqrt{t}} + \alpha\sqrt{t}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{L}{\sqrt{t}}\right) + \\ & + 2 \cdot \frac{\alpha^2 x^2 + 2}{\alpha^2 L^2 + 2\alpha L + 2} \exp\left(\frac{-L^2}{t}\right) \cdot \operatorname{erfcx}\left(\frac{L}{\sqrt{t}} + \alpha\sqrt{t}\right) - \\ & - \frac{1}{L} \cdot \frac{\alpha(\alpha^2 L^2 + 2\alpha L - 2)x^2 - L(\alpha^3 L^3 + 4\alpha^2 L^2 + 2\alpha L - 4)}{(\alpha L + 2)(\alpha^2 L^2 + 2\alpha L + 2)} \cdot \\ & \cdot \exp\left(\frac{-L^2}{t}\right) \cdot \operatorname{Reerfcx}\left(\frac{L}{\sqrt{t}} + i\sqrt{\frac{2\alpha t}{\alpha L^2 + 2L}}\right) - \\ & - \frac{\alpha(L^2 - x^2) + L}{\alpha^2 L^2 + 2\alpha L + 2} \sqrt{\frac{2\alpha t}{\alpha L^2 + 2L}} \exp\left(\frac{-L^2}{t}\right) \cdot \operatorname{Imerfcx}\left(\frac{L}{\sqrt{t}} + i\sqrt{\frac{2\alpha t}{\alpha L^2 + 2L}}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\operatorname{erfcx}(z) = \exp(-z^2) \cdot \operatorname{erfc}(z)$.

Точность решения (6) достаточно высока. Как видно из рис. 4, относительная погрешность вычислений по формуле (6) составляет менее 3%.



Р и с. 4. Зависимость относительной ошибки приближения (6) при $a = 0$ от безразмерного времени при различных значениях пространственной координаты x

Таким образом, подход, разработанный в [1], позволяет строить равномерно пригодные во всей пространственно-временной области аппроксимации решений нестационарных задач теплопроводности в телах конечных размеров с граничными

условиями произвольного рода на поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дилигенский Н.В., Ефимов А.П. Использование принципа дополнительности для конструирования систем математических моделей задач теплопроводности с требуемыми аппроксимативными свойствами: Тр. Третьей Российской нац. конф. по теплообмену. Т. 7. – М: МЭИ, 2002. –С. 111-114.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Т.1. Преобразование Фурье, Лапласа, Меллина. – М.: Наука, 1969. – 344 с.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2008 г.

UDC 536.24

METHOD FOR DEVELOPMENT OF UNIFORMLY ACCEPTABLE APPROXIMATIONS OF SOLUTIONS OF NON-STATIONARY THERMAL CONDUCTIVITY PROBLEMS FOR SOLIDS OF LIMITED SIZE

A.P. Efimov¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya str., 443100

It is shown, that suggested approach to development of approximations of solutions of non-stationary thermal conductivity problems, that are uniformly acceptable within spatial-time area, can be successfully summarized on to problems of more general third type of boundary conditions

Key words: heat conductivity, approximation, solution, non-stationary problem

¹ Aleksandr P. Efimov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor.

КОМБИНИРОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

В.П. Золотов¹, А.В. Будкин¹, А.А. Плисс²

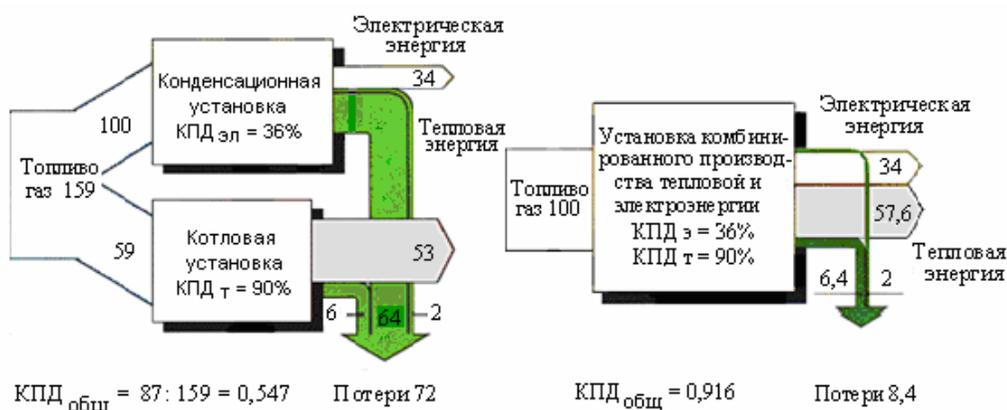
¹ Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ООО Межрегиональный НПЦ «Интех»
445027, г. Тольятти, ул. Юбилейная, д.51

Дается сравнение раздельного и комбинированного способов производства тепловой и электрической энергии, приводятся некоторые количественные показатели состояния энергетики в России и обосновывается целесообразность построения мини-теплоэлектростанций вместо существующих котельных. Предлагается схема такой мини-ТЭС с рядом преимуществ по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: центральная теплоэлектроцентраль, конденсационная электростанция, локальная автономная установка, газотурбинный двигатель, газопоршневой двигатель, диспергаторный парогенератор, трансзвуковой струйно-форсуночный аппарат

Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии – наиболее эффективный способ экономии топлива как в жилищно-коммунальном хозяйстве, так и в промышленности. Традиционное раздельное производство электрической энергии конденсационными электростанциями и тепловой энергии котловыми агрегатами является весьма неэффективной технологией. Большая часть энергии теряется в виде тепла отходящих газов (рис. 1).



Р и с. 1. Раздельное производство тепловой и электрической энергии тепловыми и конденсационными установками

Р и с. 2. Комбинированное производство тепловой и электрической энергии

Золотов Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент.

zolotovvp@mail.ru

Будкин Алексей Владимирович, аспирант.

Плисс Альберт Андреевич, генеральный директор

Общий коэффициент использования топлива установок комбинированного производства тепловой и электрической энергии может достигать 85-90% (рис. 2) [1]. Поэтому в течение многих десятилетий для производства электрической энергии и центрального отопления и использовались крупные тепло-электроцентралы (ТЭЦ).

Применение локальных автономных установок комбинированного производства тепловой и электрической энергии может также обеспечить этот уровень общего КПД. Эти установки могут применяться в тех случаях, когда использование централизованных тепловых электростанций является нерентабельным. Для локальных систем нет необходимости в передаче энергии на большие расстояния, поскольку энергия производится в месте ее потребления и потери минимизируются.

Но в настоящее время в России комбинированный цикл реализуется практически только на паротурбинных теплоэлектроцентралях – ТЭЦ, вырабатывающих 55% общего количества потребляемой электроэнергии, которые дают по стране только 36% тепловой энергии, так как применение таких ТЭЦ возможно только в крупнейших городах, где имеется достаточная плотность тепловых нагрузок [2]. Остальная часть электроэнергии производится на конденсационных электростанциях (КЭС). Отсюда следует, что при наилучших КПД КЭС в 38-39% и средних по России КПД КЭС в 25% (в США – 35%) [2] более 61% теплоты сгоревшего топлива станций КЭС выбрасывается в атмосферу через градирни. Основная же часть тепловой энергии (46%) производится в котельных [2], которые не только не вырабатывают электроэнергию, но являются её крупнейшими потребителями в сфере жилищно-коммунального хозяйства.

С изменением в настоящее время топливного баланса России 62% тепловых электростанций обеспечивается природным газом [3] (в первой половине XX века энергетика страны работала исключительно на угле, так как месторождения природного газа и нефти ещё не были открыты, а в первые годы XXI века было выявлено, что Россия располагает 42% прогнозных ресурсов и 33% запасов газа от мировых на 2.8% населения и 12.8% территории земного шара [2]). Следовательно, исторически сложившаяся в первой половине XX века гигантомания в энергетике (только крупные ТЭЦ и КЭС при работе на угле обеспечивали минимизацию удельного расхода топлива) уже перестала быть экономически обоснованной. В процессе обслуживания жилых массивов теплом от ТЭЦ на расстоянии до 40 км (станции строились вне населённых пунктов по экологическим соображениям) при планируемом уровне теплотерь в 5% последние выливаются в средние потери на уровне 15-16% от передаваемой тепловой энергии [2]. По другим источникам [3], эти потери достигают 30%. И в этой ситуации даже строительство районных котельных не даёт преимуществ по сравнению с домовыми котельными ввиду необходимости достаточно разветвлённой тепловой сети с неизбежными на ней потерями и дополнительными затратами электроэнергии на прокачку сетевой воды.

Наличие и постоянное развитие в центральной Европейской части России Единой системы газоснабжения неизбежно наталкивает инженеров на мысль о целесообразности создания параллельной по отношению к Единой энергетической системе другой электрогенерирующей системы, объединённой не ЛЭП, а газовыми трубами (ещё в 1962 г. Н.И. Сазонов отмечал, что передача газа по газопроводам в 10-12 раз экономичнее передачи электрической энергии по высоковольтным линиям электропередачи) [2, 3, 4]. Поэтому электростанции на газе надо строить в районах потребления тепловой и электрической энергии.

Реализация в каждой котельной на газе комбинированного цикла – выработка электроэнергии с утилизацией выделяющегося при этом тепла на нужды теплоснабжения – решает задачу и местного электрообеспечения, и отопления нужного объекта при доведении КПД использования энергетического потенциала сжигаемого топлива до уровня в 91-92%. Экономится топливо, решаются экологические проблемы, повышается надёжность энергообеспечения. Одновременно осуществляется замена выбывающих за счёт физического старения электропроизводящих мощностей страны. Котельная при этом преобразуется в мини-ТЭС по сложившейся ныне терминологии [3].

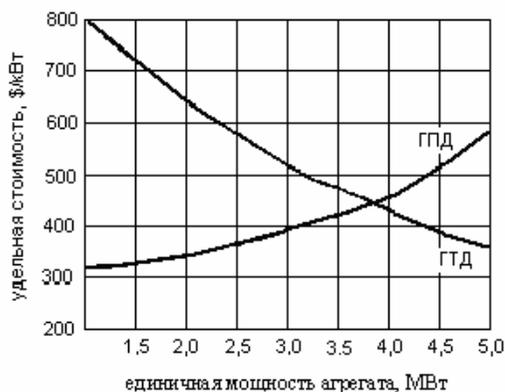
В работе [4] аргументировано показывается, что собственнику значительно дешевле построить свою электростанцию на базе мини-ТЭС, чем платить по завышенным в несколько раз тарифам РАО «ЕЭС России» за потреблённую электроэнергию. Так, в [5] утверждается, что себестоимость выработанной электроэнергии на мини-ТЭС с турбогенераторами НПВП «Турбокон» с единичной мощностью 500-600 кВт (турбинами с противодавлением) в 2000 г. составляла 6 коп./кВт, между тем котельные в г. Москве в первой половине 2001 г. платили «Мосэнерго» за электроэнергию 45-64 коп./кВт. Удельная стоимость газовых электростанций с поршневыми двигателями и ресурсом в 200 тысяч часов – 250-900 долларов за кВт установленной мощности, а средний показатель стоимости ТЭЦ по России – 1600 долларов за кВт установленной мощности [4]. По опубликованным в печати данным ряда моторостроительных заводов России, удельная стоимость 1 кВт установленной мощности ТЭС на базе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) составляет от 190 до 500 долларов США; удельная стоимость газовой конденсационной электростанции на конец 2000 г. – 860 долларов за кВт установленной мощности [4].

При этом следует учитывать, что российские электростанции приобретают газ по внутренним ценам, которые на январь 2008 г. примерно в шесть раз ниже мировых. Перекос использования природного газа в топливном балансе страны по отношению к углю обусловлен и тем, что цены на уголь в среднем в 1.5 раза превышают цены на газ [3]. Согласно энергетической стратегии России до 2020 г. [3], в скором будущем соотношение цен «газ-уголь» будет на уровне 2/1, что грозит потребителям энергоресурсов страны по крайней мере трёхкратным увеличением тарифов. И если до 1990 г. доля затрат на электроэнергию и тепло в общей себестоимости продукции составляла 3-7%, то рост цен на эти ресурсы привёл к увеличению этой доли до 45-65% к 1997 г. [6, 7]. Негативная тенденция в настоящее время усугубляется, темпы роста затрат на энергетику угрожающе велики. Единственный разумный выход в этой ситуации по решению проблемы обеспечения надёжной работы предприятия при приемлемых затратах на энергоресурсы – надежда на собственные силы и создание мини-ТЭС под свои нужды.

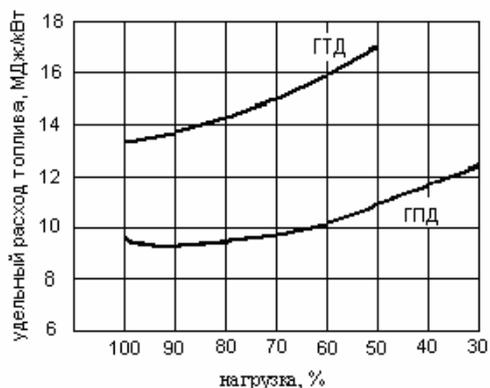
Дискуссия в периодических изданиях [2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13] на тему предпочтительности использования в мини-ТЭС в качестве привода для электрогенератора газотурбинного двигателя (ГТД) или двигателя внутреннего сгорания (ДВС), работающего на природном газе – газо-поршневого двигателя (ГПД), склоняется в сторону применения ГПД по ряду показателей. В частности, ГТД требует сооружения газокomppressorных дожимающих станций для повышения давления газа с 0.3-1.2 МПа городской газовой сети до 2.5 МПа на минимально допустимом расстоянии от жилых объектов в 500 м; наличия хранилищ резервного дизельного топлива; новой дымовой трубы и котлов-утилизаторов из-за большего расхода выхлопных га-

зов. ГТД характеризуется высоким уровнем шума и в три раза большим удельным выходом оксидов азота на килограмм сожжённого топлива; моторесурс ГТД в 30-35 тысяч часов всегда ниже моторесурса дизельных генераторов (60-120 тысяч часов), величина которого для ГПД может быть ещё увеличена в 1.5-2 раза, а геоактивация узлов трения при добавлении в смазочное масло модификаторов увеличивает ресурс двигателя ещё в несколько раз [2]; кроме того, среднее значение КПД для ГТД составляет 25%, а для ГПД – 40%.

На рис. 3 приведены графики удельной стоимости получения электроэнергии в зависимости от единичной мощности импортного агрегата установками на базе газопоршневого двигателя (ГПД) и газотурбинного двигателя (ГТД), а на рис. 4 – кривые удельного расхода топлива этих установок при различных нагрузках [9]. Из них следует, что при единичных мощностях агрегатов до 3,8 МВт явное предпочтение следует отдавать установкам на газопоршневых двигателях. Удельный расход топлива для ГПД также ниже на 40-60% в зависимости от нагрузки. Существующая ниша для ГТ ТЭС находится выше 4 МВт на одну установку [9].



Р и с. 3. Удельная стоимость электроэнергии на базе газопоршневой и газотурбинной установок



Р и с. 4. Удельный расход топлива газопоршневой и газотурбинной установок в зависимости от нагрузки

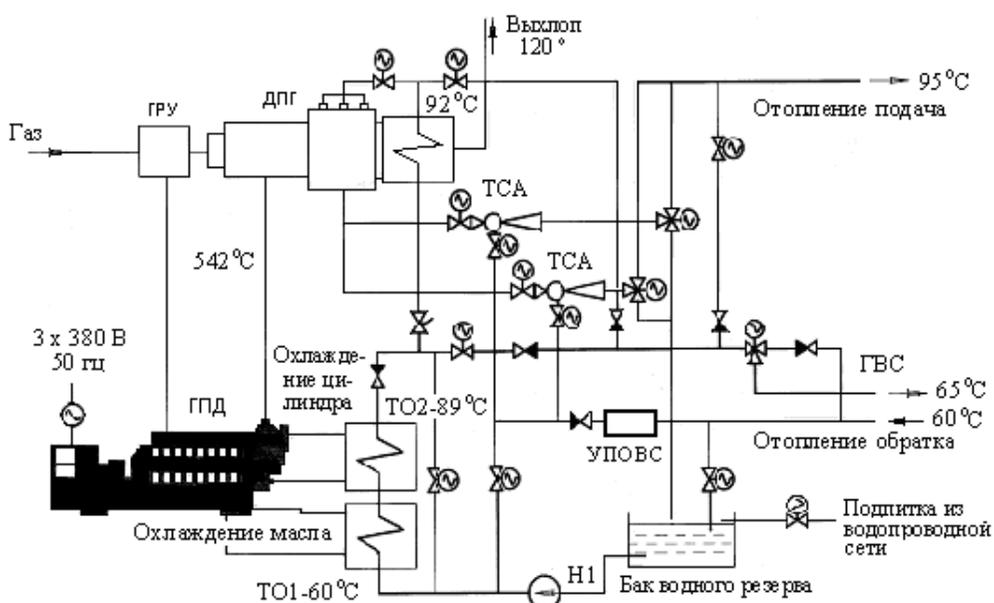
Энергообеспечение на базе использования комбинированного цикла по аналогии с опытом зарубежных стран, где каждый достаточно крупный объект – торговый центр, развлекательный комплекс, медицинское учреждение – обязательно оснащен мини-ТЭС, усложняется наблюдаемой неизбежной неравномерностью потребления электроэнергии во времени дня (утро, полдень, вечер), а также в зависимости от времени года. Производство же тепловой энергии в мини-ТЭС жёстко функционально связано с выработкой электроэнергии. Статистические наблюдения показывают, что пиковые нагрузки на теплоснабжение отопления и вентиляции могут в 2-2.5 раза превышать потребности в электроэнергии [13], и для восполнения дефицита тепла в системе энергообеспечения необходимо предусматривать соответствующее котельное оборудование. Эта ситуация критична в случае разработки системы энергообеспечения сельскохозяйственного тепличного комплекса, где весьма жёсткие допуски на температуру рабочих помещений.

Межрегиональный МНПЦ ИНТЕХ совместно с СамГТУ разработали комплекс оборудования для реализации комбинированного цикла энергообеспечения (рис. 5).

Схема комбинированного производства электрической и тепловой энергии строится на базе газопоршневого двигателя для производства электроэнергии, причём в

МНПЦ ИНТЕХ ведутся работы по дальнейшему увеличению моторесурса относительно предложенной в [2, 4] системы теплоснабжения на базе диспергаторного парогенератора ДПГ, трансзвукового струйно-форсуночного аппарата ТСА и микропроцессорной системы управления. Реализация технологического процесса исключает необходимость проведения химподготовки воды, наличия сетевых насосов, минимизирует необходимые производственные площади. КПД составляет 89%, оборудование невзрывоопасно, реализуется качественно-количественное регулирование процесса теплоснабжения, обеспечивается эффект самоочистки теплотрасс, тепловых приборов в процессе эксплуатации. Стоимости электроэнергии – в три-четыре раза и тепла – по крайней мере, в два раза ниже по отношению к существующим на рынке. К недостатку системы следует отнести снижение КПД в летнее время.

Реализованные НПЦ ИНТЕХ новшества в большей части касаются системы теплоснабжения. Кратко рассмотрим некоторые из них.



Р и с. 5. Устройство комбинированного производства тепловой и электрической энергии:

ГПД – газопоршневой двигатель; ПГ – диспергаторный парогенератор;

ГРУ – газорегулирующее устройство

Система водоподготовки

Установки теплоснабжения МНПЦ ИНТЕХ оснащаются аппаратами безреагентной водоподготовки (УПОВС-2 ОАО «МАКСМИР»), исключаящими накипеобразование в котельном агрегате за счёт воздействия на воду магнитного, электрического и ультразвукового полей [14].

Образование накипи, а также коррозия инженерного оборудования и коммуникаций относятся к числу наиболее актуальных проблем теплотехники. Образование на внутренней поверхности котельного агрегата слоя накипи толщиной 1 мм влечет за собой перерасход топлива на 5-8%, а некачественная водоподготовка (или её отсутствие) может привести к снижению КПД системы на 15-30%.

В установках теплоснабжения МНПЦ ИНТЕХ применяется четырехкамерный магнитный аппарат (УПОВС-2) со встроенной камерой деаэрации, при использовании которого отпадает необходимость применения дорогостоящих фильтров, химических реагентов, деаэрационного устройства. Вода поступает в камеры деаэрации, где под воздействием регулируемых магнитного, электрического полей и ультразвука из неё полностью удаляются O_2 и CO_2 , наличием которых обусловлена внутренняя коррозия системы.

Применение четырех рабочих камер, по которым проходит вода, позволяет длительно и комплексно воздействовать на неё совокупными полями, в результате чего соли накипеобразователей превращаются в мелкодисперсный шлам, который не откладывается на внутренних поверхностях энергооборудования и трубопроводов и отделяется в грязеуловителе.

Аппараты противонакипной обработки водных систем (УПОВС-2) пригодны для подготовки практически любых вод с температурой до $115\text{ }^{\circ}\text{C}$. Производительность – до $30\text{ м}^3/\text{час}$, потребление электрической мощности – от 0.3 до 2.2 кВт·час. Жесткость исходной воды – 1,5-30 мг экв./л. Содержание железа в исходной воде – до 1,5 мг/л.

Диспергаторный парогенератор

Конструкция парогенератора жаротрубная. Топливо через датчик расхода поступает в блочную горелку. Температура пара на выходе парогенератора – $180\text{--}240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление пара – 2-10 ати.

Принципиальное отличие этого аппарата заключается в том, что в нем обеспечивается нагрев воды не в жидком агрегатном состоянии, а в виде аэрозоли (холодный водяной пар) с диаметром частиц воды в 10-20 микрон [15]. Получение аэрозоли осуществляется с помощью ультразвуковых диспергаторов разработки МНПЦ ИНТЕХ. Аэрозоль имеет физические свойства, аналогичные перегретому пару. Диспергаторный парогенератор тем самым обеспечивает основное требование – взаимную независимость температуры пара и давления.

Скорость нагрева аэрозоли значительно выше скорости нагрева воды, поэтому скорость теплосъема с нагретой поверхности при омывании ее потоком мелкодисперсной аэрозоли значительно выше, чем при омывании этой же поверхности водой. При скорости потока аэрозоли, близкой или равной скорости потока горячих газов, нагревающих разделительную поверхность, резко возрастает коэффициент теплопередачи.

Следовательно, водная аэрозоль интенсивно отбирает тепло от горячих дымовых газов, обеспечивая возможность уменьшения габаритов парогенератора. Водная аэрозоль поступает в межтрубное пространство парогенератора. Теплообмен между горячими газами и водной аэрозолью происходит со значительно большей скоростью, чем между горячими газами и жидкой средой. Пар нужной температуры и необходимого давления через выходной патрубок поступает на нагрузку. Часть выхлопных газов подается посредством парогазового струйного компрессора обратно в камеру сгорания, обеспечивая дожигание горючих компонентов. Поэтому содержание вредных выбросов в выхлопе парогенератора значительно ниже установленных норм ПДК и удовлетворяет самые жесткие требования международных стандартов.

Парогенератор обеспечивает нагрев тонкодиспергированной воды до заданных параметров (температура и давление) с КПД в 94%. Удельный расход топлива на 5-8% меньше, чем в традиционных котельных агрегатах аналогичной мощности. Вре-

мя выхода парогенератора на заданный режим – несколько десятков минут. Характеризуется повышенной надёжностью работы. Отсутствие воды в жидком агрегатном состоянии в зоне высоких температур в предложенной конструкции парогенератора снимает угрозу потенциального взрыва в случае аварийного попадания водной аэрозоли в камеру сгорания при растрескивании жаровых труб, характерную для всех существующих котельных агрегатов. Аппарат нечувствителен к содержанию солей в диспергируемой воде. При прохождении воды через ультразвуковое поле диспергатора кристаллическая решетка солей, растворенных в воде, разрушается. Аморфное состояние солей является временным (метастабильным), но период метастабильного состояния значительно превышает время нахождения водной аэрозоли в горячей зоне, и соли на горячих трубах теплообменника, в теплоотводах и тепловых приборах не откладываются также и по этой причине. Система управления обеспечивает автоматическое поддержание заданных выходных параметров пара. Пар из парогенератора поступает на вход пароструйного насоса-подогревателя (ТСА).

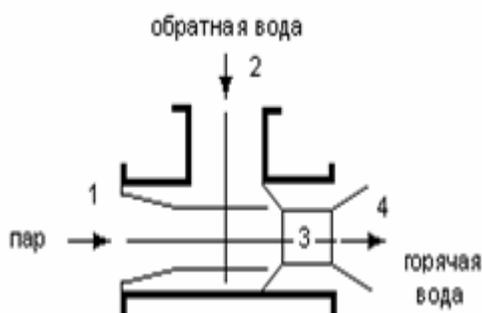
Пароводяной трансзвуковой струйно-форсуночный аппарат

Активный компонент (пар) подводится к активному соплу 1 (рис. 6) [16], проточная часть которого профилируется таким образом, чтобы были обеспечены полное расширение пара и высокая скорость его истечения. Пассивный компонент (вода) поступает через 2 в приемную камеру, из которой через кольцевой зазор между выходным срезом активного сопла и образующей конического насадка подается в камеру смешения, где смешивается с активным компонентом. Кольцевой зазор регулируется таким образом, чтобы скорость потока через него составляла $50 \div 80$ м/сек. В камере смешения образуется гомогенная двухфазная смесь. Особенностью двухфазных сред является значительное снижение скорости звука относительно скорости звука в однофазных средах. Скорость звука в жидкой фазе (вода) – 1500 м/сек, скорость звука в паре – 300 м/сек, скорость звука в смеси (пар с водой) – 5 м/сек. Таким образом, скорость потока в камере смешения перед входом в цилиндрический канал 3 значительно превышает местную скорость звука. В цилиндрическом канале камеры смешения при сверхзвуковом движении потока возникают скачки уплотнения, что приводит к сжатию смеси. При этом происходит полная конденсация пара, сопровождающаяся кавитационным схлопыванием сжатых пузырьков пара. Вся энергия пара передается воде. В образовавшейся однофазной жидкой среде резко возрастает скорость звука.

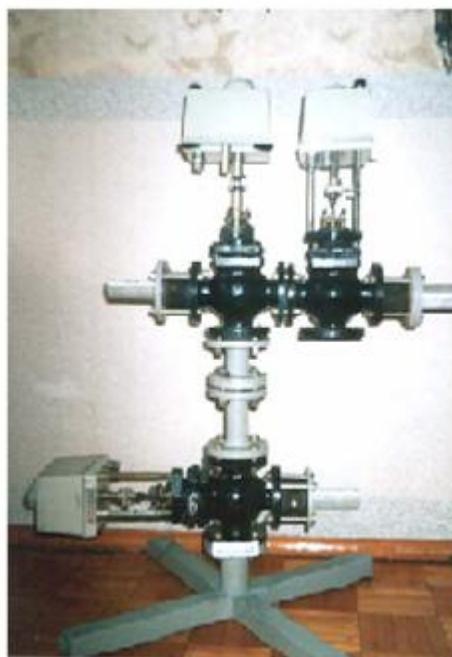
Скорость потока в цилиндрическом канале оказывается значительно ниже местной скорости звука. Непосредственный переход через звуковой барьер в адиабатном канале постоянного сечения невозможен.

Происходит резкое возрастание статического давления. Интенсивность скачка давления пропорциональна квадрату числа Маха. Из цилиндрического канала поток попадает в диффузор 4, где происходит торможение потока и повышение статического давления. Статическое давление на выходе ТСА может достигать величин, превосходящих давление входных компонентов. Кавитационный процесс в камере смешения обеспечивает постоянство расхода. ТСА является насосом объемного типа, изменение сопротивления нагрузки на выходе ТСА не влияет на входные характеристики аппарата. Напорная характеристика ТСА обеспечивает циркуляцию потока теплоносителя в теплосети без применения циркуляционных насосов.

Сконденсировавшийся пар непосредственно передает воде всю свою потенциальную энергию, обеспечивая нагрев воды. Изменение давления пара на входе ТСА приводит к изменению величины расхода теплоносителя и его температуры в широких пределах. Изменение давления воды на втором входе ТСА позволяет в некоторых пределах изменять температуру теплоносителя на выходе ТСА при неизменном расходе.



Р и с. 6. Схема транзвукового струйно-форсуночного аппарата



Р и с. 7. Установка теплоснабжения на 2,5 Гкал/ч

Таким образом, ТСА является насосом-подогревателем с КПД=97%, обладающим характеристиками, обеспечивающими наиболее эффективное качественно-количественное регулирование в системе отопления. НПЦ ИНТЕХ располагает ноу-хау по расчёту аппарата и всей системы в целом.

Общий КПД предлагаемой системы теплоснабжения с учётом теплотрассы и отопительных приборов составляет 89%. В случае комбинированного производства электроэнергии и тепла общий КПД достигает 93%.

На рис. 7 представлена последняя модификация установки теплоснабжения мощностью 2.5 Гкал/час на базе ТСА. Вся система элементов струйного аппарата размещена на вертикальном участке трубопровода. Регулирующие клапаны в верхней части конструкции обеспечивают подачу пара (слева) и обратной воды (справа) через обратные клапаны. Горячая вода в систему теплоснабжения подаётся клапаном в нижней части установки через третий обратный клапан. Этим минимизируется количество запорной арматуры. В зависимости от диаметра трубопровода мощность установки варьирует от 2.5 (при D_{y50}) до 14.4 (при D_{y125}) Гкал/ч. Конструк-

ция была отмечена дипломом на Всероссийском конкурсе работ по энергосбережению в 2003 г. в г. Москве.

Микропроцессорная система управления обеспечивает работу системы теплоснабжения по критерию экономичности. Реализуется автоматическое управление процессом теплоснабжения, измерение необходимых параметров во времени, хранение их значений. Производится автоматический учёт топливных ресурсов и определение эффективности использования энергоресурсов установки.

Установки теплоснабжения на базе ТСА впервые монтировались МНПЦ ИНТЕХ в 1992 г. в г. Казани. Всего выполнено 12 проектов. В 1996 и затем в 2001 г. были сданы в эксплуатацию установки теплоснабжения на имеющихся паровых мощностях на Самарском комбинате керамических материалов (мощность 5 Гкал/час) и на заводе «Урал-цемент» г. Коркино Челябинской области (мощность 30 Гкал/час). Установки работают и в настоящее время, отзывы везде положительные. Но те устаревшие конструктивные решения уже не могут быть рекомендованы к использованию, так как модификация, представленная на рис. 7, является наиболее целесообразной.

В заключение необходимо отметить следующее. Анализ ситуации с ценами на природный газ по основополагающим правительственным решениям [3] демонстрирует неизбежный рост стоимости этого энергоносителя в достаточно близком будущем. Для потенциального заказчика локальных систем энергообеспечения есть ещё некоторый запас времени на обдумывание альтернативных предложений и принятие решения по реализации одного из них. Но следует иметь в виду, что запас времени не безграничен. И если сейчас испрашиваемое энергоснабжающими фирмами финансовое обеспечение в качестве технических условий на возможность подключения к их сетям зачастую превышает затраты на реализацию собственного локального теплоснабжения и составляет большую часть затрат на построение локального теплоэлектрообеспечения, то с общим ростом цен к 2020 г. эти расходы могут многократно возрасти.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ольховский Г.Г.* Совершенствование технологий комбинированной выработки электроэнергии и тепла на ТЭЦ России // *Новости теплоснабжения.* – 2003. – №10.
2. *Дубинин В.С., Лаврухин К.М.* Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии в котельных // *Новости теплоснабжения.* – 2002. – №4(20), апрель. – С. 44-47.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года // *Российская бизнес-газета.* – 2003. – №429 от 07.10.
4. *Дубинин В.С., Лаврухин К.М.* Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии в котельных // *Новости теплоснабжения.* – 2002. – №5(21), май. – С. 45-49.
5. *Фёдоров В.А., Смирнов В.М.* Опыт разработки, строительства и ввода в эксплуатацию малых электростанций // *Теплоэнергетика.* – 2000. – №1.
6. *Кореннов Б.Е.* Замена РОУ противодавленческой турбиной – эффективное энергосберегающее предприятие для котельных и ТЭЦ // *Промышленная энергетика.* – 1997. – №7.
7. *Левин Б.И., Степина Е.С.* Комбинированные источники энергоснабжения на базе паровых и водогрейных котельных // *Новости теплоснабжения.* – 2002. – №6(22), июнь. – С. 30-35.
8. *Барков В.М.* Когенераторные технологии: возможности и перспективы // *Стройпрофиль.* – 2005. – №3 (41).

9. *Замоторин Р.В.* Малые теплоэлектроцентрали – поршневые или турбинные // Малые и средние ТЭЦ. Современные решения: Матер. конф. 7-9 сентября 2003 г. НП «Российское теплоснабжение», www.rosteplo.ru
10. *Ридер К.Ф., Гайстер Ю.С.* Опыт проектирования мини-ТЭЦ с газопоршневыми агрегатами // Малые и средние ТЭЦ. Современные решения: Матер. конф., сентябрь 2005 г. НП «Российское теплоснабжение», www.rosteplo.ru
11. *Ильин Е.Т.* Основные принципы реконструкции и модернизации ТЭЦ. – ЗАО «Уральский турбинный завод», www.utz.ru
12. *Фаворский О.Н.* ГТУ – основа будущей энергетики России // Двигатель, <http://engine.aviaport.ru>
13. *Наумов А.Л.* Мини-ТЭЦ – очередной бум или объективная реальность отечественной энергетики // АВОК. – 2005. – №7.
14. *Матвиевский А.А., Овчинников В.Г.* Безреагентная технология водоподготовки // Новости теплоснабжения. – 2005. – №7.
15. *Плисс А.А., Золотов В.П.* Модуль локального теплоснабжения // Компьютерные технологии в науке, практике, образовании: Труды Всерос. науч.-практ. конф., октябрь 2004 г. – Самара: СамГТУ, 2004.
16. *Золотов В.П.* Локальное теплоснабжение // Вестник СамГТУ. Сер. «Технические науки». – №25. – 2005.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2008 г.

UDC 697.34(075.8)

THE COMBINED MANUFACTURE OF THERMAL AND ELECTRIC ENERGY: THE CONDITION, PROSPECTS

V.P. Zolotov¹, A.V. Budkin¹, A.A. Pliss²

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya ul., Samara, 443100

² Interregional R&D centre « Intech», LLC
51, Yubileynaya, Tollyzti, 445027

Comparison of the separate and combined ways of manufacture of the thermal and electric energy, some quantity indicators of a condition of power in Russia are given and the expediency of construction of minithermal power stations instead of existing boiler-houses is proved. The scheme such mini-TeS with a number of advantages in comparison with analogues is offered.

Key words: central heart-electromain line, condensation power station, local independent installation, gasturbine engine, gaspiston engine, spray steam and gas genetater, transsonic

*V.P. Zolotov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor
A.V. Budkin, Postgraduate student
A.A. Pliss, general director*

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА ШТЕЙНА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ СУЛЬФИДНЫХ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧИ ВАНЮКОВА

*А.В. Спесивцев*¹, *Э.Д. Кадыров*², *Н.В. Данилова*², *В.И. Лазарев*³

¹ ЗАО «ТЕХНОЛИНК»

190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 103

² Санкт-Петербургский государственный горный институт

199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2

³ Медный завод Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский Никель»

Приведено описание построения математической модели печи Ванюкова методом полного факторного эксперимента. Проведен анализ зависимости содержания меди в штейне от расхода загружаемых в печь материалов и кислородовоздушной смеси. Для анализа зависимости использовались исторические производственные данные печи Ванюкова.

Ключевые слова: *полный факторный эксперимент, интеллектуализация автоматизированных систем управления, сложные системы, случайный процесс, стохастический процесс, анализ данных, критерий Фишера, метод Монте-Карло*

Введение

Математическое моделирование процессов пирометаллургии наталкивается на ряд объективных трудностей. С одной стороны, построение детерминированных моделей затруднено сложностью самого процесса теплообмена в турбулентном гидродинамическом режиме при наличии экзо- и эндогенных физико-химических превращений гетерогенных расплавов при переработке сульфидного медного никельсодержащего сырья, нехваткой теоретических наработок в этих направлениях, сильным воздействием неконтролируемых внешних факторов, мощным влиянием «человеческого фактора» в управлении и др. [1]. С другой стороны, построение статистических многомерных регрессий по статистическим данным пассивного эксперимента практически неоправданно в виду сильной коррелированности независимых переменных процесса с нарушением фундаментальных предпосылок корреляционного и регрессионного анализов [2]. В подобных условиях наиболее приемлемым является применение методов планирования эксперимента [3, 4, 6]. Однако проведение специальных опытов на промышленном агрегате осложнено требуемой высокой точностью стабилизации основных переменных выбранного факторного пространства в течение длительного времени (сутки). Кроме того, необходимо выполнить требования «Технологической инструкции» и учесть нестационарность технологического процесса.

Спесивцев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист.

E-mail: sav2050@gmail.com

Кадыров Энвер Джумагелдиевич, кандидат технических наук, доцент.

E-mail: asutp@spti.ru

Данилова Наталья Васильевна, аспирант.

E-mail: asutp@spti.ru

Лазарев Владимир Ильич, начальник технического отдела.

Целью данного исследования является создание математической модели качества штейнов печи Ванюкова методом планирования эксперимента с введенной нами модификацией – построением матрицы реализаций путем выбора значений независимых переменных, их сочетаний и содержания меди в штейне (Y) из суточных данных оперативного контроля печи Ванюкова (ПВ) за 2006 год.

1. Построение модели

Факторное пространство ограничено четырьмя переменными из-за технической трудности поиска режимов ведения процесса с требуемыми наборами значений переменных. Предварительные исследования показали, что наибольшее влияние на концентрацию меди в штейне оказывают следующие факторы: расход сульфидных медьсодержащих материалов (x_1), расход флюсов (x_2), содержание кислорода в кислородо-воздушной смеси – КВС (x_3) и расход технического кислорода на печь (x_4).

В качестве выходной переменной (Y) выбрано содержание меди в штейне.

Методика заполнения матрицы планирования полного факторного эксперимента типа 2^4 заключалась в поиске соответствующих сочетаний значений независимых переменных и получаемое при этом содержание меди в штейне на массиве данных оперативного контроля.

Интервалы варьирования исходных переменных приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Таблица условий проведения полного факторного эксперимента

Величина	Расход металлсодержащих, т/ч	Расход флюсов, т/ч	Содержание кислорода в КВС, %	Расход технического кислорода, м ³ /ч
Обозначение параметров	x_1	x_2	x_3	x_4
Основной уровень	78,78	41,09	80,80	23576,11
Интервал варьирования	28,66	20,30	13,68	7282,43
Нижний уровень (-1)	50,12	20,79	94,48	16293,68
Верхний уровень (+1)	107,43	61,40	67,12	30858,54

Построенная таким образом матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

Последовательность нахождения опытов численного эксперимента удовлетворяет требованию рандомизации, то есть организации случайной последовательности опытов, по самому способу получения значений в строках матрицы.

Параллельные определения позволили оценить ошибку данного численного эксперимента s_3 , а также ошибку определения коэффициентов уравнения

$$s_b = \frac{s_3}{4} = 0,195.$$

Математической обработкой результатов матрицы планирования [3, 4, 6] получена зависимость концентрации меди в штейне от параметров загрузки и дутья печи Ванюкова:

$$Y = 61,77 + 2,58 \cdot x_1 + 0,23 \cdot x_2 - 1,52 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,39 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,57 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (1)$$

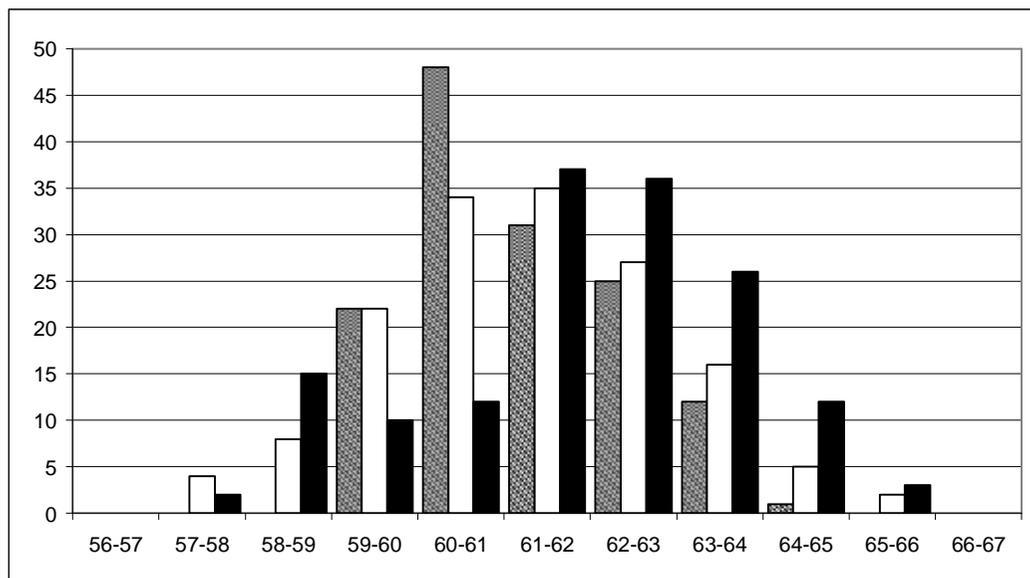
Здесь приведены только значимые коэффициенты полинома, величина которых выше s_b .

Полный факторный эксперимент типа 2⁴

Номер опыта	Факторы					Отклик	
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y	Y*
1	1	1	1	1	1	60,9	61,8
2	1	1	1	1	-1	64,6	-
3	1	1	1	-1	1	60,7	-
4	1	1	1	-1	-1	64,1	-
5	1	1	-1	1	1	64,1	64,1
6	1	1	-1	1	-1	59,6	-
7	1	1	-1	-1	1	61,2	-
8	1	1	-1	-1	-1	63,2	-
9	1	-1	1	1	1	61,7	61,2
10	1	-1	1	1	-1	60,0	-
11	1	-1	1	-1	1	63,7	61,8
12	1	-1	1	-1	-1	60,5	61,2
13	1	-1	-1	1	1	62,2	61,3
14	1	-1	-1	1	-1	60,4	60,1
15	1	-1	-1	-1	1	60,7	-
16	1	-1	-1	-1	-1	61,3	62,0

Y* – значение параллельного определения

Проверка адекватности расчетных значений по полиному (1) фактическим данным проводилась сравнением распределений (рис. 1).



Р

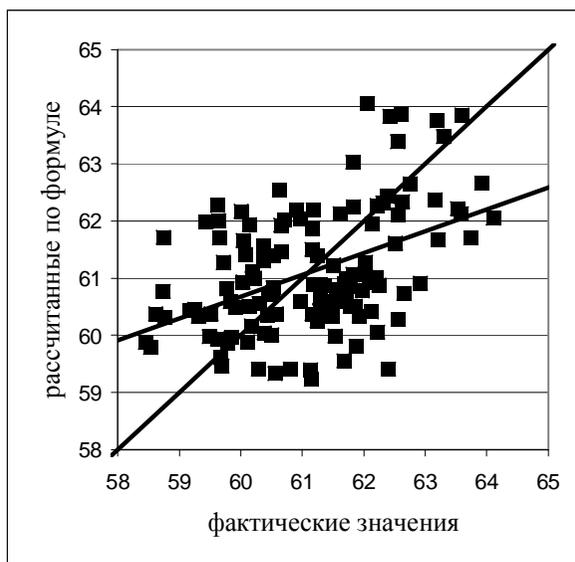
Р и с. 1. Гистограммы распределений концентрации меди в штейне:

▨ - рассчитанных по (1); □ - фактических; ■ - смоделированных по методу Монте-Карло

Сопоставление гистограмм распределений рассчитанных значений по уравнению (1) с практическими данными печи Ванюкова (рис. 1) показали высокую, в общем и среднем, степень их адекватности: дисперсии однородны, а арифметические средние различаются незначимо при доверительной вероятности 0,95.

Дополнительная проверка адекватности полинома (1) фактическим значениям концентрации меди в штейне осуществлена также сравнением расчётных и фактических значений (рис. 2).

Как показывает анализ рис. 2, степень согласия фактических и рассчитанных по (1) значений концентрации меди в штейне статистически значима (коэффициент корреляции $r = 0,454$). Однако отклонение линии тенденции зависимости от теоретической носит неслучайный характер, то есть наблюдается некоторая систематика. На основании данного исследования с высокой доверительной вероятностью можно утверждать, что полученное уравнение (1) адекватно описывает логику операторов при ведении процесса.



Р и с. 2. Фактические и рассчитанные по (1) значения концентрации меди в штейне

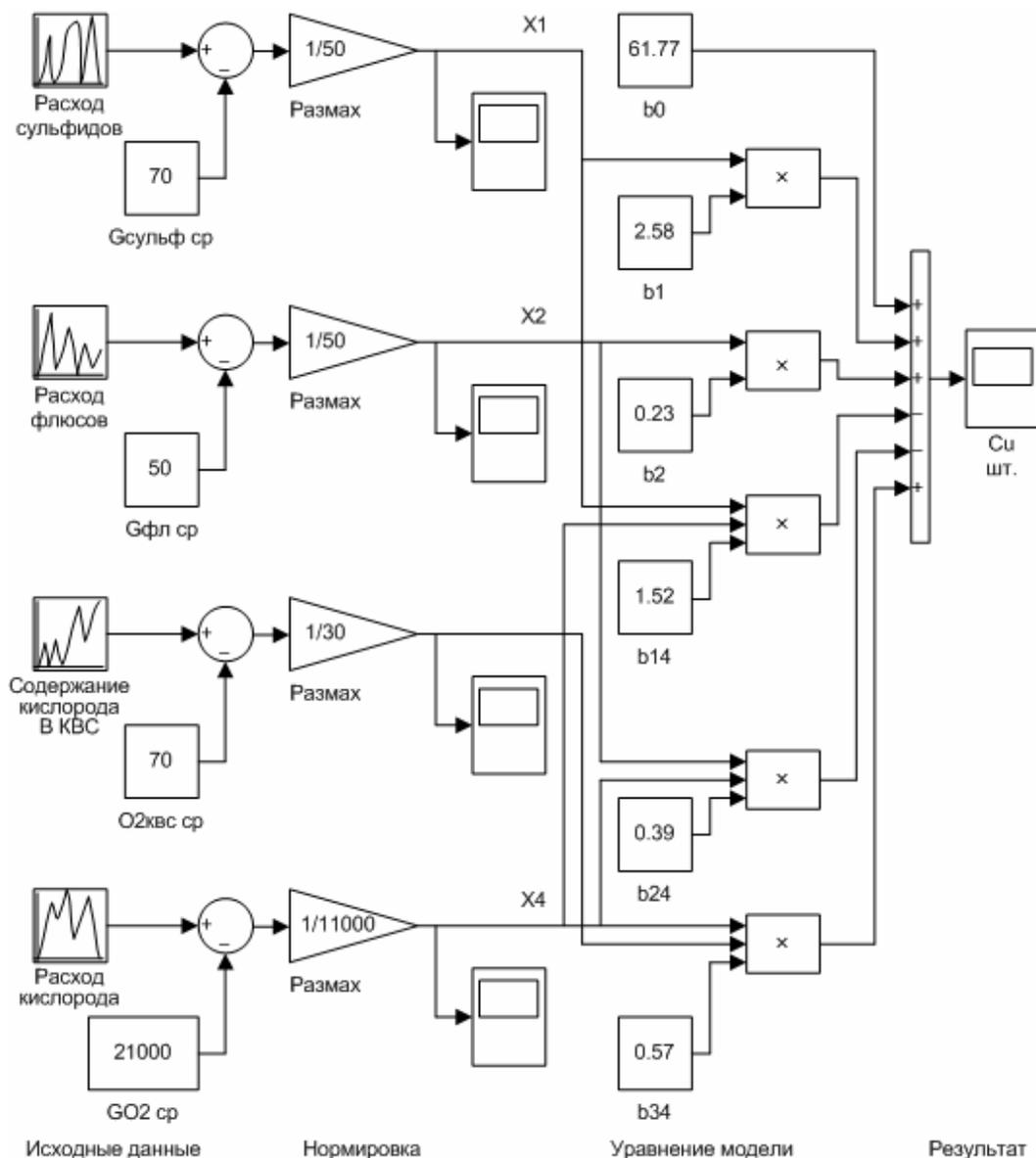
Таким образом, предложенная модификация метода теории планирования экспериментов в практике металлургических исследований демонстрирует целесообразность его применения с позиций снижения трудоемкости и экономических затрат при построении моделей на базе данных оперативного контроля.

2. Качество штейна как стохастический процесс

Для проверки гипотезы о качестве штейна как стохастическом процессе был использован универсальный метод статических испытаний – Монте-Карло [4]. Идея применения метода состоит в следующем: если рассчитанные по (1) значения содержания меди в штейне для случайных наборов значений независимых переменных в интервалах их варьирования дадут однородное с фактическим распределение, то процесс формирования качества штейна следует считать стохастическим. С произ-

водственной точки зрения это означает, что управляющие воздействия обслуживающего печь персонала на формирование требуемого качества штейна не носят сколько-нибудь целенаправленного характера.

Для реализации метода Монте-Карло в программной оболочке MatLab была построена модель (рис. 3), имитирующая работу формирования качества штейна в процессе Ванюкова по полиному (1).



Р и с. 3. Модель расчета методом Монте-Карло качества штейна по (1)

Процесс функционирования сложной системы имитируется на ЭВМ со всеми сопровождающими его случайностями. Для каждого сгенерированного набора значений переменных строилась одна реализация случайного процесса со случайным

ходом и исходом по (1). Получив множество таких реализаций и обработав их как единый статистический массив, получено представление о распределении стохастических условий формирования качества штейна. Таким образом, при применении метода Монте-Карло случайность используется как аппарат исследования.

Распределения концентрации меди в штейне для фактических, рассчитанных по (1) и найденных методом Монте-Карло приведены на рис. 1.

Основные статистические характеристики для всех трех распределений приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Статистические характеристики распределений

Вид оценки	Распределение I	Распределение II	Распределение III
	Фактические значения	Рассчитанные по (1) для фактических x_i	Стохастическое моделирование (Монте-Карло)
Среднее арифметическое	61,25	61,18	61,84
Дисперсия	2,6018	1,9824	3,2375
Среднее квадратическое отклонение	1,6130	1,408	1,7993
Коэффициент вариации, %	2,63	2,30	2,91
Диапазон изменения величины	57,18-65,37	59,11-64,06	57,81-65,95
Число степеней свободы	124	124	124

Оценку значимости различия дисперсий проводили с помощью критерия Фишера в виде $F_p = \frac{s_1^2}{s_2^2}$, $s_1^2 > s_2^2$.

Согласно принятой методике при $F_p > F_{таб}$, где $F_{таб}$ – табличное значение критерия Фишера для соответствующих степеней свободы дисперсий и выбранном уровне значимости, дисперсии следует считать неоднородными. В противном случае вывод противоположен.

Расчетные значения критерия для распределений I и II $F_p = \frac{2,6018}{1,9824} = 1,31$, а I и III $F_p = \frac{3,2375}{2,6018} = 1,24$. Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы числителя и знаменателя 124/124 равно $F_{таб} = 1,34$. Так как $F_p < F_{таб}$, то все дисперсии принадлежат одной и той же генеральной совокупности, то есть различаются незначительно.

Проведем оценку разности между средними арифметическими распределений I и III с помощью t-критерия Стьюдента. Для различия между средними значениями концентрации меди в штейне $61,84 - 61,25 = 0,59$ расчетное значение критерия Стьюдента $t = 14,7$, что существенно выше табличного $t_{таб} = 1,96$. Таким образом, различия средних значений статистически значимо с доверительной вероятностью

0,95 и это позволяет отвергнуть испытываемую гипотезу о стохастичности ведения процесса плавки.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что данные оперативного контроля служат неиссякаемым источником различных статистических гипотез, отражающих определенные тенденции производственной практики [1].

Во-первых, вполне состоятельной оказалась гипотеза поиска определенных наборов значений переменных и целевой функции по выборке достаточно большого объема, которая позволяет расширить область применения теории планирования экспериментов и на данные «пассивного эксперимента». Однако данный пример построения нелинейной функции отклика несет в себе принципиальные отличия полиномиального уравнения (1) от множественной регрессии, построенной на том же числом материале традиционными методами математической статистики. Самым важным в данном случае выступает искусственно созданная независимость переменных факторного пространства между собой, поскольку тогда и только тогда полиномиальное уравнение (1) следует считать моделью. Естественно, что при этом необходимо будет доказать адекватность уравнения (1) представляемому числовому материалу.

Во-вторых, несостоятельность гипотезы о качестве штейна как стохастическом процессе указывает на определенные целенаправленные усилия обслуживающего печь персонала на формирование качества штейна. В данном случае приписывать определенный знак разности между средними не имеет смысла, так как заранее его невозможно было прогнозировать [2]. Однако неприемлемые значения коэффициентов вариации указывают на необходимость сужать колеблемость качества выходного продукта, что особенно важно для последующих переделов металлургической технологии. При этом, поскольку критерий Фишера относится к количественным, однородность дисперсий со стохастическим числовым экспериментом свидетельствует не в пользу операторов-технологов: дисперсия фактических значений «обязана» быть существенно ниже дисперсии стохастического эксперимента, но слишком «агрессивное» ведение процесса за счет частого нерегламентированного вмешательства операторов-технологов и необходимость переработки специфичных видов шихтовых материалов [5] не позволяют удерживать содержание меди в штейне в необходимых пределах.

Полученную математическую модель проанализируем, кроме того, с точки зрения влияния переменных на показатель качества. Наличие большого численного значения линейного коэффициента при x_1 (расход металлосодержащих) свидетельствует о том, что по этой переменной до «почти стационарной области» еще достаточно далеко [3]. В то же время, существенно отличные от нуля парные взаимодействия служат показателем близости этой области по другим переменным. Здесь показательно поведение x_4 (расход технического кислорода) – разные знаки в парных взаимодействиях. На таком основании уместно сделать вывод о вполне достаточном количестве кислорода для достижения более высоких показателей качества при увеличении расхода металлосодержащих. Иными словами, налицо необходимость увязки информационных каналов по этим управляющим переменным.

Резюмируя, следует подчеркнуть возможность использования и самой методики и полученных результатов для повышения интеллектуализации АСУТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Спесивцев А.В.* Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.
2. *Спесивцев А.В.* Изучение пирометаллургических процессов статистическими методами: Учеб. пособие. – Норильск: Изд-во Красноярского ГУ, 1981.
3. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.
4. Методы исследований и организация экспериментов / Под ред. проф. К.П. Власова. – Изд-во «Гуманитарный центр», 2002.
5. *Салихов З.Г., Спесивцев А.В., Москвитин Д.А., Сириченко А.В., Зыков И.Е.* Количественная оценка качества управления металлургическим агрегатом // Цветные металлы. – 2002. – № 10. – С. 89-92.
6. *Ахназарова Л.С., Кафаров В.В.* Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1985.

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2008 г.

UDC 681.5:311; 004:311

FORMULATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR MATTE QUALITY IN PROCESSING SULPHIDE COPPER-BEARING MATERIALS IN THE VANYUKOV FURNACE

A.V. Spesivtzev¹, E.D. Kadyrov², N.V. Danilova², V.I. Lazarev³

¹ «Tehnolink»
Sankt-Petersburg, r. Fontanka, 103

² Sankt-Petersburg Mining Institute
Sankt-Petersburg, 21-st. Linie, 2

³ Cuprum plant, MMK «Norilski Nickel», Zapolyarny

The paper describes the process of mathematical model formulation for the Vanyukov furnace through complete factorial experiment. Dependences were analyzed between the copper content in matte and consumption of both materials loaded into the furnace and the oxygen-air mixture. Historical production data for the Vanyukov furnace were used to analyze the dependences.

Key words: *complete factorial, intelligence of automated control system, complex systems, stochastic process, random process, data analysis, Fisher criterion, Monte Carlo method*

A.V. Spesivtzev, Leading specialist of «Tehnolink», Candidate of Technical Sciences.

E.D. Kadyrov, Director of laboratory modern technologies PCS, Candidate of Technical Sciences.

N.V. Danilova, Postgraduate student

V.I. Lazarev, Director of Technical department