

На правах рукописи



Сафронов Антон Валерьевич

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СОГЛАСОВАНИЯ БАЛАНСОВ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО –  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕХНИКО-  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЭЦ**

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Щинников Павел Александрович**

Официальные оппоненты: **Огуречников Лев Александрович**  
доктор технических наук, Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО  
РАН, главный научный сотрудник

**Русских Евгений Евгеньевич**  
кандидат технических наук, ЗАО «Е4-  
СибКОТЭС», директор департамента  
проектирования

Ведущая организация: **«Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН», г. Иркутск.**

Защита диссертации состоится «20» декабря 2013 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «07» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Чичиндаев Александр Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Расчет технико-экономических показателей (ТЭП) является одной из основных задач эксплуатации ТЭЦ. В рамках этой задачи ведут разработку методов анализа и оценки показателей; обеспечивают работу информационно-измерительных и информационно-вычислительных систем (ИИС и ИВС); привлекают специализированные (при необходимости) и научные предприятия, а так же учебные заведения. В конечном счете, на основе ТЭП ведут тарифную политику и строят долгосрочные перспективы развития. Поэтому расчет ТЭП – актуальная задача для ТЭС. Однако, определение ТЭП возможно лишь с некоторой точностью. Эта точность зависит от методических погрешностей алгоритма расчета, погрешностей измерительной техники и методики измерений. Рациональный алгоритм расчета ТЭП позволяет снизить влияние первой группы погрешностей на точность конечного результата. Но даже при полном исключении погрешности этой группы фактическая погрешность вычисления ТЭП в рабочем диапазоне изменения параметров при использовании серийно выпускаемых приборов находится в пределах  $0,3 \div 0,6\%$  для КПД парогенератора,  $2,3 \div 3,0\%$  для показателей турбины и энергоблока в целом. Эти погрешности при измерениях параметров ведут к несходимости балансовых уравнений, и для реально функционирующих ТЭС величина этого дебаланса может достигать  $10 \div 20\%$  в зависимости от состава, состояния и степени автоматизации технологических процессов.

Погрешность расчета ТЭП при использовании информационно-вычислительных систем может быть снижена в результате ряда мероприятий. Одно из таких мероприятий – это повышение точности информации за счет применения метода согласования балансов, в рамках которого обеспечивается уточнение наиболее значимых для определения ТЭП показателей.

С другой стороны современные энергоблоки ТЭЦ, по сути, являются многоцелевыми. В этих условиях существует необходимость разнесения топливных затрат на виды продукции при определении ТЭП.

**Цель работы:** разработка методического подхода, математической модели, метода расчета и исследование связи отклонений термодинамических параметров с несходимостями балансовых уравнений энергоблоков для повышения эффективности информационно-измерительной системы и влияние несходимостей на расход топлива.

**Задачи исследования:**

1. Разработка методики уточнения основных расходно-термодинамических параметров работы ТЭЦ на основе согласования балансов для повышения эффективности информационно-измерительной системы при определении ТЭП ТЭЦ.

2. Разработка алгоритмов согласования параметров применительно к расчетам ТЭП ТЭЦ, с реализацией в программно-вычислительном комплексе.

3. Разработка методики определения показателей расходов топлива в условиях согласования балансов, встроенной в общую структуру программного комплекса.

4. Настройка программного комплекса на реально функционирующую ТЭЦ. Проведение всех видов расчетных экспериментов. Выработка рекомендаций по определению параметров, несходимостей балансов, экономии топлива.

5. Сравнение работы различных однотипных энергоблоков ТЭЦ в условиях согласования балансов при определении технико-экономических показателей.

6. Сравнение разработанных методик и программ с зарубежным опытом.

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ней впервые получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Методика уточнения основных расходно-термодинамических параметров работы ТЭЦ для повышения эффективности информационно-измерительной системы при определении ТЭП, которая заключается в согласовании материальных и энергетических балансовых уравнений с учетом многоцелевого назначения энергоблока.

2. Алгоритмы согласования параметров применительно к расчетам ТЭП ТЭЦ, реализованные в программно-вычислительном комплексе «CSPS».
3. Методика определения показателей расхода топлива в условиях согласования балансов реализована в программе «Computation System Power Station», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013614948 от 23.05.2013.
4. Программный комплекс «CSPS», настроенный на реально функционирующую ТЭЦ – Новосибирскую ТЭЦ-5. Рекомендации по определению параметров, несходимостей балансов, экономии топлива.
5. Сравнительный анализ работы различных однотипных энергоблоков ТЭЦ в условиях согласования балансов при определении технико-экономических показателей.
6. Анализ сравнения разработанной методики и программы «CSPS» с зарубежным опытом.

**Методы исследования:** методология системных исследований в энергетике, математическое и компьютерное моделирование ТЭС, методы эксергетического анализа, метод согласования балансовых уравнений, метод случайного направленного поиска.

**Практическая значимость работы.** Разработаны методика, методический подход, математическая модель, алгоритмы и программа расчета, которые позволяют проводить расчеты по уточнению основных расходно-термодинамических параметров работы станции. Полученные результаты расчетов могут служить информационной базой для аналитической оценки работы ТЭС и более точного расчета технико-экономических показателей станции.

**Личный вклад автора.** Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены автором.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на: международной научно-практической конференции «Современные научно-

технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (Саратов, 2012), шестой международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2013), международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (семнадцатые Бенардосовские чтения)» (Иваново, 2013); восьмой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2013» (Иваново, 2013), девятнадцатой международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ- 2013 (Томск, 2013), восемнадцатой международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ- 2012 (Томск, 2012), всероссийской конференции «Индустриальные информационные системы» ИИС-2013 (Новосибирск, Академгородок, 2013), всероссийской конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.» (НГТУ, Новосибирск, 2011), научных семинарах НГТУ (Новосибирск 2010-2013).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 научные статьи - в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, 1 – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 – в зарубежном журнале (Канада), 4 – в сборниках научных трудов, 5 – в сборниках трудов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основной текст изложен на 131 странице, содержит 48 рисунков, 15 таблиц.

**Достоверность полученных результатов и выводов** диссертационной работы обосновывается использованием известных законов термодинамики, энергетического метода анализа и апробированных методов эксергетического анализа. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы численными данными, решениями и проведенными

вычислительными экспериментами на моделях энергоблоков Новосибирской ТЭЦ-5 с использованием фактических показателей работы станции за год.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** аннотируются основные положения работы.

**В первой главе** приведен анализ состояния генерирующих мощностей России. Освещены вопросы оснащения ТЭС современными информационно-измерительными и информационно-вычислительными системами. Сформулированы цели и задачи исследования.

**Во второй главе** приводится описание методики уточнения расходно-термодинамических параметров (методики согласования балансов), которая является развитием подобных работ, проводимых в прежние годы Я. Шаргутом, Ю.В. Овчинниковым, Г.В. Ноздренко. Суть предлагаемой методики в следующем:

Априорно принимается, что все измеренные величины  $x_i$  в общем случае отличаются от их истинного значения  $x_i^*$ :

$$x_i \neq x_i^* \quad (1)$$

Разница между значениями величины – это погрешность измерения. Точно так же все неизвестные рассчитываемые величины, которые подлежат определению  $v_i$ , отличаются от фактических значений  $v_i^*$ :

$$v_i \neq v_i^* \quad (2)$$

Истинные значения измеряемых величин всегда складываются из значения измеренного и поправки к нему  $\varepsilon_i$ :

$$x_i^* = x_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

Аналогично и для рассчитываемых величин:

$$v_i^* = v_i + \delta_i \quad (4)$$

где  $\delta_i$  - поправка к рассчитанным величинам.

Подстановка измеренных и вычисленных величин в балансовые уравнения приводит к их незамыканию (дебалансу):

$$H_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_u, v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) = \omega_k \quad (5)$$

где  $k = 1 \dots r$  – порядковый номер балансового уравнения,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_u$  – измеренные величины,  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  – неизмеренные (рассчитанные) величины.

Подстановка в уравнения истинных значений величин дает соответственно нулевой дебаланс:

$$H_k(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_u^*, v_1^*, v_2^*, v_3^*, \dots, v_n^*) = 0 \quad (6)$$

Или запишем в другом виде:

$$H_k(x_1 + \varepsilon_1, x_2 + \varepsilon_2, x_3 + \varepsilon_3, \dots, x_u + \varepsilon_u, v_1 + \delta_1, v_2 + \delta_2, v_3 + \delta_3, \dots, v_n + \delta_n) = 0 \quad (7)$$

Становится очевидно, что для определения истинных значений измеряемых параметров необходимо найти поправки к уже измеренным величинам. Тогда математическая постановка задачи нахождения поправок к измеряемым и рассчитываемым величинам имеет вид:

$$\min_{x_u, v_n} H_k \quad (8)$$

Поправки  $\varepsilon$  и  $\delta$  определяются в предположении об их малости по сравнению с самой величиной путем разложения ее в ряд Тейлора и отбрасывания членов ряда высших порядков малости. Далее вводятся представление о нормальном законе распределения поправок и о наиболее вероятном их отклонении от истинного значения величин в соответствии с минимумом взвешенной суммы квадратов поправок. Окончательное решение имеет вид системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_{ki} \varepsilon_i + \sum_{j=1}^u b_{kj} \delta_j &= -\omega_k \\ m_i^{-2} \varepsilon_i &= \sum_{k=1}^r a_{ki} k_k \\ \sum_{k=1}^r b_{kj} k_k &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $i = 1 \dots n$  – порядковый номер измеряемой величины,  $k = 1 \dots r$  – порядковый номер балансового уравнения,  $j = 1 \dots u$  – порядковый номер



определяемой величины,  $a_{ki}, b_{kj}$  – производная уравнений  $k$  по измеряемой и определяемой неизвестной величине,  $\varepsilon_i, \delta_j$  – поправка к измеряемой и определяемой величинам,  $k_k$  – неопределенный коэффициент Лагранжа,  $m_i$  – среднеквадратичная абсолютная погрешность измерения.

**В третьей главе** показано, что число измеряемых параметров на ТЭС может достигать пяти тысяч. При этом они делятся на два типа: для оперативного контроля и для расчета ТЭП. Точность измерений обеих групп параметров регламентируется руководящими документами. Однако не все они равнозначны с точки зрения конечного результата расчета ТЭП. Особый интерес представляют такие параметры, изменение значений которых в максимальной степени влияет на конечный результат, под которым понимают эффективность работы энергоблока. Для повышения точности ИИС ТЭС в первую очередь следует уточнять эти параметры. На основании руководящих документов и ранее известных степеней влияния параметров на расход топлива к основным расходно-термодинамическим параметрам можно отнести: расходы, давления и температуры острого и вторичного пара, температуры питательной и охлаждающей воды, мощность на клеммах генератора, теплота сгорания топлива, расход и давление пара на производственный отбор, температура и содержание кислорода в уходящих газах, влажность топлива. А так же: тепловая нагрузка турбины и температура окружающего воздуха.

Нелинейный вектор-функции несходимости балансов  $F$  представлен в форме неравенств-равенств (функции энергетического, расходного и эксергетического балансов):

$$\begin{aligned}
 \sum_{k \in V(i)} (\eta \cdot M^X \cdot h)_{ki} - \sum_{j \in W(i)} (\eta \cdot M^Y \cdot h)_{ij} &\leq 0 \\
 \sum_{k \in V(i)} M_{ki}^X - \sum_{j \in W(i)} M_{ij}^Y &\leq 0 \\
 \sum_{k \in V(i)} E_{ki}^X - \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^Y \cdot \eta_i^{-1} &\leq 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

Здесь  $M, h$  – расход и энтальпия энергоносителя,  $\eta$  – коэффициент, учитывающий соответствующие потери энергии.

В целом расчетная схема опирается на эксергетическую методологию, является развитием работ, проводимых на кафедре ТЭС НГТУ в последние годы (Ноздренко Г.В., Щинников П.А., Григорьева О.К., Дворцовой А.И.) и представляет собой совокупность математических моделей элементов (групп элементов) реально функционирующего энергоблока со связями. Каждой технологической связи между элементами (группами элементов) энергоблока соответствует информационная связь между моделями. Расчетная схема энергоблока построена с учетом её агрегирования и с использованием метода декомпозиции (уменьшения размерности схемы). При этом группы одинаковых, параллельно работающих и равномерно загруженных элементов технологической схемы энергоблока (тягодутьевые и насосные установки, и др.), заменены на один элемент в расчетной схеме. В соответствии с методом декомпозиции в технологической схеме энергоблока выделено несколько функционирующих частей (подсистем), связи между которыми не многочисленны, рис. 1. Для каждой функционирующей части существует своя математическая модель. Модель функционирующей части и является тем элементом в полной модели энергоблока, который не подлежит дальнейшему делению. Все математические модели обеспечивают достаточно точное описание реальных процессов, как в рамках функционирующих частей, так и по информационным связям. Модели включают зависимости между входными и выходными расходно-термодинамическими параметрами, а также зависимости между этими параметрами и эксергетическими характеристиками элементов, проверку параметров по всем видам ограничений, проверку допустимости расчетных значений (неотрицательность расходов, энергетических и материальных потоков и т.д.). Все модели функционирующих частей согласованы между собой по входным параметрам (параметрам информационных связей). Собственно алгоритм отыскания согласованного значения параметра на примере температуры острого пара показан на рис. 2.

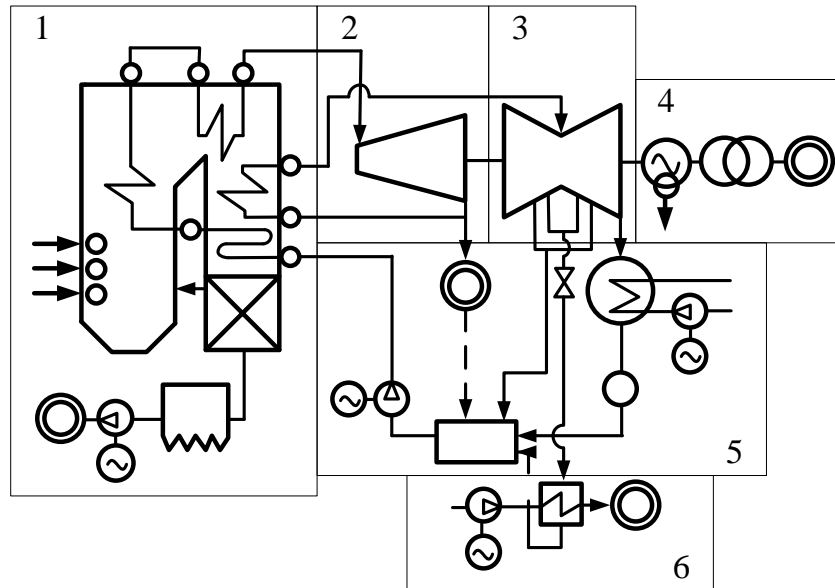


Рис. 1. Структурная схема ТЭЦ.

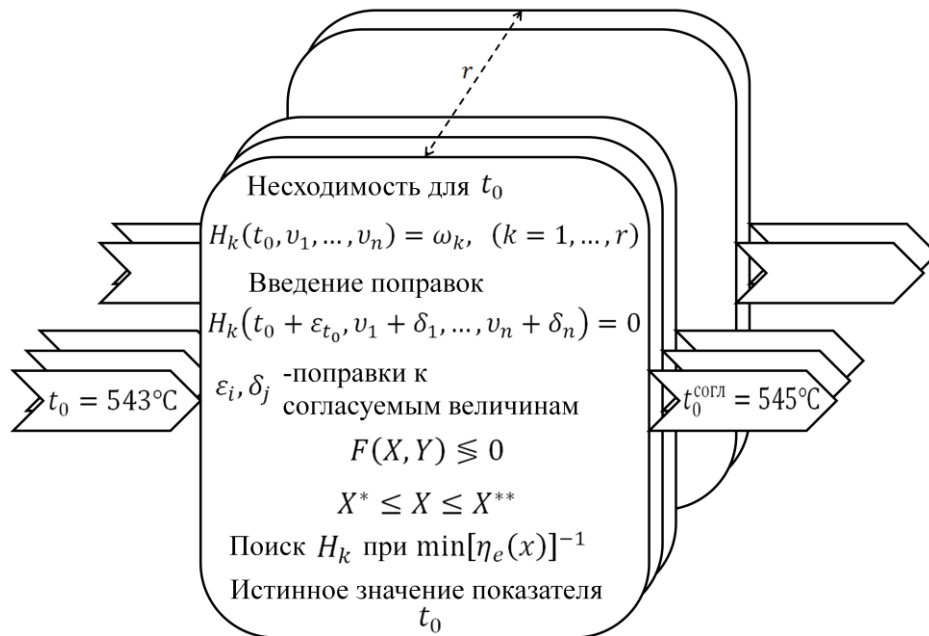


Рис. 2. Алгоритм определения согласованных значений параметров.

Функцией цели при согласовании балансов является интегральный эксергетический КПД блока:

$$\eta_e = \frac{\eta_{4N}N + \eta_{6T}E_T}{N + E_T} \quad (11)$$

где  $N, E_T$  – отпуск электроэнергии и теплоэксергии;  $\eta_{4N}, \eta_{6T}$  – эксергетические КПД по отпуску электроэнергии и теплоэксергии.

Оптимизатор представлен в вычислительном комплексе как:

$$\left\{ \min_{x \in R^n} [\eta_e(x)]^{-1} \mid [\overline{\varphi}_u(\omega) = 0, u \in U] \right\} \quad (12)$$

где  $\eta_e$  – эксергетический КПД энергоблока,  $\overline{\varphi_u}(\omega)$  – вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений,  $U$  – множество логико-числовых операторов,  $\omega = (x, G, R^n, L, \sigma)$  – информационная структура,  $L$  – множество логических управляющих параметров,  $G$  – множество внешних связей и исходных данных,  $\sigma$  – несходимость балансовых уравнений энергоблока,  $x$  – измеряемые параметры.

Условия протекания процессов, системные и физико-технические ограничения представлены в виде неравенств - равенств:

$$R^n = \{X, Y | H(X, Y) = 0, \quad F(X, Y) \geq 0, \quad X^* \leq X \leq X^{**}\} \quad (13)$$

где  $X^*, X^{**}$  – векторы наименьших и наибольших значений уточняемых параметров,  $F$  – нелинейные вектор-функции несходимости балансов.

Размерность пространства  $n$  обусловлена количеством уточняемых параметров, которое может меняться в зависимости от степени детализации исследуемого энергоблока.

Повышение точности информационного обеспечения ведется с учетом разделения показателей полной несходимости на группы:

Несходимость энергобаланса по котлоагрегату определяется как:

$$\sigma_K = \left[ \left( E_0 - \frac{Q_1}{\eta_K} \right) / E_0 \right] \cdot 100 \quad (14)$$

где  $Q_1$  – полезно использованная теплоэнергия,  $E_0$  – химическая энергия сжигаемого топлива,  $\eta_K$  – энергетический КПД котла, установленный заводом-изготовителем и уточненный при наладке.

Несходимость энергобаланса по турбоагрегату рассчитывается следующим образом:

$$\sigma_T = \frac{-N_G + (N_R + N_T + N_K)}{N_G} \cdot 100 \quad (15)$$

где  $N_T$  – мощность на клеммах генератора, вырабатываемая паром до теплофикационного отбора;  $N_R$  – мощность, вырабатываемая паром до регенеративного отбора;  $N_K$  – мощность, вырабатываемая в хвостовой части.

В четвертой главе приведены результаты расчетных экспериментов по согласованию балансов для стандартного ряда теплофикационных и конденсационных турбин.

В целом для представленных в исходных данных энергоблоков несходимость балансов по «котлу» составляет  $4\div 5\%$ , а по «турбине» –  $0,5\div 3\%$ , рис. 3. При этом меньшее значение соответствует энергоблокам ТЭЦ вне зависимости от ее структуры (блочная или с поперечными связями).

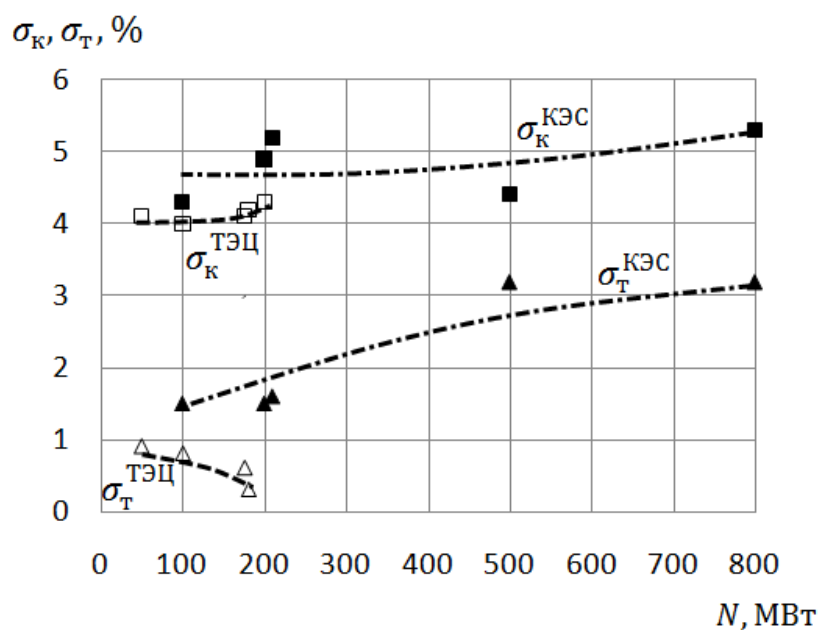


Рис. 3. Несходимость балансовых уравнений с разделением показателей информационного обеспечения на две группы «котел» ( $\sigma_k$ ) и «турбина» ( $\sigma_t$ ) в зависимости от установленной мощности.

В свою очередь, уточнение параметров функционирования обуславливает экономию топлива на ТЭС, которая для широкого спектра энергоблоков разных типов показана на рис. 4. и в относительных единицах измерений на рис. 5.

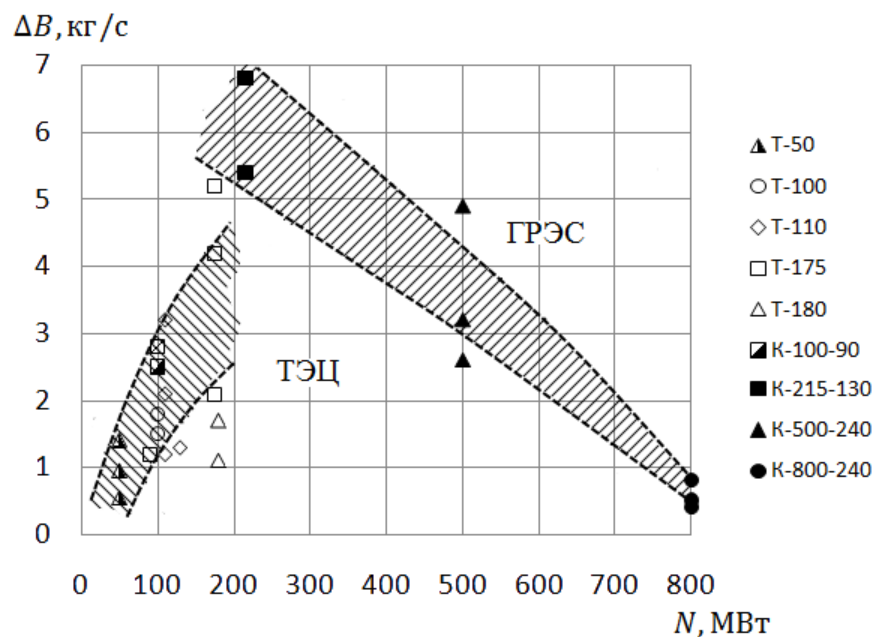


Рис. 4. Экономия топлива на энергоблоках ТЭС.

Экономия топлива может достигать 10÷15%, рис. 5, для блоков небольших единичных мощностей (до 100 МВт).

На этих рисунках показан фактически неиспользованный в реальном процессе расход топлива, но учтенный показаниями приборов ТЭС.

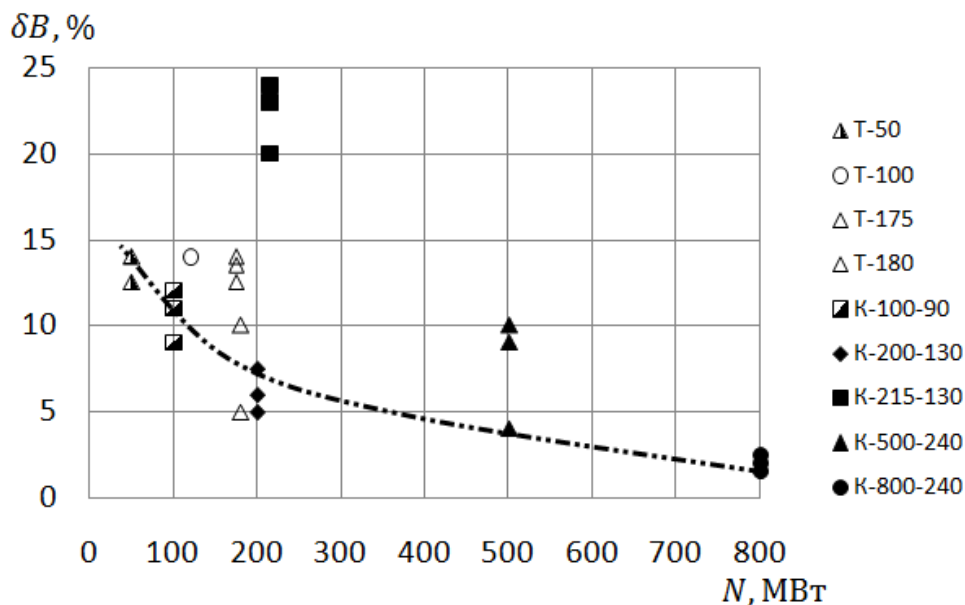


Рис. 5. Относительная экономия топлива на энергоблоках ТЭС.

Важно отметить, что небольшая относительная экономия топлива для мощных блоков (0,5÷2% для блоков 800 МВт, рис. 5) при высокой установленной мощности обеспечивают годовую экономию топлива до 36 тысяч тонн в год.

В пятой главе выполнены расчеты по согласованию балансовых уравнений на шести энергоблоках Новосибирской ТЭЦ–5. Для примера в табл.1 приведены результаты согласования энергобалансов энергоблока для одного из январских режимов работы.

Таблица 1

Пример согласования энергобалансов энергоблока ст.№1 НТЭЦ-5

Наименование параметров, размерность	Значение (до согласования)	Значение (после согласования)
Расход пара на турбину, кг/с	186,4	164,5
Начальное давление пара, МПа	12,5	12,43
Начальная температура пара, °С	543	545
Температура питательной воды, °С	248	248
Расход пара промперегрева, кг/с	155,5	157,8
Коэффициент теплофикации	0,48	0,51
Мощность на клеммах генератора, МВт	175,8	176,7
Низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг	21,16	21,07
Расход технологического пара, кг/с	0	0
Давление технологического пара, МПа	0	0
Температура уходящих из котла газов, °С	159	161
Количество кислорода в уходящих газах, %	3,2	3,3
Влага топлива (по рабочей массе), %	14	14
Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора, °С	25,6	25,1
Расход топлива, кг/с	22,82	23,25
Химическая энергия топлива, МВт	489,8	482,7
Полезно используемая теплоэнергия, МВт	532,6	478,0
КПД котла по обратному балансу	0,958	0,958
Несходимость энергобаланса по котлу, SIGMA_K, %	-13,5	-3,3
Отпуск теплоэнергии на теплофикацию, МВт	261	261
Выработка электроэнергии, МВт, на паре: теплофикационного отбора, TN	123,2	124,2
регенеративных отборов, RN	29,8	29,8
конденсационного потока, KN	58,4	26,1
Несходимость энергобаланса по турбине, SIGMA_T, %	+20,2	+1,9

Из этих данных видно, что согласование энергобалансов позволяет существенно уточнить расходно-термодинамические и технические параметры функционирующего энергоблока. Например, несходимость по энергоблоку в этом случае составляет 20,2%. После согласования балансов удается снизить эту цифру до значения в 1,9%. Расход топлива увеличился на 1,85% по сравнению с исходным значением и составил 23,25 кг/с.

Кроме согласования балансовых уравнений произведен сравнительный анализ различных блоков, рис. 6. Новосибирская ТЭЦ-5 представляет интерес в рамках исследовательской работы тем, что на станции установлено одинаковое оборудование (Т-180/210, ТПЕ-214), работающее на одном виде топлива (Кузнецкий ГД), но управляемое различными программно-техническими комплексами («АКЭСР» и «МС-Торнадо»). «АКЭСР» является аналоговой системой разработанной в середине 70-х годов и реализующей только ПИ-законы регулирования. «МС-Торнадо» выполнена на современной микропроцессорной технике и реализует не только ПИ-, но и ПИД-законы регулирования.

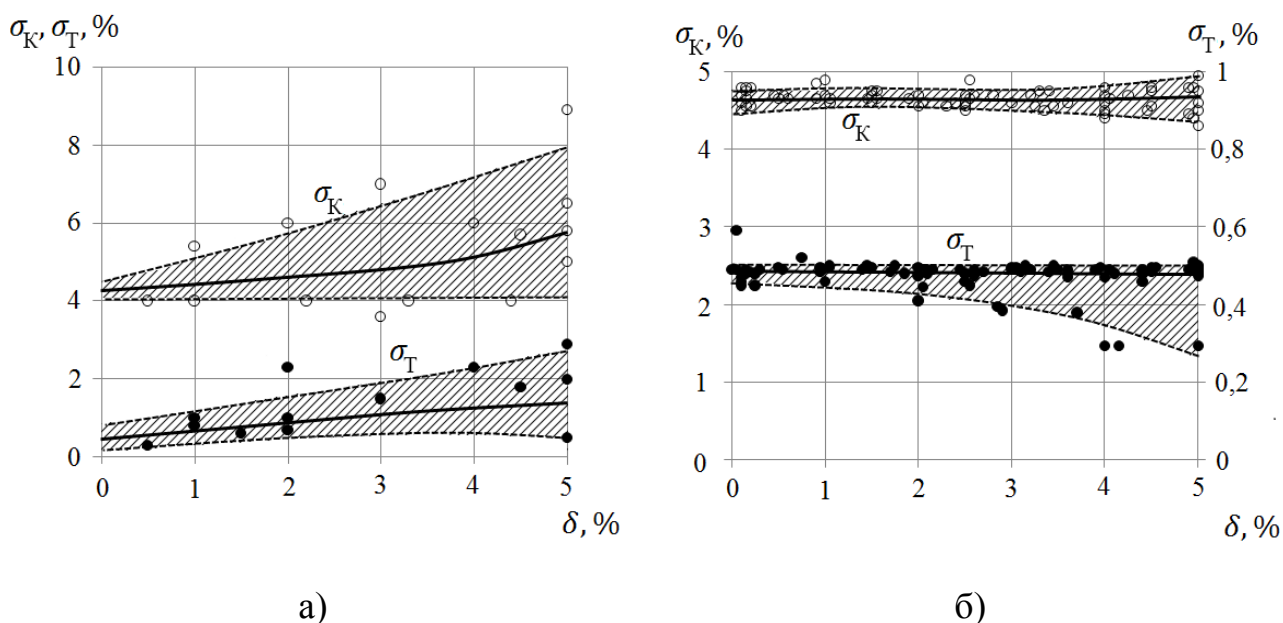


Рис. 6. Показатели несходимости для энергоблоков Новосибирской ТЭЦ-5 ст.№1 (а) и ст.№2 (б):  $\sigma_K$  – несходимость, обусловленная работой котлоагрегата;  $\sigma_T$  – несходимость, обусловленная работой турбоагрегата.



Несходимости  $\sigma_T$  и  $\sigma_K$ , рис. 6, ведут себя по разному для указанных энергоблоков. Здесь показаны несходимости в зависимости от величины отклонений каждого из важных с термодинамической точки зрения параметров. Отклонение параметров на 5% обусловлено нормативными документами, регулирующими работу энергоблока. Можно видеть, что несходимость по котлу в обоих случаях заметно выше (в 5÷10 раз) несходимости по турбине и составляет 4,5...5,5%.

Однако наиболее интересны следующие результаты: снижение  $\sigma_T$  на блоке ст.№6 (в  $\approx 2$  раза) по сравнению с блоком ст.№1; снижение дисперсии по  $\sigma_T$  от 150% до 40% (в  $\approx 4$  раза), а по  $\sigma_K$  – от 30% до 10% (в  $\approx 3$  раза) у блока ст.№6; отсутствие роста несходимости при увеличении отклонения параметров у блока ст.№6. По всей видимости, такие показатели у блока ст.№6 связаны с более современной системой АСУ ТП, в рамках которой каждая автоматическая система регулирования наилучшим образом, по сравнению с блоком ст.№1, удерживает параметр в заданном уставками диапазоне.

На рис. 7 показана экономия топлива по каждому из исследуемых энергоблоков за год. Резкие пики и провалы связаны с выводом оборудования в регламентные ремонтные работы.

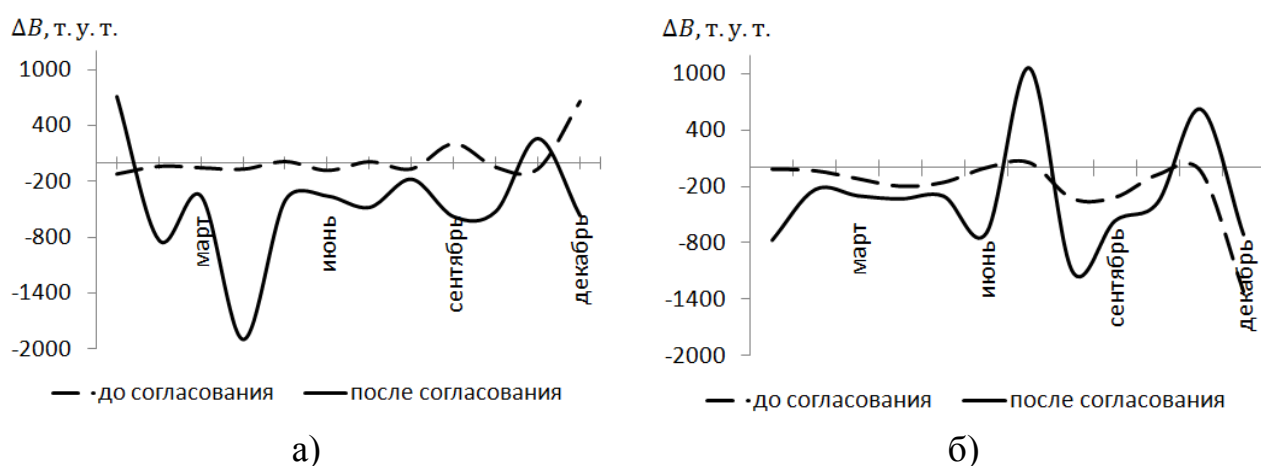


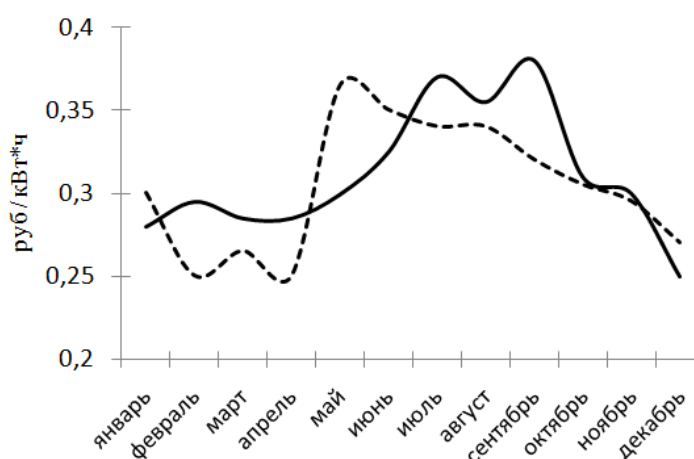
Рис. 7. Экономия топлива до и после согласования балансов: знак «-» означает экономию, а «+» - перерасход: а) ст.№1; б) ст.№6.

Несмотря на то, что график нагрузок для этих энергоблоков разный, можно видеть, рис. 7, что реальная согласованная экономия топлива заметно

отличается от фактической и существенно выше последней в обоих случаях. То есть станция работает более эффективно в годовом разрезе, чем принято считать службами ПТО. Эффект после согласования балансов по блоку ст.№1 составляет 5,1 тыс. т.у.т. в год, а по блоку ст.№6 – 3,6 тыс. т.у.т. в год. При этом фактически на ТЭЦ зарегистрирован перерасход на блоке ст.№1 в 0,3 тыс. т.у.т., а на блоке ст.№6 экономия в 2,5 тыс. т.у.т.

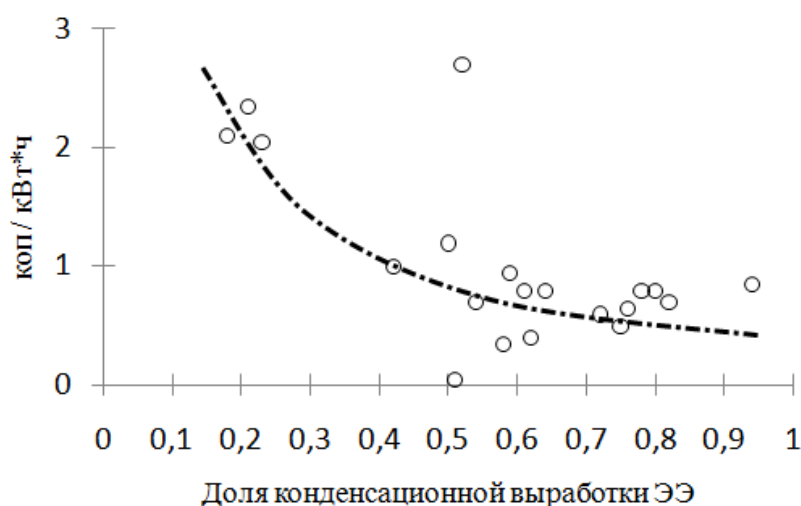
В стоимостном выражении экономия топлива (при цене 1050 руб./т.у.т.) составляет до 5 млн.руб./год для первого и около 3,5 млн.руб./год (вместо  $\approx$  2,5 млн.руб. по фактическим показателям работы блока) для шестого энергоблока.

Работа энергоблоков по электрическому графику нагрузок обуславливает долю топливной составляющей в себестоимости продукции в летние месяцы на 25...40% выше, чем в зимние, рис. 8.



*Рис. 8. Доля топливной составляющей в себестоимости электрической энергии.*

С другой стороны работа ТЭЦ по тепловому графику сопряжена с отпуском так называемой «привязанной» электроэнергии, которая не участвует в свободной продаже на ФОРЭМе. В этом случае, при отнесении всей экономии топлива на конденсационную выработку можно обеспечить снижение стоимости именно той электроэнергии, которая свободно продается. Фактически станция недополучает доход при реализации на ФОРЭМ электроэнергии, а величина этого дохода зависит от режима загрузки оборудования, рис. 9.



*Рис. 9. Относительный (удельный) недополученный доход при реализации на ФОРЭМ конденсационной мощности для блока Т-180.*

Как видно из рис. 9, исследуемая ТЭЦ недополучает от 0,5 до 3 копеек за каждый кВт·ч электроэнергии, выработанной по конденсационному циклу.

Проведен сравнительный анализ с системой уточнения основных параметров работы ТЭС, разработанной компанией «ВТВ Jansky GmbH», и получившей название «ВТВ Power Plus». Эта система разработана в Германии и внедрена на ряде станций, в том числе на одном блоке в России. Метод немецкой компании основан на анализе измеренных значений показателей и на термодинамическом моделировании. Авторы немецкой системы заявляют о гарантированном повышении КПД пылеугольного энергоблока на 0,3% при ее внедрении, в некоторых случаях возможно увеличение КПД до 1%. После анализа был сделан вывод – результаты сопоставимы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана методика уточнения основных расходно-термодинамических параметров работы ТЭЦ для повышения эффективности информационно-измерительной системы при определении ТЭП, которая заключается в согласовании материальных и энергетических балансовых уравнений с учетом многоцелевого назначения энергоблока.
2. Разработаны алгоритмы согласования параметров применительно к расчетам ТЭП ТЭЦ, с реализацией в программно-вычислительном

комплексе «CSPS». Выделены основные влияющие на расчет ТЭП показатели ТЭЦ. Разделены интегральные несходимости балансовых уравнений на несходимости по «котлу» ( $\sigma_K$ ) и «турбине» ( $\sigma_T$ ).

3. Показано, что несходимость энергобалансов для широкого ряда энергоблоков единичных мощностей от 50 до 800 МВт составляет по «котлу»  $4 \div 5\%$ , а по «турбине» –  $0,5 \div 3,0\%$ , при этом меньшие значения соответствуют энергоблокам ТЭЦ.
4. Показано, что отклонение параметров в 5% ведет к росту несходимости балансовых уравнений по меньшей мере на 30%, применение метода согласования балансов позволяет снизить несходимость балансовых уравнений с  $\approx 20$  до 2% (в  $\approx 10$  раз).
5. Показано, что для энергоблоков, оснащенных современными системами АСУ ТП, несходимость по группе показателей «котел» снижается в  $\approx 3$  раза, а по группе показателей «турбина» в  $\approx 4$  раза по сравнению с обычными энергоблоками.
6. Показано, что повышение точности информационного обеспечения энергоблоков ТЭС за счет применения метода согласования энергобалансов позволяет обеспечить годовую экономию топлива до  $\approx 5$  тыс. т.у.т. для энергоблока на базе турбины Т-180, что в денежном эквиваленте составляет  $\approx 5$  млн.руб. при цене топлива на уровне 1050 руб./т.у.т.
7. Относительный недополученный доход от реализации конденсационной мощности для блоков Т-180 составляет 0,5-3 коп./кВт·ч. в зависимости от режима (доли конденсационной выработки).

**Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

*Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК*

1. Щинников П.А. Согласование материальных и энергетических балансов / П.А. Щинников [и др.] // Доклады ТУСУРа. Томск: Изд-во ТУСУРа, 2012. - № 1 (25), ч. 1. - С. 216-220.

2. Щинников П.А. Критерий эффективности при эксергетической оптимизации функционирования энергопреобразования/ П.А. Щинников [и др.] // Доклады ТУСУРа. Томск: Изд-во ТУСУРа, 2012. - № 1 (25), ч. 1. - С. 208-211.

*Свидетельства о регистрации программ*

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013614948. Computation System Power Station / П.А. Щинников, А.И. Дворцовой, А.В. Сафронов. – 23.05.2013. – М.: Роспатент, 2013. - С.1.

*Публикации в зарубежных журналах*

4. Improving the efficiency of fuel usage in new coal technologies / P.A. Shchinnikov [and oth.] // Mechanical engineering research. Canada: Canadian center of science and education. - 2011. - Vol. 1. - P. 79–91. [Повышение эффективности топливоиспользования в новых угольных технологиях].

*Публикации в журналах и сборниках трудов*

5. Новиков С.И., Сафронов А.В. К вопросу об оценке эффективности внедрения систем регулирования температуры перегретого пара // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. - Вып. 16. - С. 156–162.
6. Щинников П.А. Уточнение параметров ТЭС на основе согласования энергобалансов / П. А. Щинников [и др.] // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. - Вып. 17. - С. 80–86.
7. Щинников П.А. Распределение нагрузки на ТЭЦ эксергетическим методом / П. А. Щинников [и др.] // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. - Вып. 17. - С. 101–105.
8. Щинников П.А. О повышении эффективности топливоиспользования на ТЭС с применением современных средств автоматизации и управления / П.А. Щинников, А.И. Галанова, А.В. Сафронов // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. - Вып. 17. - С. 117–125.

9. Щинников П.А., Сафронов А.В. О согласовании энергобалансов при определении параметров ТЭС // Проблемы теплоэнергетики: сб. науч. трудов. Саратов: Изд-во Саратовского гос. тех. ун-та, 2012. - Вып. 2. - С.84-89.
10. Сафронов А.В., Щинников П.А. Повышение эффективности энергоблока за счет применения информационно-измерительных систем // «Бенардосовские чтения» Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы международной научно-технической конференции. Иваново: Изд-во «ПресСто», 2013. - Т. 2. - С. 123–125.
11. Сафронов А.В., Щинников П.А. О точности вычисления ТЭП ТЭС // «Энергия-2013». Теплоэнергетика: материалы восьмой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в семи томах. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2013. - Т. 1, ч. 1. - С. 66–69.
12. Сафронов А.В., Щинников П.А. Применение метода согласования балансов для повышения эффективности информационно-измерительной системы при определении ТЭП ТЭЦ // Современные техника и технологии: сборник трудов восемнадцатой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в трех томах. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. - Т. 3. - С. 237–238.
13. Сафронов А.В., Щинников П.А. Повышение эффективности энергоблока за счет применение метода согласования балансов в информационно-измерительной системе // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в шести частях. Часть 2. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. - С.176–179.

Отпечатано в типографии Новосибирска  
Государственного технического университета  
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ 1423. Подписано в печать 07.11.2013 г.