

УДК 621.311.22

## Перевод энергоблока мощностью 300 МВт с котлом ПК-41 в блок повышенной эффективности

Мошкарин А.В., д-р техн. наук, Шельгин Б.Л., канд. техн. наук, Мельников А.В., Базеев Н.В., инженеры

Показана возможность повышения экономической эффективности газомазутного энергоблока мощностью 300 МВт Конаковской ГРЭС путем байпасирования ПВД с нагревом части питательной воды в турбинном экономайзере котла ПК-41. Установлены оптимальные значения доли байпасирования ПВД и требуемой поверхности теплообменника.

*Ключевые слова:* энергоблок, доля байпасирования ПВД, турбинный водяной экономайзер, повышение КПД блока, дополнительная электрическая мощность.

## Shift 300 mW Power Unit with PK-41 Steam Boiler into High Efficient Power Unit

A.V. Moshkarin, Doctor of Engineering, B.L. Shelygin, Candidate of Engineering, A.B. Melnikov, N.V. Bazeev, Engineers

The article shows the opportunity of increasing economic efficiency of 300 mW power unit at Konakovskay GRES by means of PVD bypassing with heating the part of feed water in turbine water economizer of steam boiler PK-41. The optimal values of PVD bypassing and required surface of heat exchanger are calculated.

*Key words:* power unit, PVD bypassing part, turbine water economizer, increasing power unit coefficient of efficiency, additional electrical power.

К началу XXI в. показатели работы российских энергоблоков, введенных в строй в 70–80-е годы, стали не соответствовать современному техническому уровню, их КПД не превышает 38–39 % [1].

Ограниченность финансовых средств до 2014 г. и возможностей ввода более совершенных энергоустановок требует поиска путей продления ресурса действующих блоков на основе их модернизации.

Одним из быстрореализуемых путей модернизации оборудования является создание блоков повышенной эффективности (БПЭ). Идея создания БПЭ состоит в размещении в тракте дымовых газов специального теплообменника для охлаждения дымовых газов частью потока питательной воды системы регенерации турбины. Таким теплообменником может являться турбинный экономайзер (ТуЭК) [2], включенный в байпас регенерации турбины.

Реализация БПЭ позволяет увеличить мощность блока на 4–8 % и снизить удельный расход топлива на 0,5–2 %.

Расчетное исследование возможностей модернизации блоков 300 МВт Конаковской ГРЭС выполнено на основе сопоставления двух вариантов схем нагрева питательной воды (рис. 1):

- вариант 1 – существующая схема [3] (рис. 1,а);
- вариант 2 – схема байпасирования ПВД при параллельном нагреве части питательной воды в дополнительно установленном турбинном экономайзере (ТуЭК) (рис. 1,б).

Основными задачами исследования являлись определение показателей тепловой экономичности блока, оптимальной величины байпа-

сирования и возможностей достижения требуемых выходных параметров за котлом ПК-41.

Расчеты тепловой схемы турбоустановки К-300-23,5 выполнены с помощью программного комплекса «Моделирование и расчет тепловых схем ТЭС и АЭС» [4]. Исходные данные для базового варианта схемы (байпасирование ПВД отсутствует) принимались по результатам испытаний турбины К-300-23,5 Конаковской ГРЭС, работающей на скользких параметрах пара.

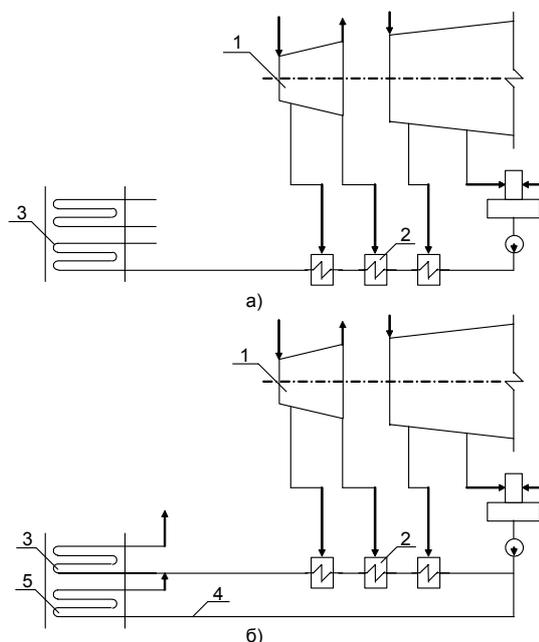


Рис. 1. Варианты схем нагрева питательной воды в энергоустановке: 1 – паровая турбина; 2 – подогреватели высокого давления; 3 – водяной экономайзер парового котла; 4 – линия байпаса ПВД; 5 – турбинный экономайзер

Для номинальной паропроизводительности котла ПК-41 исследованы четыре режима с

долей байпаса по питательной воде 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. Результаты расчетов тепловых схем в дальнейшем были использованы для вариантных расчетов котла при различных режимах. Тепловой расчет парового котла ПК-41 выполнялся по программе «ТРАКТ» [5, 6] применительно к одному корпусу.

Для проведения сравнительного анализа с использованием программы «ТРАКТ» была специально разработана расчетная модель котла ПК-41, содержащая 5 рабочих трактов (рис. 2–5).

Каждый тракт представляет собой последовательно соединенные элементы газодов и поверхностей нагрева.

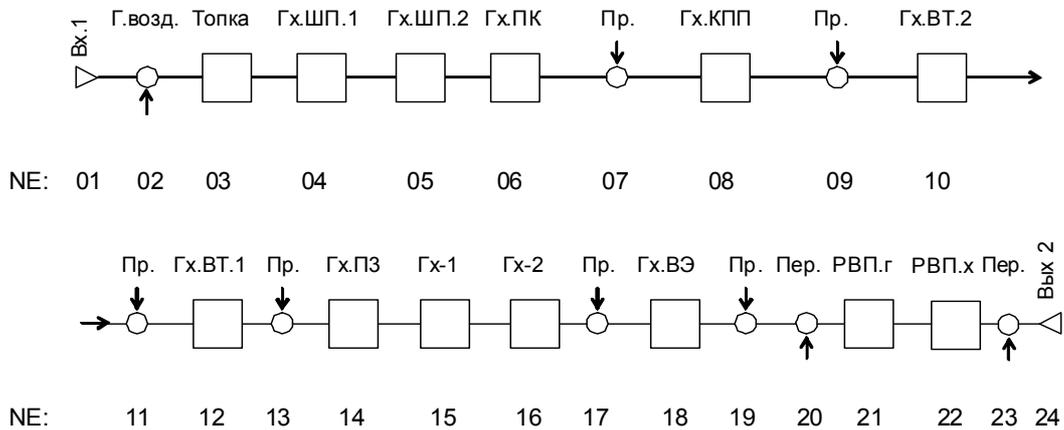


Рис. 2. Расчетная схема газового тракта котла ПК-41

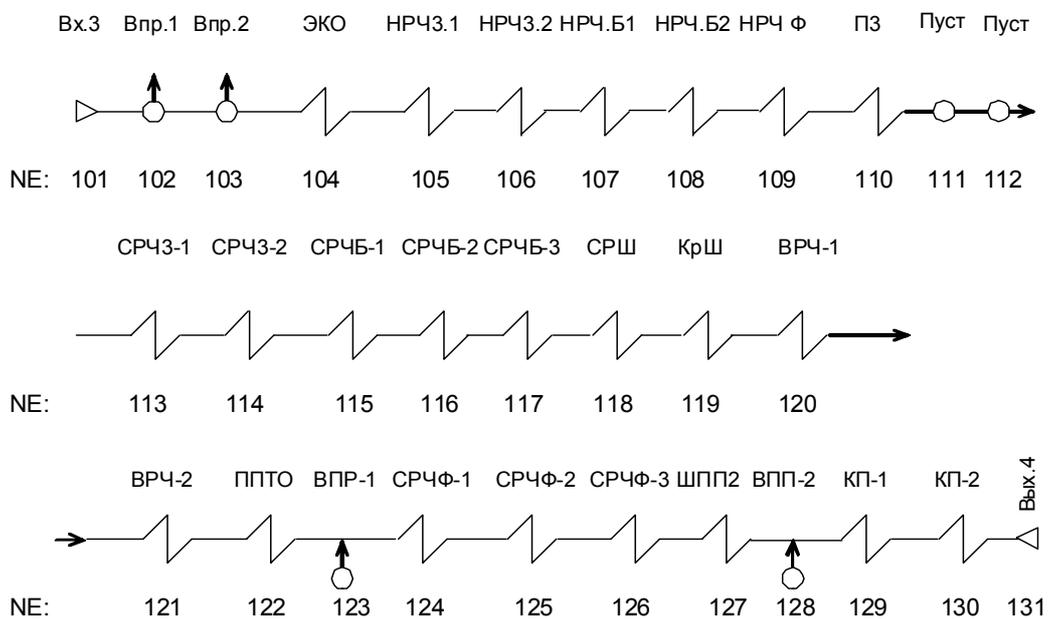


Рис. 3. Расчетная схема водопарового тракта котла ПК-41

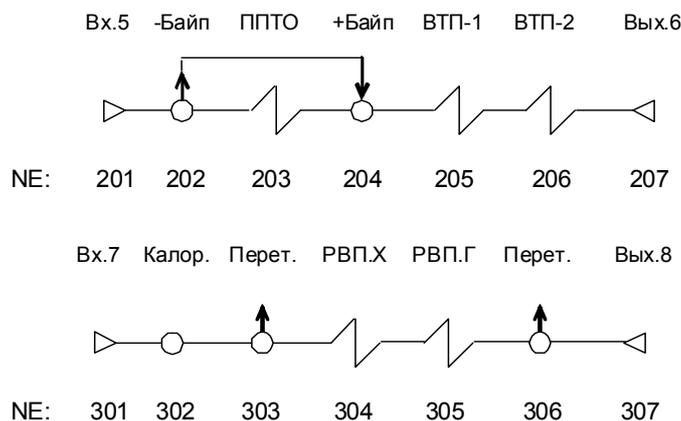


Рис. 4. Расчетные схемы трактов вторичного пара и нагрева воздуха применительно к котлу ПК-41

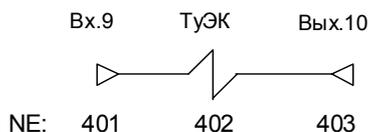


Рис. 5. Расчетная схема тракта воды, поступающей в ТуЭК из байпаса ПВД

В расчетном анализе в качестве топлива принят природный газ с теплотой сгорания  $8200 \text{ ккал/м}^3$  [7]. Средняя температура наружного воздуха –  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура воздуха перед РВП (за калорифером) –  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коэффициент избытка воздуха на выходе из топочной камеры принят  $\alpha_t'' = 1,04$ , а в уходящих газах –  $1,35$ . Потери теплоты от неполноты сгорания топлива и от наружного охлаждения котла приняты соответственно  $q_3 = 0,1 \%$  и  $q_5 = 0,7 \%$ .

Исследование проводилось при номинальной электрической нагрузке блока и изменении доли байпасирования ПВД:

$$d_b = D_b / D_{п.в.},$$

где  $D_b$  – расход части потока питательной воды через линию байпаса ПВД, кг/с;  $D_{п.в.}$  – расход питательной воды в ЭКО парового котла, кг/с.

Значения температур перегретого пара высокого (ВД) и низкого (НД) давлений поддерживались в пределах  $544\text{--}545 \text{ }^\circ\text{C}$ . Величина поверхности нагрева ТуЭК изменялась от 0 до  $6400 \text{ м}^2$ , чтобы для принятой  $d_b$  температура воды за ТуЭК была равна температуре пи-

тательной воды за последним ПВД. Остальные необходимые исходные характеристики приняты на основании [5–7].

Исходные данные для расчета котла ПК-41 представлены в табл. 1.

При неизменной температуре воды перед ПВД и ТуЭК ( $168,51 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с увеличением доли байпасирования температура питательной воды изменялась несущественно ( $271\text{--}271,07 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Расход воды в байпас изменялся от 0 до  $49,3 \text{ кг/с}$  с одновременным снижением расхода питательной воды через ПВД от  $244,23$  до  $194,9 \text{ кг/с}$ .

Результаты расчета котла ПК-41 показали, что для обеспечения равенства температур  $t_{\text{ТуЭК}}'' = t_{\text{ПВД}}'' = 271 \text{ }^\circ\text{C}$  поверхность нагрева ТуЭК возрастает, достигая  $6400 \text{ м}^2$  при  $d_b = 0,4$  (рис. 6). С увеличением доли байпасирования  $d_b$  в пределах  $0,1\text{--}0,4$  удельная поверхность нагрева ТуЭК изменяется в пределах  $80\text{--}116 \text{ м}^2\cdot\text{с/кг}$ , а его поверхность составляет  $0,4\text{--}2,5$  от поверхности основного ЭКО.

Таблица 1. Исходные данные для теплового расчета котла ПК-41 при номинальной паропроизводительности и изменении доли байпасирования ПВД

Наименование величин	Доля байпасирования $d_b$				
	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Расход питательной воды, кг/с			244,23		
Расход воды через турбинный ЭКО, кг/с	0	12,3	24,6	37,03	49,3
Давление перегретого пара, МПа			24,9		
Температура воды: за ПВД, $^\circ\text{C}$	271,07	271,03	271	271	271
перед турбинным ЭКО, $^\circ\text{C}$			168,5		
Давление питательной воды перед ПВД, МПа			31,6		
Расход воды через ПВД, кг/с	244,23	231,9	219,6	206,47	194,9
Расход пара в промежуточный пароперегреватель, кг/с	204,14	208,18	212,3	216,37	220,26
Давление пара перед промежуточным перегревателем, МПа	3,87	3,9	3,924	3,972	3,998
Температура пара перед промежуточным пароперегревателем, $^\circ\text{C}$	277,5	278,4	279,14	280,6	281,38

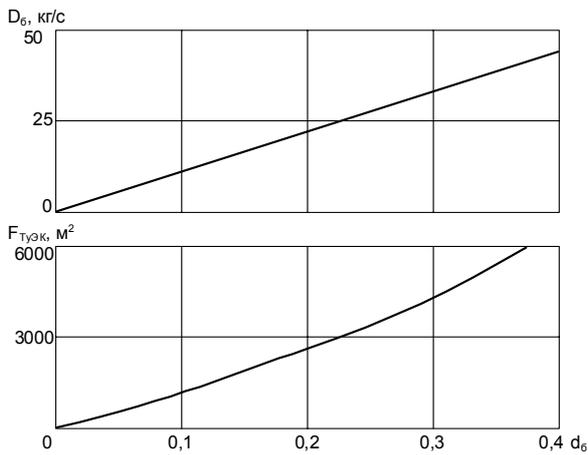


Рис. 6. Зависимость поверхности нагрева турбинного экономайзера и расхода воды через него от доли байпасирования ПВД

Величина  $d_6$  влияет на режимы работы последних хвостовых поверхностей (ТуЭК и РВП) при неизменном тепловосприятии основного ЭКО 1789–1790 кДж/м<sup>3</sup>. Тепловосприятие ТуЭК изменяется пропорционально доле байпасирования ПВД.

С увеличением доли байпасирования снижаются удельное тепловосприятие РВП и температура горячего воздуха  $t_{г.в.}$  от 266 до 175 °С (рис. 7).

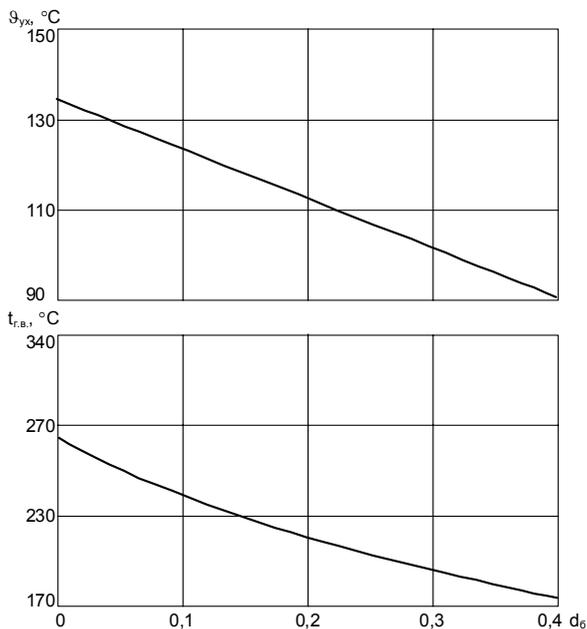


Рис. 7. Зависимость температур уходящих газов и горячего воздуха от доли байпасирования ПВД

Уменьшение значений температуры горячего воздуха ведет к снижению температуры в ядре факела и, как следствие, к уменьшению образования окислов азота в 1,3–1,4 раза [8].

За счет установки ТуЭК даже при ухудшенном тепловосприятии РВП температура уходящих газов понижается на 40 °С – до 91 °С (рис. 7).

В случае постоянства тепловосприятия основного ЭКО значения температуры воды  $t_{эк''}$  и газов  $q_{эк''}$  за ЭКО практически не меняются.

С возрастанием  $d_6$  температура газов на выходе из топки снижается, не влияя на тепловосприятие ВРЧ и ширмового пароперегревателя. Тепловая мощность котла  $Q_k$  возрастает на 3–11 %.

При постоянных потерях теплоты  $q_3$  и  $q_4$  КПД котла брутто зависит от изменения потери теплоты с уходящими газами. С увеличением доли байпасирования ПВД от 0 до 0,4 снижение температуры уходящих газов с 133 до 91 °С повышает КПД котла брутто от 0,9203 до 0,9448 (рис. 8).

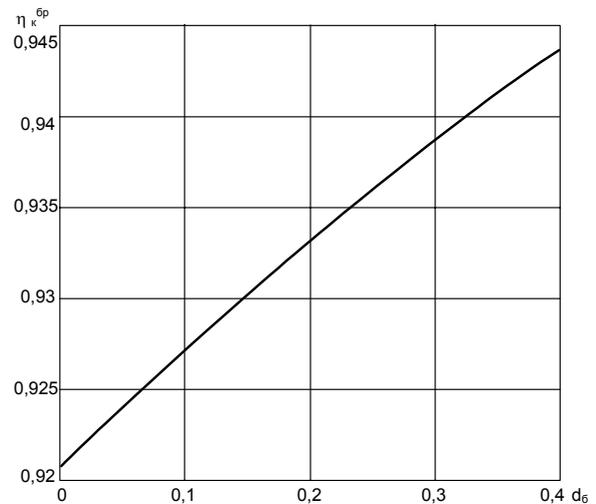


Рис. 8. Зависимость КПД парового котла брутто от доли байпасирования ПВД

С увеличением доли байпасирования ПВД электрический КПД турбоустановки  $\eta_3^{бр}$  снижается с 46,15 до 45,66 ввиду ухудшения эффективности работы системы регенеративного нагрева питательной воды, а значения КПД энергоблока возрастают, достигая максимального значения 0,427 при  $d_6 = 0,4$  (табл. 2, рис. 9).

Таблица 2. Результаты расчетов тепловой схемы энергоблока при номинальной паропроизводительности котла ПК-41

Наименование величин	Доля байпасирования ПВД				
	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Электрический КПД турбоустановки брутто, %	46,15	45,91	45,82	45,78	45,66
Электрическая мощность блока брутто, МВт	300,02	305,088	340,545	315,86	321,04

Соответственно, в интервале  $d_6 = 0–0,4$  снижаются значения удельного расхода условного топлива на выработанную электрическую мощность, достигая минимального значения  $288 \cdot 10^{-3}$  кг/(кВт·ч) при максимальной доле  $d_6$ .

С увеличением доли  $d_b$  уменьшается расход питательной воды через ПВД (табл. 1) при соответствующем уменьшении расхода пара из отборов турбины. При увеличении расхода пара в цилиндрах турбины вырабатываемая электрическая мощность возрастает по линейной зависимости (рис. 10). Дополнительная выработка электрической мощности, по сравнению с исходным вариантом, достигает 21,01 МВт при наибольшей доле байпасирования ПВД.

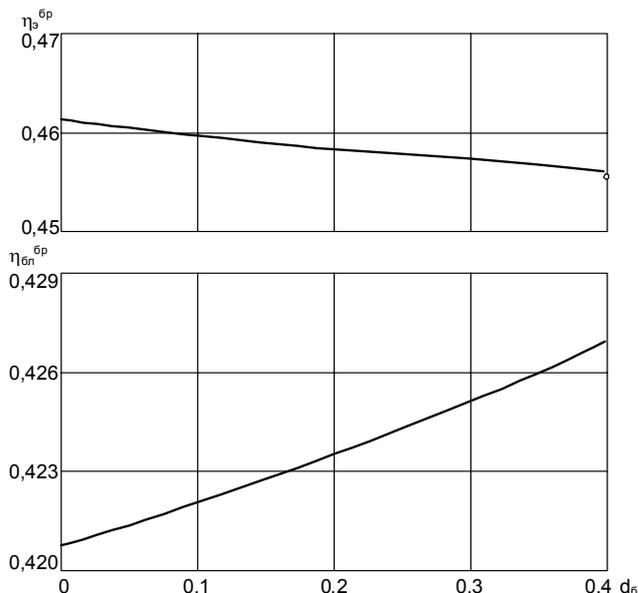


Рис. 9. Зависимости КПД турбоустановки и энергоблока от доли байпасирования ПВД

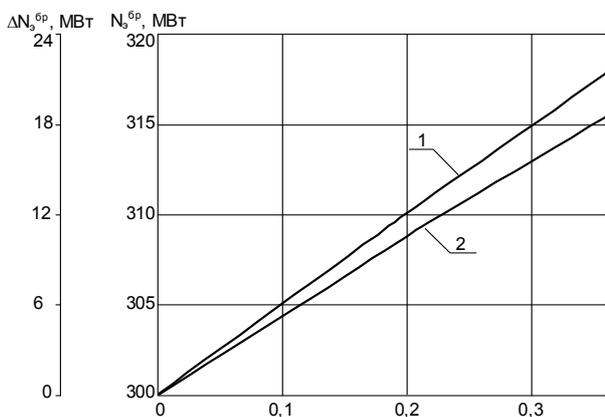


Рис. 10. Зависимость электрической мощности турбоагрегата и ее дополнительной выработки от доли байпасирования ПВД: 1 – электрическая мощность турбоустановки; 2 – дополнительная выработка электроэнергии

С точки зрения тепловой эффективности наилучшим является вариант при  $d_b = 0,4$  (табл. 1), когда КПД блока имеет максимальное значение 42,7 % при минимальном удельном расходе условного топлива 288 кг у.т./кВт·ч). Однако при этом температура уходящих газов ниже 100 °С, что недопустимо по условию на-

дежности эксплуатации отводящих газоходов и дымовой трубы энергоблока.

Кроме того, для  $d_b = 0,4$  требуется высокая поверхность ТуЭК (6440 м<sup>2</sup>), что в 1,6–1,65 раза превышает поверхность теплообменника при доле байпасирования ПВД  $d_b = 0,3$ . Повышенные аэродинамического сопротивления при  $d_b = 0,4$  не позволит использовать в работе установленный дымосос типа ДОД-31,5 [10].

При выполнении ТуЭК из оребренных труб  $d_n \times \delta = 32 \times 6$  мм с диаметром ребер 52 мм и продольным шагом  $S_2 = 60$  мм высота пакета ТуЭК составляет 0,66 м. Это позволяет разместить ТуЭК ниже основного ЭКО котла без дополнительной реконструкции газохода.

Аэродинамическое сопротивление пучка труб ТуЭК не превышает 11 кг/м<sup>2</sup>. Для котлов ПК-41 используют дымососы типа ДОД-31,5. Несмотря на дополнительное повышение сопротивления газового тракта характеристика машины ДОД-31,5 позволяет оставить её в условиях эксплуатации.

## Заключение

Расчетными исследованиями установлена возможность повышения экономической эффективности газомазутного энергоблока мощностью 300 МВт Конаковской ГРЭС путем байпасирования ПВД с нагревом части питательной воды в турбинном экономайзере котла ПК-41.

Оптимальная доля байпасирования ПВД, обеспечивающая высокую экономичность и необходимую надежность блока, должна составлять  $d_b = 0,3$  при требуемой поверхности нагрева ТуЭК (для одного корпуса) 3960 м<sup>2</sup>.

При номинальной паропроизводительности котла ПК-41 установка ТуЭК позволяет снизить температуру уходящих газов на 28–31 °С, повышая КПД котла брутто на 1,6–1,8 %.

КПД энергоблока брутто повышается на 0,43–0,45 %, достигая максимальных значений 42,4–42,5 % при  $d_b = 0,3$ .

Байпасирование ПВД позволяет выработать дополнительную электрическую мощность до 14–16 МВт, что составляет 4,5–5,5 % от номинальной нагрузки энергоблока.

Высота пакета ТуЭК, выполненного из оребренных труб, не превышает 0,66 м, а аэродинамическое сопротивление равно 11 кг/м<sup>2</sup>.

## Список литературы

1. Мошкарин А.В., Смирнов А.М., Ананьин В.И. Состояние и перспективы развития энергетики Центра России / под ред. А.В. Мошкарина. – Иваново: Центрэнерго – Иван. гос. энерг. ун-т, 2000. – 192 с.
2. Анализ направлений развития отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шелыгин, В.С. Рабенко; под ред. А.В. Мошкарина / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 256 с.
3. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.; Л.: Энергия, 1967.

4. **Свидетельство** №2001610332 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование и расчет тепловых схем ТЭС и АЭС / А.В. Мошкарин, В.А. Семашко, Е.В. Полежаев, А.В. Полежаев // Роспатент. – 2001.

5. **Носков А.И.** Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе «ТРАКТ»»; ЗиО. – Подольск, 1984. – 40 с.

6. **Гудзюк В.Л., Ривкин А.С., Шельгин Б.Л.** Тепловой поверочный расчет паровых котлов на ЭВМ ЕС / Метод. указания / Иван. энерг. ин-т. – Иваново, 1989.

7. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973.

8. **Рихтер Л.А., Волков Э.П., Покровский В.И.** Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981.

10. **Аэродинамический** расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. Изд-е 3-е. – Л.: Энергия, 1977. – С. 256.

*Мошкарин Андрей Васильевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,  
телефон (4932) 41-60-56,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

*Шельгин Борис Леонидович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (4932) 41-60-56,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

*Мельников Александр Валентинович,*

ОАО «Конаковская ГРЭС»,  
инженер,  
телефон 8-482-423-83-59.

*Базеев Николай Викторович,*

ОАО «Конаковская ГРЭС»,  
инженер,  
телефон 8-903-804-02-02.