

УДК 621.311.22

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШТАТНЫХ ВПРЫСКОВ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ В ПАРОВОЙ ТРАКТ КОТЛА ПК-41 НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

Б.Л. ШЕЛЫГИН, С.А. ПАНКОВ, кандидаты техн. наук, А.В. МЕЛЬНИКОВ, Н.В. БАЗЕЕВ, инженеры

С использованием расчетной модели котла ПК-41 выполнен анализ целесообразности отказа от использования штатных впрысков питательной воды в его водопаровой тракт. При переменных нагрузках энергоблока выполнено расчетное исследование работы котлоагрегата без впрыска питательной воды в первые ступени его пароперегревателя.

*Ключевые слова:* паровой котел, расчетная схема, компоновка поверхностей нагрева, топочные экраны, конвективный пучок труб, скорость циркуляции, гидравлическое сопротивление, температура воды, КПД котла.

## ANALYZING INFLUENCE OF FEED WATER NOMINAL INJECTIONS INTO STEAM DUCT OF PK-41 BOILER ON EFFICIENCY AND OPERATIONAL RELIABILITY

SHELYGIN B.L., candidate of science, PANKOV S.A., candidate of science, MELNIKOV A.B., BAZEEV N.V., engineers

The article is devoted to the problem of suitability analysis of refusing the feed water nominal injections into steam duct with application of the calculated model of PK-41 boiler. Refusing injections does not reduce efficiency and operational reliability of the boiler unit with all different loadings.

*Key words:* steam boiler, calculation model, heat surface composition, furnace waterwalls, convection tube bank, circulation velocity, hydraulic resistance, water temperature, coefficient of the boiler efficiency.

Энергетическое оборудование электростанций РФ, введенное в эксплуатацию в 70-е годы прошлого века, выработало установленный парковый ресурс [1]. Поэтому необходимы рациональные технические предложения при минимальных денежных затратах по модернизации существующих агрегатов ТЭС.

При работе морально устаревшего, работающего свыше 35 лет оборудования возможен отказ от ранее принятых проектных решений в случае, если он не ухудшает показателей эксплуатации энергоблока.

Первая очередь Конаковской ГРЭС с блоками 300 МВт укомплектована турбоустановками К-300-23,5 ЛМЗ [2] и двухкорпусными газомазутными котлоагрегатами марки ПК-41 паропроизводительностью 950 т/ч, изготовленными Подольским котельным заводом «ЗиО г. Подольск» [3].

Котел марки ПК-41 – один из первых котлов нового поколения, введенных в эксплуатацию в начале 70-х годов прошлого столетия. По современным требованиям, ввиду высоких расходов условного топлива на производство электроэнергии эти котлы считаются морально и физически устаревшими и подлежат модернизации.

В стационарных условиях эксплуатации энергоблока при неизменных значениях внешних возмущающих факторов (температуры наружного воздуха и питательной воды, состава топлива, коэффициента избытка воздуха в топке и т.д.) постоянство температуры пара высокого давления (ВД) за котлом  $t_{\text{вд}}$  поддерживается [4]:

1) соответствием тепловыделения в топочной камере  $Q_T$  (расхода сжигаемого топли-

ва) расходу воды  $D_{\text{п.в.}}$ , поступающей в водопаровой тракт;

2) впрыском части питательной воды через пароохладители в паровой тракт перед конвективными ступенями пароперегревателя ВД;

3) паропаровым теплообменником (ППТО), параллельно включенным в тракт пара ВД и низкого давления (НД).

Исключение первого и третьего условий регулирования  $t_{\text{вд}}$  невозможно, так как: первое условие является обязательным для конструкции прямоточного котла; использование ППТО при переменных режимах работы позволяет сглаживать температурную характеристику  $t_{\text{вд}}$  и помогает выполнению первого условия.

В настоящее время считается целесообразным отказаться от использования штатных впрысков питательной воды в паровой тракт котла ПК-41. Мотивации данной точки зрения следующие:

- не снижается КПД котла (брутто);
- упрощается схема регулирования температуры перегретого пара;
- снижаются материальные и эксплуатационные затраты на поддержание постоянства температуры перегретого пара в стационарных условиях работы котлоагрегата.

Для анализа эксплуатационных показателей действующего котлоагрегата ПК-41 Конаковской ГРЭС с использованием программного продукта «ТРАКТ» [5] была разработана расчетная модель агрегата, включающая четыре рабочих тракта: газовый и воздушный тракты, паровые тракты высокого (ВД) и низкого (НД) давлений.

При выполнении расчета в качестве топлива был принят природный газ с теплотой

сгорания  $8200 \text{ ккал/м}^3$  [6]. Значения коэффициента избытка воздуха на выходе из топочной камеры и присосов воздуха в газоходы при номинальной нагрузке котла были приняты по данным станции. При этом коэффициент избытка воздуха в уходящих газах при максимальной паропроизводительности котла равен 1,46. Средняя температура наружного воздуха принята  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура воздуха перед РВП (за калорифером) –  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При максимальной паропроизводительности котла потеря теплоты от наружного охлаждения котла  $q_5$  составляла 0,2 %. Ввиду повышенного теплового напряжения топочного объема  $330\text{--}350 \text{ Мкал/(м}^3\cdot\text{ч)}$  потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива  $q_3$  принята 0,1 %.

Расчеты выполнялись на один корпус котла. Результаты теплогидравлических расчетов котла ПК-41 при значениях относительной паропроизводительности одного корпуса  $D/D_{\text{ном}} = 0,5$  и  $1,0$  и долях впрыска питательной воды  $d_{\text{впр}} = 0,00$ ;  $0,03$  и  $0,06 \text{ кг/кг}$  представлены в табл. 1, 2.

В случае  $d_{\text{впр}} = 0,03 \text{ кг/кг}$  при снижении паропроизводительности с  $475$  до  $238 \text{ т/ч}$  температура уходящих газов снижается незначительно – с  $146$  до  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 1). За счет повышенных (против нормативных) присосов холодного воздуха в топку и газоходы котла коэффициент избытка воздуха в уходящих газах  $\alpha_{\text{ух}}$  возрастает от 1,46 до 1,6 (рис. 2).

Таблица 1. Результаты теплового расчета котла ПК-41 при паропроизводительности одного корпуса  $D = 475 \text{ т/ч}$  ( $d_{\text{отн}} = 1,0$ )

Наименование характеристик	Доля расхода питательной воды на впрыск в паровой тракт $d_{\text{впр}}$ , кг/кг		
	0	0,03	0,06
Расход питательной воды $D_{\text{п.в}}$ , т/ч	475	475	475
Расход воды на впрыскивающие пароохладители $D_{\text{впр}}$ , т/ч	0	14,25	28,5
Расход воды в водопаровой тракт, т/ч	475	460,75	446,5
Расход топлива $V$ , $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot 10^{-3})$	39,173	39,178	39,183
Тепловосприятие котла, Гкал/ч	296,2	296,2	296,2
Температура пара ВД, $^\circ\text{C}$	545	545	545
Температура пара НД, $^\circ\text{C}$	545	545	545
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,46	1,46	1,46
Температура уходящих газов, $^\circ\text{C}$	146	146	147
КПД котла (брутто), %	91,28	91,27	91,26
Температура питательной воды, $^\circ\text{C}$	265	265	265
Энтальпия питательной воды на входе в водопаровой тракт, ккал/кг	276,6	276,6	276,6
Энтальпия пара ВД на выходе из котла, ккал/кг	794,7	794,7	794,7
Температура пара ВД на выходе из ППТО, $^\circ\text{C}$	411	420	428
Температура среды на входе в СРЧ, $^\circ\text{C}$	414	417	419
Температура пара за ШПП-2, $^\circ\text{C}$	466	473	479
Температура пара на входе в КПП-1, $^\circ\text{C}$	466	466	466
Доля байпаса пара НД через ППТО	0,38	0,38	0,38

Таблица 2. Результаты теплового расчета котла ПК-41 при паропроизводительности одного корпуса  $D = 238 \text{ т/ч}$  ( $d_{\text{отн}} = 0,5$ )

Наименование характеристик	Доля расхода питательной воды на впрыск в паровой тракт $d_{\text{впр}}$ , кг/кг		
	0	0,03	0,06
Расход питательной воды $D_{\text{п.в}}$ , т/ч	238	238	238
Расход воды на впрыскивающие пароохладители $D_{\text{впр}}$ , т/ч	0	7,18	14,36
Расход воды в водопаровой тракт, т/ч	238	230,8	223,6
Расход топлива $V$ , $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot 10^{-3})$	21,83	21,83	21,91
Тепловосприятие котла, Гкал/ч	163,9	163,86	164,43
Температура пара ВД, $^\circ\text{C}$	548	545	545
Температура пара НД, $^\circ\text{C}$	535	541	549
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,6	1,6	1,6
Температура уходящих газов, $^\circ\text{C}$	140	140	140
КПД котла (брутто), %	90,7	90,74	90,67
Температура питательной воды, $^\circ\text{C}$	230	230	230
Энтальпия питательной воды на входе в водопаровой тракт, ккал/кг	237,8	237,8	237,8
Энтальпия пара ВД на выходе из котла, ккал/кг	813,1	811	809,6
Температура пара ВД на выходе из ППТО, $^\circ\text{C}$	417	414	412
Температура среды на входе в СРЧ, $^\circ\text{C}$	396	399	401
Температура пара за ШПП-2, $^\circ\text{C}$	479	484	490
Температура пара на входе в КПП-1, $^\circ\text{C}$	479	474	470
Доля байпаса пара НД через ППТО	0	0	0

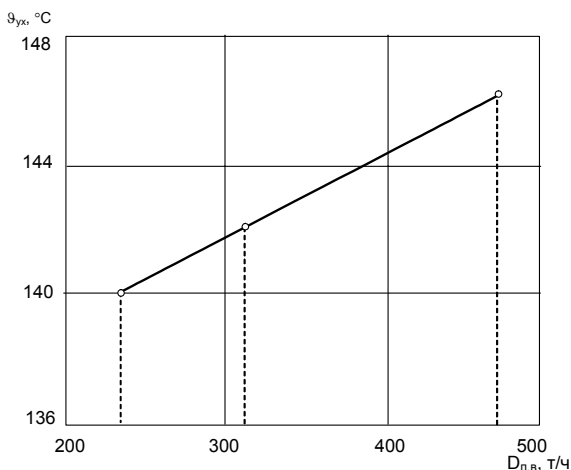


Рис. 1. Зависимость температуры уходящих газов от расхода питательной воды на один корпус при ее относительной доле впрыска в паровой тракт  $d_{впр} = 3 \%$

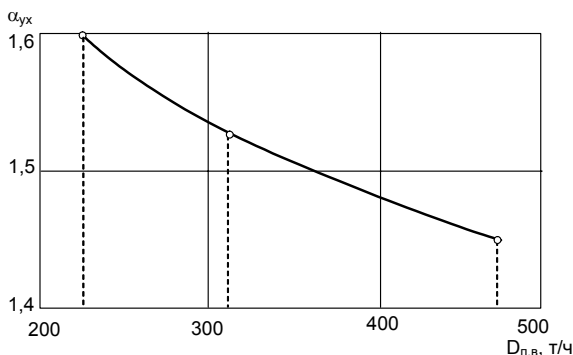


Рис. 2. Зависимость коэффициента избытка воздуха в уходящих газах котла ПК-41 от расхода питательной воды на один корпус агрегата

Увеличение потери теплоты с уходящими газами  $q_2^{прис}$  за счет роста величины  $\alpha_{ух}$  превышает значение  $q_2^{темп}$  за счет снижения температуры уходящих газов. Поэтому при снижении паропроизводительности с 475 до 238 т/ч и доле впрыска  $d_{впр} = 0,03 \text{ кг/кг}$  КПД котла (брутто) снижается с 91,27 до 90,74 % (рис. 3). Соответственно, для поддержания постоянства температуры пара за пароперегревателем ВД ( $t_{вд}'' = 545 \text{ °C}$ ) должна возрастать величина отношения тепловыделения в топочной камере котла к расходу поступающей в него питательной воды  $Q_T/D_{п.в}$  от 680 до 750 ккал/кг (рис. 4).

Согласно полученным результатам (табл. 1), независимо от доли впрыска  $d_{впр}$ , при неизменном тепловосприятии корпуса котла 296,2 Гкал/ч и постоянном расходе топлива (39173–39183 м<sup>3</sup>/ч) КПД котла (брутто)  $\eta_k^{бр}$  составляет 91,26–91,28 %. Аналогичный результат получен и при расчете котла на паропроизводительность корпуса 238 т/ч – 90,67–90,74 %. Для каждого режима работы энергоустановки, независимо от величины впрыска воды в паровой тракт, значения КПД практически совпадают (табл. 1, 2) с их относительным отклонением 0,02–0,04 %, что укладывается в допусти-

мые погрешности измерения теплотехнических характеристик приборами и обработки результатов измерений. Постоянство значений  $\eta_k^{бр}$  обусловлено одинаковыми значениями температур уходящих газов и постоянством тепловых потерь  $q_2, q_3$  и  $q_5$ .

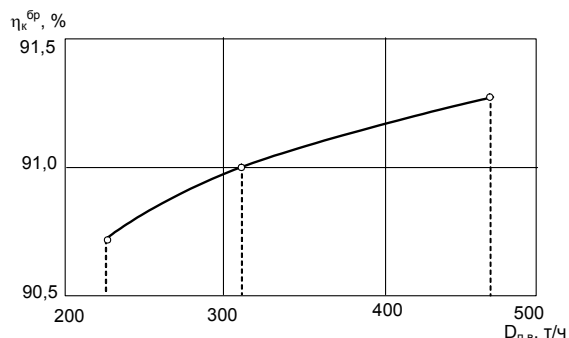


Рис. 3. Зависимость КПД котла ПК-41 (брутто) от расхода питательной воды на один корпус агрегата при ее относительной доле впрыска в паровой тракт  $d_{впр} = 3 \%$

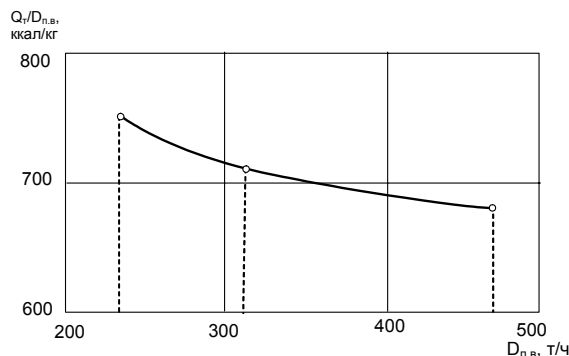


Рис. 4. Изменение отношения тепловыделения в топочной камере одного корпуса котла ПК-41 к расходу питательной воды в зависимости от паропроизводительности одного корпуса агрегата

При относительной паропроизводительности корпуса котла  $d_{отн} = 1,0$ , независимо от доли впрыска ( $d_{впр} = 0–0,06 \text{ кг/кг}$ ) общее тепловосприятие агрегата по рабочей среде равно 296,2 Гкал/ч (табл. 1).

Изменение температуры пара ВД от входа его в поверхность нагрева СРЧ3-1 до выхода из конвективного пароперегревателя КПП-2 представлено на рис. 5, где:

- $Q_1^p$  – сумма тепловосприятий поверхностей нагрева средней радиационной части (СРЧ3-1, СРЧ3-2, СРЧБ-1, СРЧ-2, СРЧБ-3), средних и крайних ширм (СРШ и КРШ), верхней радиационной части (ВРЧ-1 и ВРЧ-2);
- $Q_{ппто}$  – количество теплоты, отдаваемое паром ВД пару НД в ППТО;
- $Q_2^p$  – сумма тепловосприятий поверхностей нагрева на участке парового тракта между впрысками (СРЧФ-1, СРЧФ-2, СРЧФ-3, ШПП-2);
- $Q_1^k, Q_2^k$  – тепловосприятия первой и второй ступеней конвективного пароперегревателя ВД соответственно (КПП-1, КПП-2).

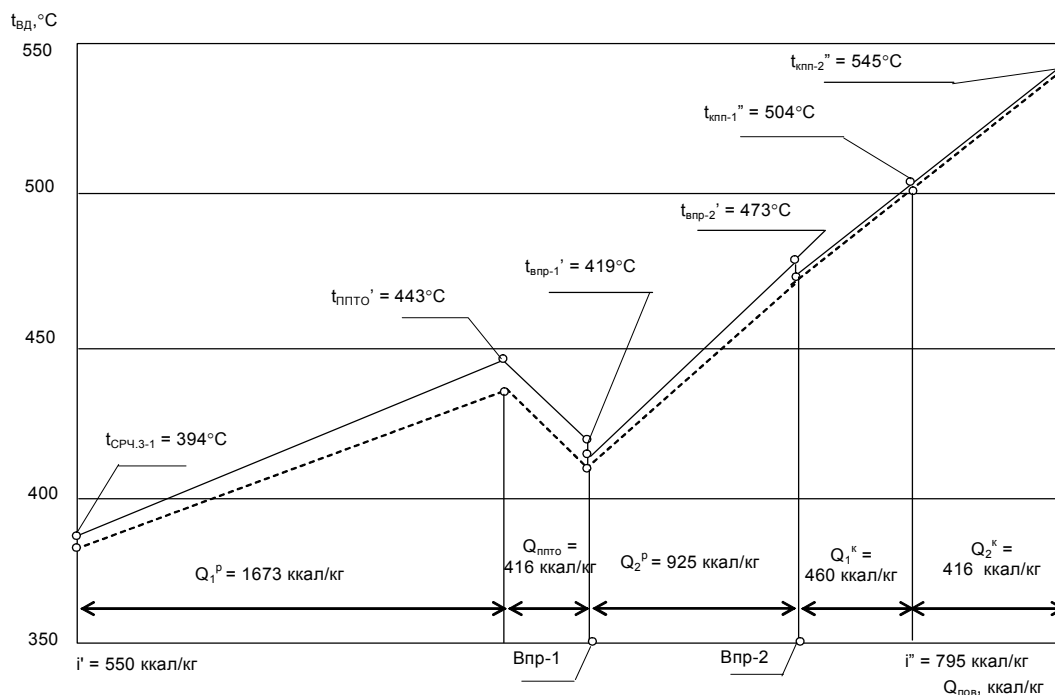


Рис. 5. Зависимость температуры пара за пароперегревателем ВД от тепловосприятия поверхностей нагрева парового тракта одного корпуса котла ПК-41 при паропроизводительности  $D = 475$  т/ч: — при  $d_{впр} = 3\%$ ; - - - - - при  $d_{впр} = 0$

В случае отказа от впрысков на 3 % увеличивается расход воды в водяной ЭКО и при неизменном общем тепловосприятии корпуса (296,2 Гкал/ч) температура пара на входе ППТО снижается примерно на 10 °С. Соответственно, при неизменных тепловых потоках от факела к поверхностям нагрева должна снижаться температура металла труб. Отмеченное характерно и для поверхностей нагрева, размещенных между впрыскивающими пароохладителями.

При  $d_{впр} = 0$  при отключенном пароохладителе «Впр-2» в ступенях конвективного пароперегревателя значения температуры пара выравниваются со значениями  $t_{вд}$  базового варианта ( $d_{впр} = 0,03$  кг/кг), но не превышают их.

Изменение температуры пара ВД при относительной паропроизводительности  $d_{отн} = 0,5$  представлено на рис. 6.

Согласно [7, 8], суммарное тепловосприятие радиационных поверхностей нагрева в зависимости от нагрузки котла меняется незначительно:

- при  $d_{отн} = 1,0$   $Q_1^p + Q_2^p = 2598$  ккал/кг;
- при  $d_{отн} = 0,5$   $Q_1^p + Q_2^p = 2615$  ккал/кг.

Поэтому при пониженном расходе пара внутри труб радиационных поверхностей нагрева (238 т/ч) и  $d_{впр} = 0,03$  кг/кг, когда на 3 % снижается расход среды в СРЧ3-1, температура пара ВД перед ППТО возрастает до  $t_{ппто} = 485$  °С.

В случае отказа от впрысков за счет увеличения расхода среды значение  $t_{ппто}$  снижается на 20–25 °С, и, соответственно, должна снижаться температура металла труб.

При увеличении тепловой нагрузки ППТО и глубоком снижении температуры пара ВД  $t_{вд}$  до требуемого уровня (400–410 °С) должно возрастать тепловосприятие пара НД в ППТО. Это достигается увеличением расхода пара НД в ППТО за счет снижения доли байпаса ППТО (рис. 7).

В случае отказа от впрысков характер изменения температуры пара ВД аналогичен характеристикам режима при  $d_{отн} = 1,0$ . Это позволяет рассчитывать на надежную работу поверхностей нагрева котла независимо от режима его работы.

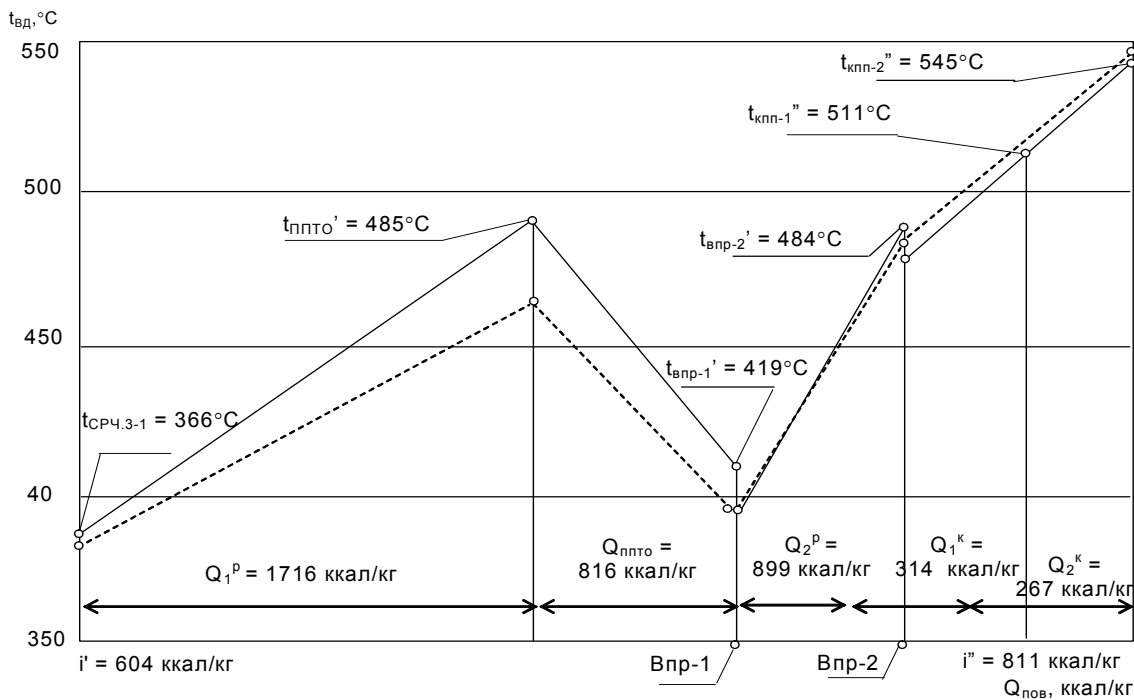


Рис. 6. Зависимость температуры пара за пароперегревателем ВД от тепловосприятия поверхностей нагрева парового тракта одного корпуса котла ПК-41 при паропроизводительности  $D = 238$  т/ч: — при  $d_{впр} = 3\%$ ; - - - - - при  $d_{впр} = 0$

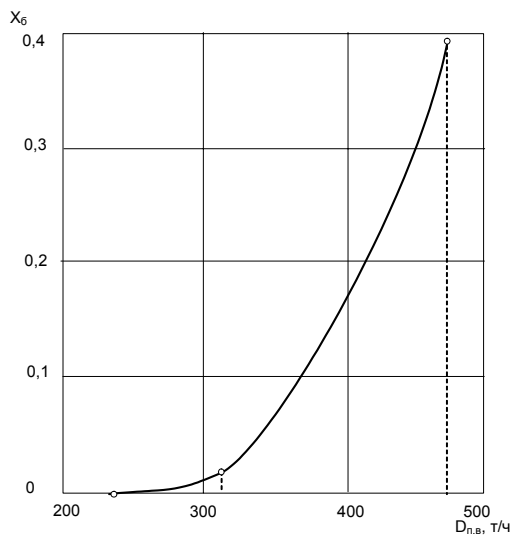


Рис. 7. Изменение доли байпасирования пара НД применительно к ППТО в зависимости от расхода питательной воды на один корпус котла

### Заключение

С использованием расчетной модели котла ПК-41 выполнен анализ целесообразности отказа использования штатных впрысков питательной воды в паровой тракт при существующих повышенных присосах холодного воздуха в газовый тракт. Независимо от паропроизводительности котла, отказ от штатных

впрысков питательной воды не снижает КПД котла (брутто). Температуры пара высокого давления и металла соответствующих поверхностей находятся на прежнем уровне. Расчетами установлена принципиальная возможность не использовать штатные впрыски воды при переменных режимах работы котла ПК-41.

### Список литературы

1. Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шельгин и др.; под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002.
2. Тепловые и атомные электрические станции: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Котлы большой мощности. Каталог 13-80. НИИЭ-ИНФОРМЭНЕРГОМАШ. – М., 1980.
4. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981.
5. Носков А.И. Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе ТРАКТ» / А.И. Носков; ЗиО-Подольск. – Подольск, 1984.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973.
7. Елизаров П.П. Эксплуатация котельных установок высокого давления на электростанциях. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
8. Шельгин Б.Л., Барочкин Е.В., Зорин М.Ю. Статические характеристики паровых котлов с естественной циркуляцией: метод. указания / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 1998.

Шельгин Борис Леонидович,  
ФГБОУВПО «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

*Панков Сергей Алексеевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук,  
телефон (4932) 41-60-56,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

*Мельников Александр Валентинович,*  
ОАО «Конаковская ГРЭС»,  
главный инженер,  
телефон (482) 423-83-59.

*Базеев Николай Викторович,*  
ОАО «Конаковская ГРЭС»,  
начальник отдела,  
телефон (482) 423-83-59.