

УДК 621.165

М.В. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, О.Н. СЛАБЧЕНКО, канд. техн. наук,
Т.И. ШВЕДОВА, канд. техн. наук.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

РАСЧЕТ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТСЕКОМ СТУПЕНЕЙ ЦНД ТУРБИНЫ К-300-240 С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Пропонується вибір варіанта модернізації проточних частин ЦНТ парових турбін станцій здійснювати з урахуванням умов експлуатації конкретного енергоблоку. При цьому оцінку економічності варіанта модернізації здійснювати по виробленню електроенергії, яке можна визначити, використовуючи інтегральні характеристики групи ступінів – витрата, теплоперепади і ККД у змінному режимі роботи, отримані як експериментальним, так і розрахунковим шляхом.

Модернизация основного оборудования тепловых электростанций Украины в первую очередь предусматривает малозатратную поузловую замену изношенного оборудования с повышением его экономичности. Это относится к тем элементам паровых турбин, которые не выработали свой ресурс, но морально устарели. В первую очередь это относится к цилиндрам низкого давления (ЦНД) турбин, проточная часть которых, выполненная более 30 лет назад, морально устарела и модернизацию которой сейчас можно провести с использованием экспериментальных и теоретических исследований, накопившихся с момента их разработки, как в отечественном турбостроении, так и за рубежом.

Первоначально турбины К-300-240, которые установлены на Змиевской ГРЭС, проектировались как базовые машины с довольно глубоким вакуумом в конденсаторе. В настоящее время условия их работы в энергосистемах, и в частности на Змиевской ГРЭС, значительно изменились. С одной стороны, ими покрывается переменная часть нагрузки системы, с другой стороны, имеет место ограничение мощности по производительности котла и более высокая, чем расчетная, температура охлаждающей воды. Все это приводит к тому, что последние ступени ЦНД турбины большую часть времени работают в нерасчетных режимах. Поэтому эффективность проточной части ЦНД и варианты ее модернизации должны оцениваться по интегральным характеристикам ЦНД в переменном режиме (КПД и мощность).

В настоящей работе рассматриваются три возможных варианта модернизации ЦНД, в который могут устанавливаться: пятиступенчатая проточная часть унифицированного ЦНД турбин К-750-65, К-320-23,5 с длиной рабочей лопатки 1030 мм, четырехступенчатая проточная часть турбины К-300-240 с демонтированной последней ступенью и замененной штатной 4-й ступенью на ступень с рабочей лопаткой 752 мм, штатная четырехступенчатая проточная часть с демонтированной последней ступенью.

Для этого необходимо знать характеристики ступеней ЦНД, участвующих в регулировании мощности в функции от объемного расхода через выхлоп (GV_K). Для штатного ЦНД и модернизированных вариантов это отсек из трех последних ступеней, т. к. режим работы первых двух ступеней при изменении нагрузки на выхлоп не меняется.

Для определения мощности 3-х последних ступеней в переменном режиме необходимо иметь зависимость расхода, перепадов и внутреннего КПД этих ступеней от объемного расхода через выхлоп (GV_K).

Распределение тепловых перепадов и расходы по ступеням в переменном режиме для штатного ЦНД определялись по данным натурных испытаний [1].

Там же была получена зависимость КПД последней ступени и зависимость КПД отсека первых 4-х ступеней от объемного расхода через выхлоп, определенная по результатам траверсирования и по параметрам на входе в цилиндр (P_0, t_0). КПД 4-й ступени определялся в виде

$$\eta_{oi4} = 1 - (\xi_{c4} + \xi_{л4} + \xi_{доп4}) - \xi_{вс4}.$$

На всех режимах величина потерь в соплах и на лопатках совместно с дополнительными потерями этой ступени принималась на уровне расчетных – 15 % [1], а $\xi_{вс4}$ – интегральные потери с выходной скоростью, определенные траверсированием за 4-й ступенью с учетом расходных составляющих в данном сечении.

КПД отсека 1-3 ступеней определялся с использованием расчетной зависимости КПД 3-й ступени $\eta_{из} = f(h_{ад3})$ и экспериментальных значений теплоперепадов на отсек 1-2-й ступеней и 3-й ступени на сравниваемых режимах

КПД последней ступени $\eta_{oi5} = f(GV_K)$, был принят по результатам исследований 5-й ступени [1] и определялся как

$$\eta_{oi5} = 1 - (\xi_c + \xi_{л} + \xi_{доп5}) - \xi_{вс5},$$

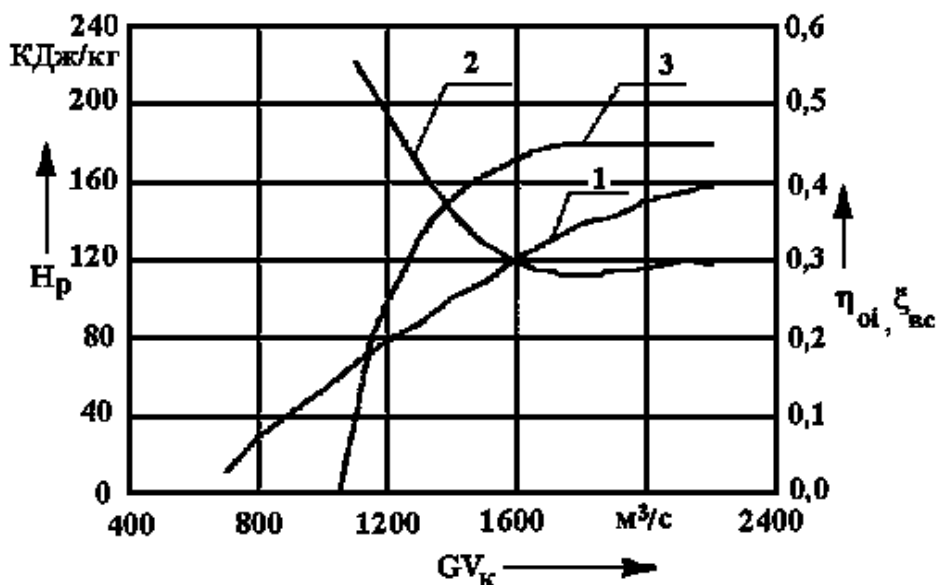
где суммарные потери в соплах и на лопатках определены экспериментально, $\xi_c + \xi_{л} = 0,234$, во всех режимах принимались одинаковыми, а дополнительные потери в решетках (лопаточные и вентиляционные), возникающие при отклонении режима работы от номинального, оценивались по данным исследований последней ступени модернизированного ЦНД турбины ВК-100-5 ЛМЗ [2] в зависимости от зоны, занятой корневым отрывом [3].

Потери с выходной скоростью, значения КПД и располагаемого теплоперепада для 5-й ступени на исследованных режимах приведены на рис.1.

Анализ работы ЦНД с демонтированной последней ступенью проведен для отсека, состоящего из 3-й и 4-й ступени, расчетным путем.

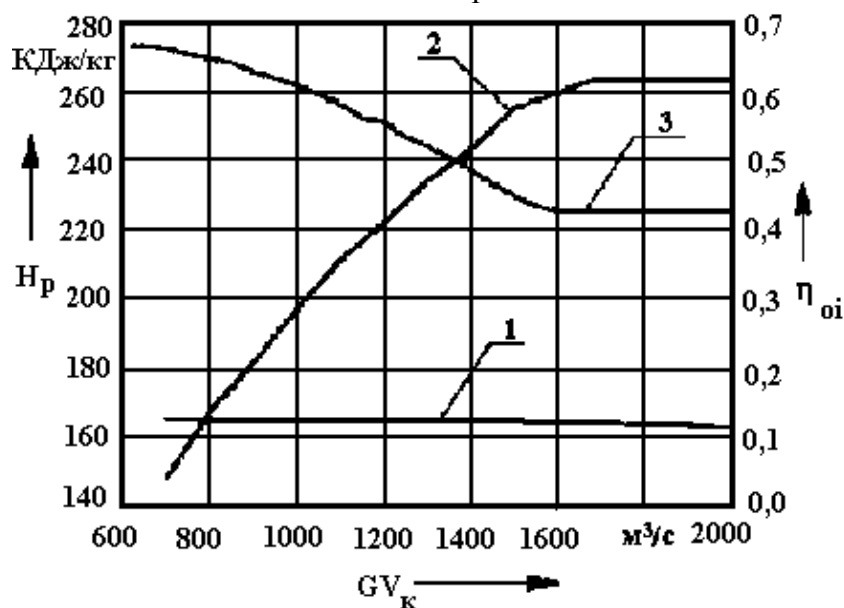
Распределение теплоперепадов по ступеням определялось методом “GV”. Практически, весь перепад приходящийся на 5-ю и 4-ю ступени в штатном варианте, срабатывается на 4-й ступени. Перепад на 3-ю ступень в переменном режиме изменяется слабо (рис. 2).

Расходы через 3-ю и 4-ю ступени остаются такими же как в штатном варианте и определялись по результатам траверсирования за 4-й ступенью и величиной отбора за 3-й ступенью.



1 – H_{p5} ; 2 – $\xi_{вс5}$; 3 – η_{oi5}

Рисунок 1. Зависимость параметров 5-й ступени ЦНД К-300-240 от GV_K . Штатный вариант.



1 – H_{p3} ; 2 – H_{p4} ; 3 – η_{oi4}

Рисунок 2. Зависимость располагаемых перепадов 3-й, 4-й ступеней и экономичности 4-й ступени ЦНД К-300-240 от GV_K . Вариант с демонтированной 5-ой ступенью.

В результате расчета пространственного потока в 4-й ступени получена зависимость интегральных потерь с выходной скоростью $\xi_{вс4} = f(GV_K)$. Диапазон режимов ограничен режимом $GV_K = 1550 \text{ м}^3/\text{с}$, на котором осевая составляющая скорости на выходе из ступени C_{2z} достигает критического значения по всей высоте лопатки. Найденная зависимость $\xi_{вс4} = f(GV_K)$ использована при определении КПД

4-й ступени при демонтированной 5-й. При этом еще учитывались интегральные потери от влажности, определенные расчетным путем.

Рассмотрен вариант модернизации ЦНД с установкой в нем последней ступени с длиной рабочей лопатки $l_{рл} = 1030$ мм [4, 5]. Расчеты выполнены методом “GV”.

Определены теплоперепады трех последних ступеней ЦНД во всем диапазоне работы турбины в условиях Змиевской ГРЭС. По сравнению со штатной последней ступенью с $l_{рл} = 1050$ мм новая ступень работает с увеличенным теплоперепадом. Расчетные значения располагаемого теплоперепада 5-й ступени, практически, не отличаются от экспериментальных, полученных при исследовании крупномасштабного модельного отсека ЦНД турбины К-320-23,5 ХТГЗ с разрезным валом (рис. 3).

При расчете мощности отсека использованы экспериментальные зависимости теплоперепада и КПД 5-й ступени от объемного расхода в конденсатор и расчетные зависимости теплоперепадов и КПД для 3-й и 4-й ступеней.

При этом расходы через ступени сохранялись такими же, как и в штатном варианте, а КПД по заторможенным параметрам η_{oi5}^* определялся по результатам траверсирования.

При расчете мощности варианта с 4-х ступенчатым отсеком ЦНД с демонтированной последней ступенью и заменой штатной 4-й ступени ступенью с длиной рабочей лопатки $l_{рл} = 752$ мм рассматривается только отсек 3-4 ступени.

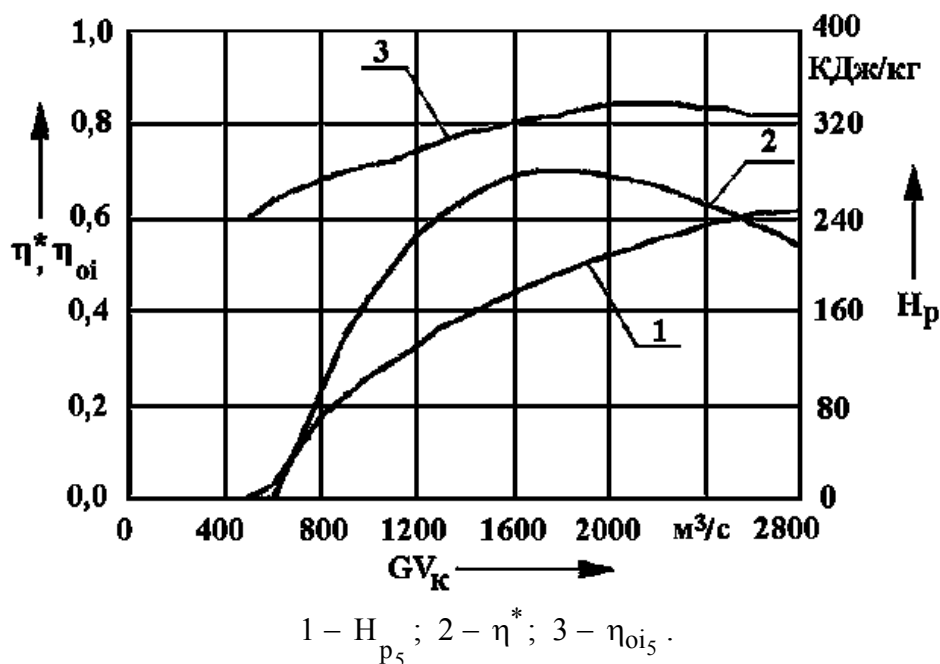


Рисунок 3. Интегральные характеристики последней ступени с $l_{рл}=1030$ мм

Перепады на ступени определялись расчетным путем методом “GV”. Практически, на 4-й ступени с $l_{рл} = 752$ мм срабатывает полностью располагаемый перепад двух последних ступеней штатного отсека ЦНД К-300-240. Перепад на 3-й ступени соответствует расчетным значениям.

Расходы пара через ступени приняты аналогично предыдущим вариантам.

Для расчета мощности четырехступенчатого отсека с последней лопаткой $l_{рл} = 752$ мм используются экспериментальные зависимости $\eta_{oi} = f(GV_K)$ и

$\eta^* = f(GV_K)$, полученные на крупномасштабной модели стенда НПО «Турбоатом» для 3-х ступенчатого отсека с лопаткой $l_{рл} = 920$ мм.

При установке ступени с $l_{рл} = 752$ мм в 4-х ступенчатом отсеке ЦНД К-300-240 перепад на ступень существенно возрастает по сравнению с располагаемым перепадом, срабатываемым на ступени с $l_{рл} = 920$ мм. Поэтому при получении зависимости $\eta_{oi} = f(GV_K)$ предполагалось, что увеличенный теплоперепад соответствует как бы увеличенному объемному расходу GV_K . При этом условии определяется зависимость $\eta^* = f(GV_K)$. С учетом расчетных значений интегральных потерь с выходной скоростью, определенных в результате расчета пространственного потока в ступени, и потерь от влажности вычисляется $\eta_{oi4l_{рл}=752}$ (рис. 4).

$$\eta_{oi4l_{рл}=752} = \eta_{l=920}^* - \xi_{всl=752} - \xi_{влl=752} + \xi_{влl=920}.$$

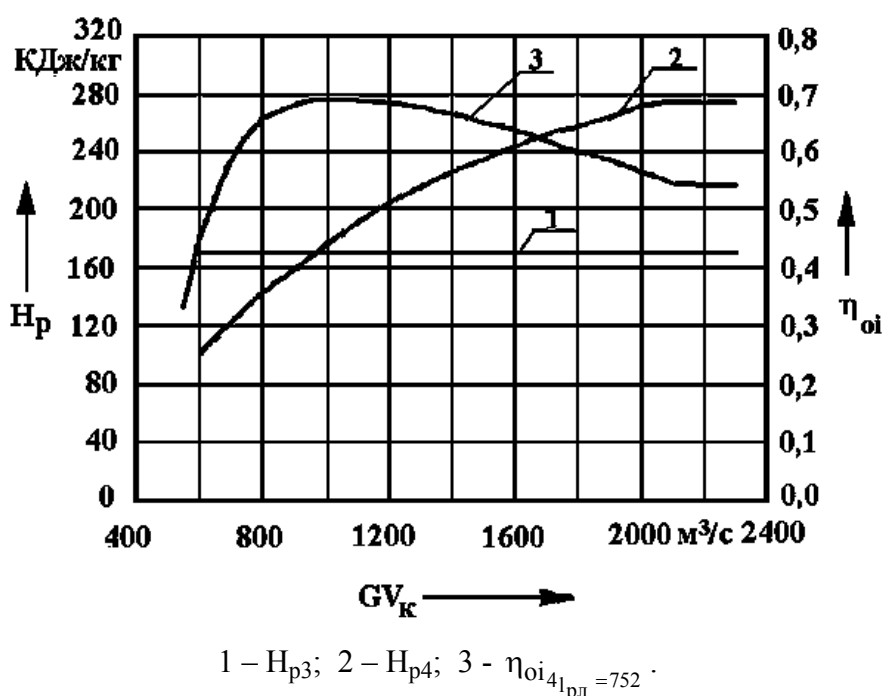
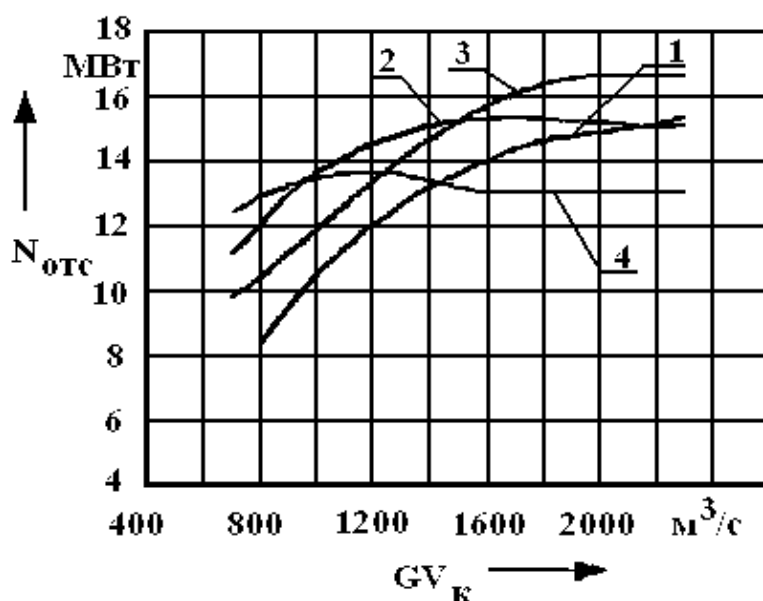


Рисунок 4. Зависимость располагаемых перепадов 3-й, 4-й ступеней и экономичности 4-й ступени в ЦНД К-300-240. Вариант с демонтированной последней ступенью и заменой 4-ой ступени на ступень с $l_{рл} = 752$ мм.

Полученные таким образом зависимости мощности сопоставленных вариантов проточной части ЦНД представлены на рис. 5 и в дальнейшем были использованы при оценке выработки электроэнергии по годовому графику нагрузки [8] блока.

Для Змиевской ГРЭС для варианта со ступенью с лопаткой 1030 мм дополнительная выработка электроэнергии за год по сравнению со штатной проточной частью 37239 МВт·ч, что составляет 1,88 % годовой выработки электроэнергии блоком.

Для 4-х ступенчатого ЦНД со ступенью с лопаткой 752 мм дополнительная выработка составляет 50193,96 МВт·ч или 2,52 %, для 4-х ступенчатого ЦНД, когда штатная 4-я ступень работает как последняя, дополнительная выработка составляет 22350 МВт·ч или 1,12% от годовой выработки электроэнергии блоком.



1 – $I_{рл} = 1050$; 2 – $I_{рл} = 1030$; 3 – $I_{рл} = 752$ демонтирована 5 ступень;
4 – $I_{рл}$ штатный вариант с демонтированной 5-й ступенью.

Рисунок 5. Зависимость мощности отсека последних ступеней ЦНД турбины K-300-240 от GV_{25} для модернизируемых вариантов. Змиевская ГРЭС, блок № 10 (1985-86 г.г.)

Литература

1. Лагун В.П., Симою Л.Л. Газодинамические исследования проточной части низкого явления мощных паровых турбин /Сб. Котельные и турбинные установки энергетических блоков, ВТИ. – 1971.
2. Лагун В.П., Симою Л.Л. Газодинамические исследования последней ступени натурального ЦНД турбины ВК-100-5 до и после модернизации /Теплоэнергетика. – 1969. – №8.
3. Лагун В.П., Симою Л.Л., Фрумин Ю.З. и др. Особенности работы последних ступеней ЦНД на малых нагрузках и холостом ходу /Теплоэнергетика. – 1971. – №2. – С.21-24.
4. Шнеэ Я.И., Косяк Ю.Ф., Зайцев М.В. и др. Основные результаты создания и газодинамических исследований последней ступени турбин К-500-240 и К-1000-60-1500 / Теплоэнергетика. – 1978. – N8. – С.2-7.
5. Левченко Е.В., Галацан В.Н., Сухинин В.П., Аркадьев Б.А. Турбины нового поколения НПО "Турбоатом"/ Теплоэнергетика. – 1993. – №5. – С.22-29.
6. Зайцев М.В., Левченко Е.В., Аркадьев Б.А. Выбор варианта паровой турбины в зависимости от условий ее работы / Теплоэнергетика. – 1996. – №3. – С.64-67.
7. Левченко Е.В., Сухинин В.П., Аркадьев Б.А. и др. Разработка последних ступеней паровых турбин НПО "Турбоатом" /Теплоэнергетика. – 1994. – №4. – С. 7-11.
8. Зайцев М.В., Слабченко О.Н. Модернизация ЦНД турбин К-300-240 электростанций Украины / Энергетика и электрификация. – 1996. – №4. – С. 6-9.

© Зайцев М.В., Слабченко О.Н., Шведова Т.И., 2005