

---

*на правах рукописи*

ОСИПОВ Александр Вадимович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО  
ОТБОРНОГО ОТСЕКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашинны и комбинированные турбоустановки

*Автореферат*

*диссертации на соискание ученой степени*

*кандидата технических наук*

Санкт-Петербург 2002

Работа выполнена в Брянском государственном техническом университете.

Научный руководитель – Засл. деятель науки и техники РФ,  
доктор техн. наук, профессор В.Т. Буглаев.

Официальные оппоненты: – Засл. деятель науки РФ,  
доктор техн. наук, профессор А.И. Кириллов,  
– кандидат техн. наук В.Д. Гаев.

Ведущая организация: – ОАО «Калужский турбинный завод».

Защита диссертации состоится « 26 » ноября 2002 года в 16 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, главное здание, ауд. 251.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «      » октября 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.06,  
доктор технических наук, профессор

Н.Н. Кортиков

## **Общая характеристика работы**

Актуальность проблемы. Перспективным направлением в развитии теплофикации является использование паровых турбин для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. В этих турбинах важное место занимают околоотборные двухступенчатые отсеки.

За последнее десятилетие во всем мире наблюдается значительный рост числа и общей установленной мощности парогазовых установок. Паровые турбины таких установок могут выполняться с отборами пара на теплофикационные цели. Для обеспечения их высокой маневренности применяется дроссельно-байпасное парораспределение с перепуском части пара в байпасную камеру (БК), выполненную в корпусе турбины между ступенями.

Отбор потока пара из проточной части турбины или его подвод влияют на работу примыкающих к камере ступеней, что связано с окружной и радиальной неравномерностью параметров потока в проточной части турбины, сложным характером течения в межобойменном зазоре и в самой камере. При этом экономичность и вибрационная надежность ступеней снижается.

Анализ экспериментальных и теоретических данных показал, что влияние конструктивных и режимных параметров на работу двухступенчатых отсеков с отбором (подводом) рабочего тела (РТ), имеющих важное значение для рабочего процесса паровых турбин, продолжает оставаться малоизученным, а в отдельных случаях и противоречивым. Поэтому экспериментальные исследования влияния отбора (подвода) РТ на экономичность отсеков паровых турбин и их совершенствование остаются актуальными и представляют практический интерес.

Цель работы – повышение экономичности отсеков паровых турбин с отбором (подводом) РТ при переменных режимах работы околоотборных ступеней (ОС). Для достижения этой цели потребовалось:

1. Разработать методику аэродинамических исследований модельных двухступенчатых отсеков с отбором (подводом) РТ.

2. Создать универсальный экспериментальный стенд с комплексом измерительных приборов.

3. Разработать программу определения суммарных характеристик ОС, потерь энергии в межступенчатых зазорах (МСЗ) и камерах отбора (КО) для различных моделей отсеков.

4. Провести исследование структуры потока в МСЗ отсеков.

5. Исследовать влияние подвода потока РТ на работу ступеней байпасного отсека.

6. На основе анализа выполненных исследований предложить практические рекомендации по модернизации конструкций двухступенчатых отсеков.

Методика проведения исследований. Решение поставленных задач выполнялось с использованием разработанной программы проведения экспериментов для изучения суммарных характеристик моделей ступеней в изолированных условиях и при совместной их работе в отсеках и анализа структуры потока в характерных сечениях ступеней и КО теплофикационных паровых турбин.

Достоверность результатов исследований. Методика проведения опытов основана на теории подобия и подтверждается тестовыми экспериментами. Точность измерений опытных данных и корректность методов их обработки соответствуют литературным источникам по данному вопросу, что подтверждается сопоставлением данных с результатами работ других исследователей.

Научная новизна работы заключается

- в предложенной методике выявления влияния конструктивных и режимных факторов на экономичность ступеней, прилегающих к КО (подвода) РТ;
- в результатах экспериментальных исследований, устанавливающих влияние конструктивных и режимных факторов на структуру потока в проточной части турбины и изменение экономичности работы ОС;
- в исследовании влияния подвода РТ на суммарные характеристики околобайпасных ступеней.

Практическая ценность работы.

Проведена модернизация экспериментальной двухступенчатой установки для исследования влияния нерегулируемых отборов и подвода РТ.

Предложены рекомендации по модернизации отсеков паровых турбин, работающих с отбором (подводом) пара; получены авторские свидетельства и патент на изобретение.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых и модернизации эксплуатируемых турбин, оснащенных отсеками с отбором (подводом) РТ. Результаты представленных в диссертации исследований приняты

к внедрению ОАО ТМЗ, разрабатывающим серию теплофикационных турбин.

Автор защищает:

- результаты анализа как известных, так и предложенных автором конструкций отсеков турбин с отбором (подводом) РТ и рекомендации по их практическому усовершенствованию;
- разработанную методику для выполнения экспериментальных исследований моделей двухступенчатых отсеков турбин;
- результаты экспериментальных исследований двухступенчатых отсеков по выявлению влияния режимных параметров и конструктивных факторов на экономичность ОС и на структуру потока в МСЗ;
- результаты экспериментальных исследований по выявлению влияния подвода РТ на экономичность ступеней байпасного двухступенчатого отсека;
- разработанные и экспериментально апробированные рекомендации по усовершенствованию конструкции отсеков паровых турбин с отбором (подводом) РТ.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского коллектива Брянского государственного технического университета, на Всесоюзной научно-технической конференции МВ и ССО СССР МВТУ (Москва, 1987 г.), на Всесоюзной межвузовской конференции «Газотурбинные и комбинированные установки» (Москва, 1991 г.) и др.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, 3 авторских свидетельствах и патенте на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 100 наименований, содержит 138 страниц текста, включая 50 рисунков и 4 таблицы.

### **Краткое содержание работы**

В первой главе приведен обзор теоретических и экспериментальных работ по исследованию отсеков паровых турбин с нерегулируемым отбором пара и по проблемам совершенствования их конструкции.

Наибольшее число работ, посвященных влиянию небольших по расходу отборов пара (до 18% от расхода через предотборную ступень) выполнено в НПО ЦКТИ, ВТИ, АО ЛМЗ, ОАО ТМЗ, ОАО КТЗ, АО ХТЗ, СПбГТУ (ЛПИ), МЭИ,

БГТУ(БИТМ) и др. Однако выполнено лишь ограниченное число исследований по определению влияния больших нерегулируемых отборов на аэродинамические характеристики ОС и отборных отсеков, а также на структуру потока в КО. Отсутствуют работы, посвященные определению влияния подвода РТ в проточную часть турбины на характеристики ступеней байпасного отсека.

Анализ литературных данных позволяет установить следующие, недостаточно изученные проблемы нерегулируемых отборов:

- оценка влияния режимов работы на экономичность и надежность работы ОС;
- поиск путей совершенствования систем отборов с целью снижения сопротивления отборного тракта и обеспечения минимального влияния отборов на условия эффективной работы ОС;
- разработка новых лопаточных аппаратов, минимально чувствительных к нарушениям условий работы, обусловленным отборами.

Усовершенствование аэродинамических характеристик отборных отсеков и их составных частей можно достичь путем установки диффузоров за рабочим колесом (РК) предотборной ступени (ступени 1) и на входе в КО с целью использования кинетической энергии и повышения эффективной выработки электроэнергии на базе теплового потребления; надлежащим профилированием входных обтекателей, периферийного и корневого меридиональных обводов направляющего аппарата (НА) послеотборной ступени (ступени 2); применения сопловых аппаратов послеотборных ступеней, слабо реагирующих на сильные изменения входных условий при переменных режимах работы отборных отсеков.

Указанные направления требуют детального экспериментального исследования при определении оптимального варианта для каждой конкретной конструкции отборного отсека.

Во второй главе рассматривается методика проведения эксперимента, дается описание экспериментальной установки, моделей ступеней и экспериментальных отсеков.

Экспериментальные исследования моделей двухступенчатых отсеков проводились на опытной установке лаборатории кафедры «Турбины и теплоэнергетика» БГТУ, широко известной научной общественности из наших публикаций в ряде предшествующих работ.

Опыты проводились при значениях чисел Маха  $M_{C_{1t}} = 0,4 \dots 0,45$  и

Рейнольдса  $Re_{C_{1t}} = (3,5...4) \cdot 10^5$ , определяемых по теоретической скорости в направляющем аппарате (НА) ступени 1. Указанные критерии, подсчитанные для средней расходной составляющей скорости потока на входе в МСЗ, составляли  $M_{KO} = 0,1...0,15$  и  $Re_{KO} = (3...3,5) \cdot 10^5$ .

Опытные двухступенчатые отборные отсеки *A* и *B* состояли из моделей ОС средней веерности и КО между ними с односторонним отбором РТ. В отсеке *A* отбор осуществлялся через два патрубка, в отсеке *B* – через один.

Экспериментальное исследование влияния конструктивных факторов и режимных параметров на структуру потока в проточной части отборных отсеков осуществлялось путем траверсирования.

Траверсирование потока в полуторном отсеке *B* осуществлялось с помощью установки (техн. решение защищено авторским свидетельством на изобретение), позволяющей с высокой точностью производить измерения параметров пространственного потока в сечениях МСЗ и за НА ступени 2. Полуторный отсек отличался от двухступенчатого отборного отсека отсутствием РК ступени 2. Последнее имитировалось сопротивлением, выполненным в виде тонкого диска с профилированными окнами с острой кромкой.

Опытный двухступенчатый байпасный отсек *B* состоял из двух необандаженных ступеней средней веерности и байпасной камеры (БК) между ними с односторонним подводом РТ через один патрубок.

Для определения суммарных характеристик околоотборных и околобайпасных ступеней необходимо располагать осредненными значениями параметров потока в контрольных сечениях. Так как эти отсеки характеризуются окружной и радиальной неравномерностью потока, то для определения его осредненных параметров необходимо подробно траверсировать поток в контрольных сечениях как по радиусу, так и по окружности.

Вследствие этого процесс определения суммарных характеристик отборного и байпасного отсеков производился в несколько этапов:

1. Экспериментальные исследования двухступенчатого отсека с целью получения суммарных аэродинамических характеристик его элементов по параметрам потока в контрольных точках.

2. Траверсирование потока в контрольных сечениях (на выходе из ступени 1 и на входе в ступень 2).

3. Приведение полей распределения параметров потока, полученных в ходе траверсирования, к соответствующему режиму при определении суммарных характеристик по параметрам в контрольной точке.

4. Осреднение приведенных параметров потока в контрольных сечениях.

5. Установление эмпирической зависимости между осредненными параметрами в контрольных сечениях и параметрами потока в контрольных точках с определением расчетным путем действительных средних значений параметров потока на режимах снятия суммарных характеристик.

6. Конечный расчет действительных суммарных аэродинамических характеристик элементов отсека по действительным средним параметрам потока.

Такой подход, предусматривающий определенную последовательность проведения испытаний одних и тех же элементов проточной части в изолированных условиях и при совместной работе в соответствующих модельных отсеках, обеспечивает получение достаточно корректных аэродинамических характеристик ступеней и КО (БК), дает возможность предложить способы совершенствования соответствующих конструкций.

В третьей главе анализируются результаты исследований влияния больших отборов РТ и режима работы ступени  $I$  на экономичность ОС и структуру потока в МСЗ для отсеков  $A$  и  $B$  с изменяющейся конструкцией проточной части. Экспериментально устанавливалось влияние МСЗ, величины и расположение кольцевой щели отборного тракта, корневого и периферийного обводов проточной части, а также степени загромождения проходных сечений КО фланцами обойм диафрагм. Для отсека  $B$  исследовано влияние подвода РТ в проточную часть турбины на экономичность ступеней байпасного отсека.

*Отсек А.* Модель отборного отсека  $A$  характеризуется наличием отрицательной корневой перекрыши на входе в ступень 2, слабым раскрытием проточной части у периферии и отношением  $l_{12}/l_{21} \approx 1,1$  высот лопаток НА ступени 1 и РК ступени 2.

На рис.1 представлены опытные характеристики максимального относительного внутреннего КПД околоотборных ступеней  $\eta'_{1\max}$  и  $\eta'_{2\max}$  в зависимости от расхода РТ в отбор  $\bar{G}_m$  и величины относительного МСЗ  $\bar{\Delta}_z = \Delta_z/l_{21}$  отсека  $A$ .

Из полученных зависимостей максимального КПД  $\eta'_{1\max}$  от  $\bar{\Delta}_z$  при различных  $\bar{G}_m$  видно, что изменение расстояния между ОС оказывает



одинаковое влияние как на безотборном режиме, так и при наличии отбора РТ. Изменение  $\bar{\Delta}_z$  от 1 до 0,5 не сопровождается сколько-нибудь значительным снижением  $\eta'_{1\max}$ , а при дальнейшем уменьшении  $\bar{\Delta}_z$  КПД ступени 1 снижается более интенсивно. Причем на безотборном режиме указанное снижение  $\eta'_{1\max}$  достигает величины 2,8%.

Указанный факт можно объяснить тем, что КПД ступени 1  $\eta'_1$  в опытах вычислялся по перепаду энтальпий от полного на входе в ступень 1 до статического давления на входе в ступень 2. Поэтому КПД  $\eta'_1$  учитывает степень использования выходной кинетической энергии из ступени 1 при прохождении сквозным потоком МСЗ. Очевидно, именно использование выходной кинетической энергии и обуславливает в большей степени изменения КПД  $\eta'_1$  при различных конструктивных и режимных параметрах. Заметное влияние на экономичность ступени 1 при малых  $\bar{\Delta}_z$  оказывает наличие отрицательной корневой перекрыши на входе в ступень 2.

Опытные зависимости  $\eta'_{2\max} = f(\bar{\Delta}_z)$  для ступени 2, полученные при работе ступени 1 на оптимальном режиме, показывают, что при изменении расстояния между ступенями и отбора РТ, характеристики ступени 2 претерпевают большие изменения, в сравнении со ступенью 1 (рис.1). Это обусловлено изменением указанных параметров на входе в ступень 2, что отражается практически на всех составляющих потерь энергии в ступени 2. Наиболее заметное влияние изменения отбора РТ на КПД  $\eta'_{2\max}$  наблюдается при  $\bar{\Delta}_z = 0,25$ . В исследованном диапазоне режимов работы изменение величины  $\eta'_{2\max}$  достигает значения 3%.

Влияние отбора РТ на характеристики  $\eta'_{2\max}$  может быть объяснено следующими обстоятельствами. Возрастающее  $\bar{G}_m$  от 0 и до 0,2...0,3 улучшает условия входа потока в ступень 2 у корня, снижая интенсивность корневого отрыва, имеющего место в исследуемой ступени при работе на безотборном режиме. Вследствие повышения радиальных составляющих скоростей во входном сечении ступени 2, происходит заполнение потоком ее периферийной области, слабо нагруженной на безотборном режиме. При больших отборах вырастают потери энергии в ступени 2, связанные с искажением структуры потока на входе в неё.

Испытания отсека *A* при оптимальном МСЗ  $\bar{\Delta}_z \text{ opt} = 0,75$  показали, что на безотборном режиме закрутка потока на выходе из ступени *1* оказывает относительно небольшое влияние на эффективность ступени *2* (рис.2). Изменение  $\alpha_{21cp}$  в диапазоне от  $120^\circ$  до  $30^\circ$  сопровождается изменением КПД  $\eta'_{2\text{max}}$  ступени *2* на величину около 4,5%. С увеличением отбора закрутка потока оказывает все более значительное влияние на эффективность ступени *2*. Указанное изменение режима работы ступени *1* при  $\bar{G}_m = 0,42$  сопровождается значительным снижением КПД  $\eta'_{2\text{max}}$  (на 12%). Результаты испытаний ступени *2* показывают, что наибольшей величины КПД достигает при осевом выходе потока из ступени *1*, при этом его значения практически не зависят от величины отбора.

*Отсек Б.* В процессе испытаний отсека *Б* (проточная часть в МСЗ выполнена с равными корневыми диаметрами ОС, умеренным раскрытием обводов у периферии и отношением высот, составляющим  $l_{12}/l_{21} = 1,16$ ).

Эксперименты показывают, что изменение МСЗ  $\bar{\Delta}_z$ , а также размеры кольцевой щели  $\bar{\Delta}_{ш}$  в исследованном диапазоне режимов существенно не сказывается на КПД ступени *1*.

Как следует из графиков, представленных на рис.3, с увеличением МСЗ от  $\bar{\Delta}_z = 0,35$  до  $\bar{\Delta}_z = 0,75$  происходит снижение максимального КПД  $\eta'_{2\text{max}}$  ступени *2* приблизительно на 0,8% независимо от величины отбора РТ. Указанное влияние величины МСЗ на экономичность ступени *2* в наибольшей мере обусловлено изменением доли использования кинетической энергии потока, вытекающего из ступени *1*, и потерями энергии на пути между ступенями.

На рис.4 представлены зависимости изменения максимального КПД ступени *2* от величины отбора РТ  $\eta'_{2\text{max}} = f(\bar{G}_m)$  при различных режимах работы ступени *1*, характеризующихся изменением угла закрутки потока  $\alpha_{21cp}$ .

Экспериментально установлено, что повышение КПД ступени *2* при небольших значениях отбора ( $\bar{G}_m = 0,12$ ) обусловлено формой периферийного обвода проточной части (её раскрытием), отводом из проточной части потока, деформированного утечкой через радиальный зазор ступени *1*, и уменьшением потерь в периферийной зоне ступени *2*. Дальнейшее увеличение расхода в отбор приводит к падению статического давления в сечении на входе в ступень *2* вследствие отклонения линий тока к наружному обводу ступени, особенно

резкого в периферийной зоне, и увеличению окружной неравномерности параметров потока.

Как следует из графиков (рис.4), при режимах с отборами РТ до  $\bar{G}_m = 0,12$  зависимости  $\eta'_{2\max} = f(\bar{G}_m)$  имеют сходный характер, причем при небольшой закрутке потока за ступенью 1, соответствующей изменению угла  $\alpha_{21cp}$  от  $90^\circ$  до  $70^\circ$ , эффективность ступени 2 не меняется. С увеличением закрутки потока за ступенью 1 эффективность ступени 2 снижается: при отборах до  $\bar{G}_m = 0,12$  и при закрутке потока  $\alpha_{21cp} = 50^\circ$  снижение максимального КПД ступени 2 составило около 0,4 %. С увеличением отбора закрутка потока за ступенью 1 оказывает все большее влияние на эффективность ступени 2. Так, при  $\bar{G}_m = 0,25$  и  $\alpha_{21cp} = 50^\circ$  снижение КПД  $\eta'_{2\max}$  ступени 2 составило уже 0,8%. Анализ результатов испытаний отсека Б показывает, что влияние режима работы ступени 1 проявляется более ощутимо при малых расстояниях  $\bar{\Delta}_z$ .

Результаты испытаний отсека Б, представленные на рис.5 в виде зависимостей  $\eta'_2 = f(x_2)$ , показывают, что КПД ступени 2 зависит от геометрии кольцевой щели отборного узла. Увеличение отношений  $\Delta_{щ} / \Delta_z$  и  $\Delta_{щ} / h$  (где  $h$  – толщина обойм диафрагм) приводит к снижению  $\eta'_2$  на 0,8% при работе ступени 1 на близком к оптимальному режиме. При наличии закрутки ( $\alpha_{21cp} = 50^\circ$ ) влияния размеров кольцевой щели на эффективность ступени 2 практически не наблюдается.

Анализируя результаты испытаний различных вариантов отсека Б, следует отметить, что при небольших значениях  $\Delta_{щ} / \Delta_z$  и  $\Delta_{щ} / h$  циркуляционное течение в МСЗ практически не проникает в большой объем КО и разрыв периферийной ограничивающей поверхности не приводит к существенному изменению структуры потока в МСЗ. При увеличении отношений  $\Delta_{щ} / \Delta_z$  и  $\Delta_{щ} / h$  взаимодействие основного потока с рабочим телом в КО приводит к снижению эффективности работы ступени 2 (рис.5).

При исследовании отсека Б получены зависимости полных потерь энергии в отбираемом потоке  $\zeta_{ко}$  от режимов работы ступени 1  $x_1 = (u/C_0)_1$  для различных вариантов испытанного отсека (рис.6). Они показывают, что наиболее значительное влияние на потери оказывает изменение МСЗ  $\bar{\Delta}_z$  при неизменной

геометрии кольцевой щели. Увеличение МСЗ  $\bar{\Delta}_z$  и уменьшение загромождения КО фланцами приводит к снижению потерь энергии в отбираемом потоке при прохождении им МСЗ, а также при входе в кольцевую щель и в месте разделения отбираемого и сквозного потоков.

*Отсек В.* Модель байпасного отсека *В* была составлена из двух ступеней с высотой лопаток  $l_{21} = 71,2$  мм,  $l_{12} = 70$  мм, с отношением корневых диаметров  $d'_{12} / d'_{21} = 1,25$ , что определяло значительное раскрытие проточной части у периферии и приводило к большой отрицательной корневой перекрыше на входе потока в ступень 2.

Экономичность отсека турбины с отбором и подводом РТ зависит от рациональной организации течения в тракте отбора (подвода) РТ. В работе были проведены исследования по определению влияния корневого обтекателя на характеристики ступеней базового варианта байпасного отсека с отбором РТ. Испытания проводились на двух режимах работы отсека при  $\bar{G}_m = 0$  и  $0,27$ .

Результаты исследования отсека *В* представлены на рис.7 в виде зависимостей  $\eta'_2 = f(x_2)$ . Как следует из рассматриваемых графиков, наличие корневого обтекателя оказывает положительное влияние на эффективность работы ступени 2 как при безотборном режиме работы ( $\Delta\eta'_{2\max} \approx 1,8\%$ ), так и на режиме с отбором  $\bar{G}_m = 0,27$  ( $\Delta\eta'_{2\max} \approx 3,5\%$ ).

Выполненные исследования влияния частичного подвода РТ в МСЗ из БК на аэродинамические характеристики прилегающих к ней ступеней показали, что экономичность ступени 1 при максимальном из исследованных режимов работы по величине  $\bar{G}_n = 0,3$  снижается приблизительно на 1%, а для ступени 2 это снижение достигает 1,7%. Вместе с тем КПД двухступенчатого отсека на режиме с подводом РТ  $\bar{G}_n = 0,3$  снижается на 2,5%, так как на экономичность работы отсека в большей мере оказывает влияние ступень 2.

В четвертой главе на основе проведенных экспериментов обосновываются рекомендации по совершенствованию конструкций отсеков турбин с отбором (подводом) РТ.

Для повышения экономичности турбоустановки путем уменьшения потерь энергии в отборном тракте предложена конструкция КО (техн. решение защищено авторским свидетельством), содержащая кольцевой диффузорный канал, соединяющий проточную часть турбины со сборной камерой. Наружный

обвод диффузорного канала выполнен с возможностью осевого перемещения относительно статора турбины, что обеспечивает изменение площади проходных сечений кольцевого канала на частичных режимах работы турбоустановки и лучшую организацию течения в нем.

Предложена конструкция цилиндра паровой турбины (техн. решение защищено авторским свидетельством), которая позволяет повысить его экономичность и надежность за счет того, что фланцы продольного разъема обойм диафрагм выполнены в плоскости симметрии выпускных патрубков. В этой конструкции поток пара не встречает на своем пути зауженных фланцами участков, что исключает образование вихревых зон под фланцами и не приводит к дросселированию потока на этих участках.

Также предложено техническое решение (защищено патентом), позволяющее повысить маневренность турбоустановок за счет расширения диапазона переменных режимов работы при использовании одного и того же элемента конструкции кольцевой сборной камеры как для подвода, так и для отбора пара.

На основе проведенных исследований были предложены мероприятия по улучшению работы базовых отборных отсеков паровых турбин серии Т-185/220-130-4, Т-250/300-240 и ПГУ-130 производства Уральского ТМЗ.

В модернизированном отборном отсеке турбины Т-185/220-130-4 расстояние между ступенью 1 и ступенью 2 согласно опытным данным выполнено равным  $\Delta_z = 0,7l_{21}$ . В базовом варианте  $\Delta_z = 1,2l_{21}$ .

С целью снижения негативного влияния взаимодействия основного потока пара, проходящего из ступени 1 в ступень 2, с вихревыми массами застойной зоны у ротора турбины в корневом сечении НА ступени 2 установлен козырек-обтекатель.

Для лучшей организации течения отбираемого потока на входе в КО в межобойменном зазоре установлен радиально-диагональный диффузор. При этом ширина межобойменного зазора составляет  $\Delta_{\text{ш}} = 0,4l_{21}$ , а удаление его переднего края от выходных кромок РК ступени 1 –  $\Delta_1 = 0,2l_{21}$ , что также согласуется с результатами исследования модельного отсека. Предложенные мероприятия по модернизации базового отборного отсека паровой турбины Т-185/220-130-4 уменьшают общую неравномерность потока пара в нем, приводят к росту КПД отсека и снижению потерь в отбираемом потоке. Для усовершенствованного отборного отсека цилиндра среднего давления турбины

Т-185/220-130-4 ожидаемое увеличение КПД составляет  $\Delta\eta'_{отс} \approx 3\%$ , снижение потерь энергии в отбираемом потоке пара  $\Delta\zeta_{ко} \approx 0,65$ .

На основе анализа результатов исследования модельного отсека турбины Т-250/300-240 можно предложить пути усовершенствования конструкции базового варианта турбины. Оптимальное значение МСЗ составляет  $\Delta_z = (0,5 \dots 0,7)l_{21}$  и обеспечивает наименьшее изменение КПД ступени 2 в достаточном для эксплуатации диапазоне режимов работы отсека как по величинам отбора  $\bar{G}_m$ , так и по закрутке  $\alpha_{21cp}$  потока за ступенью 1.

Для устранения неблагоприятного влияния отрицательной перекрыши на входе в ступень 2 у корня НА ступени 2 следует использовать обтекатель. Снижение окружной и радиальной неравномерности потока, генерируемой системой отбора, может быть обеспечено установкой в межбойменном зазоре отборного отсека радиального диффузора со следующими геометрическими параметрами:  $\Delta_{щ} = 0,4l_{21}$ ;  $\Delta_1 = 0,3l_{21}$ . Ожидаемое повышение КПД модернизированного отборного отсека турбины Т-250/300-240 при этом может составить  $\Delta\eta_{отс} \approx 2,5\%$ .

Предложения по модернизации отсека паровой турбины ПГУ-130 заключается в следующем: оптимальный МСЗ составляет  $\Delta_z = 2l_{21}$ , что совпадает с базовым вариантом. Аналогично отсекам А и В здесь организация течения в прикорневой и периферийной зонах обеспечивается установкой обтекателя и радиального диффузора. Установка этих устройств позволяет поднять КПД ступени 2 соответственно на 2,5% и 0,9%.

В диссертации предложена методика обеспечения оптимальной конструкции проектируемых отборных отсеков паровых турбин, выявлено взаимное влияние некоторых конструктивных факторов и режимных параметров, влияющих на эффективность работы отсека на переменных режимах. Для этой цели представлены обобщающие зависимости, показывающие влияние на КПД ступени 2 таких факторов как величина закрутки потока  $\alpha_{21cp}$ , величина отбора пара  $\bar{G}_m$  с изменением МСЗ  $\bar{\Delta}_z$  при различиях в конструкциях отборных отсеков А и В.

### **Основные результаты работы**

1. Опыты показали, что отбор РТ из проточной части двухступенчатых отсеков практически не влияет на экономичность предотборной ступени.
2. С увеличением отбора существенно повышаются потери в МСЗ и КО.

Так, в отсеке *A* увеличение  $\bar{G}_m$  от 0,12 до 0,42 сопровождалось ростом коэффициентов потерь в МСЗ  $\zeta_{МСЗ}$  от 0,1 до 0,4 и в КО  $\zeta_{КО}$  от 1,4 до 2,5 при оптимальном режиме работы предотборной ступени.

3. В исследованных отборных отсеках при работе ступени *1* на режимах, близких к оптимальным, обнаружено различное влияние на экономичность ступени *2* количества отбираемого РТ. Степень этого влияния определяется конструктивными параметрами исследованных отсеков. Так, в отсеке *A* не наблюдалось влияния отбора РТ тела на КПД  $\eta'_{2\max}$  ступени *2* в диапазоне изменения  $\bar{G}_m$  от 0 до 0,42. В отсеке *B* отмечено повышение КПД ступени *2* при увеличении расхода в отбор от 0 до 0,12, а при дальнейшем росте  $\bar{G}_m$  до 0,25 изменения КПД ступени *2* не обнаружено.

4. Влияние закрутки потока за предотборной ступенью на КПД послеотборной ступени возрастает с увеличением отбора РТ между ступенями. Так например, в отсеке *A* при изменении угла закрутки  $\alpha_{21cp}$  от 30° до 120° КПД ступени *2* снижается при  $\bar{G}_m = 0$  приблизительно на 4,5% , а при  $\bar{G}_m = 0,42$  – на 12% . В отсеке *B* при изменении  $\alpha_{21cp}$  от 90° до 50° КПД  $\eta'_{2\max}$  снижается при  $\bar{G}_m = 0$  и 0,12 на 0,4%, а при  $\bar{G}_m = 0,25$  – на 0,8%.

5. Оптимальное значение МСЗ зависит от формы обводов проточной части, местоположения и размеров отборной щели, а также от режимов работы как для отборного, так и для байпасного отсеков.

6. В целях повышения экономичности двухступенчатых отборных отсеков следует рекомендовать:

- на стадии проектирования принимать меры по ограничению (до  $\alpha_{21cp} = 50...60^\circ$ ) закрутки потока за предотборной ступенью в пределах рабочего диапазона переменных режимов работы;
- для отвода отбираемого рабочего тела применять диффузоры, в частности, с возможностью осевого перемещения обводов диффузора;
- располагать плоскость разъема фланцевых соединений обойм диафрагм в плоскости симметрии патрубка (патрубков) отбора;
- в отсеках типа *B* выбирать ширину кольцевой щели, соединяющей МСЗ с КО, такой, чтобы площадь ее проходного сечения была приблизительно равна ометаемой площади РК ступени *1*. При этом щель

следует располагать по возможности ближе к НА ступени 2.

7. Экспериментальные исследования показали, что послебайпасная турбинная ступень в значительной степени определяет экономичность работы всего отсека на режимах работы с максимальным подводом РТ между ступенями. Работа этой ступени может быть улучшена за счет повышения однородности потока на входе в НА.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. А.с. 1325171 СССР, МКИ<sup>3</sup> F 01 D 25/30. Камера отбора паровой турбины / И.Г. Гоголев, Р.В. Кузьмичев, А.А. Кочегаров и А.В. Осипов (СССР).– 2с.:ил.
2. А.с. 1495443 СССР, МКИЗ F01 D 9/00, 25/30. Цилиндр паровой турбины / И.Г. Гоголев, Р.В. Кузьмичев, А.А. Кочегаров и А.В. Осипов (СССР).– 4с.:ил.
3. А.с. 1716174 СССР, МКИЗ F 01 D 15/00, 1992. Установка для исследования параметров потока в отсеках турбин / И.Г. Гоголев, Р.В. Кузьмичев, А.А. Кочегаров, А.В. Осипов и В.А. Дьячков (СССР).– 7 с.:ил.
4. Буглаев В.Т., Гоголев И.Г., Осипов А.В. Интегральные характеристики турбинных ступеней и двухступенчатого байпасного отсека // Энергосбережение и водоподготовка, 2002.– №1. – С.35-40.
5. Буглаев В.Т., Осипов А.В. Совершенствование конструкций отборных отсеков теплофикационных паротурбинных установок // Справочник. Инженерный журнал, 2002.– №8. – С 9-11.
6. Гоголев И.Г., Кочегаров А.А., Кузьмичев Р.В., Осипов А.В. Обоснование способа и методика осреднения неравномерного пространственного потока в проточной части турбомашин // Изв. вузов. Энергетика, 1990. – №8. – С. 67-71.
7. Гоголев И.Г., Перевезенцев В.Т., Тарасов В.В., Осипов А.В. Исследование пространственной структуры потока в камере отбора теплофикационной паровой турбины // Теплоэнергетика, 1979.– №3. – С.48-51.
8. Пат. 2001289 России, МКИЗ F 01 D 25/30, 1993.
9. Гоголев И.Г., Кочегаров А.А., Кузьмичев Р.В., Осипов А.В. Структура потока в межступенчатом зазоре отборного отсека паровой турбины // Тез. докл. и сообщений Всесоюзная науч.-техн. конференция МВ и ССО СССР. Тез. докл. и сообщений . МВТУ.– М.,1987. – С.73.
10. Гоголев И.Г., Кочегаров А.А., Кузьмичев Р.В., Осипов А.В. Экспериментальное исследование отсеков турбин с отбором рабочего тела



между ступенями // Всесоюзная межвузовская конференция. Газотурбинные и комбинированные установки. Тез. докл. МГТУ. – М., 1991. – С.60.

ОСИПОВ

Александр Вадимович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО  
ОТБОРНОГО ОТСЕКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

*Автореферат*

---

---

Лицензия №020381 от 24.04.97. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Уч. - изд. л. 1,0. Т. 100 экз.

---

---

Брянский государственный технический университет.

241035 Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, 7.

Лаборатория кафедры «Турбины и теплоэнергетика», ул. Институтская, 16.