

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента Шемпелева Александра Георгиевича**  
**на диссертационную работу**  
**Мурманского Ильи Борисовича**  
**«Совершенствование многоступенчатых пароструйных эжекторов кон-**  
**денсационных установок паровых турбин»,**  
**представленную на соискание ученой степени кандидата технических**  
**наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные**  
**турбоустановки**

На рассмотрение представлена диссертация, состоящая из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 176 страницах основного текста, включая 12 таблиц, 50 рисунков и библиографический список литературы, насчитывающий 141 наименование.

Целью работы в формулировке автора является совершенствование многоступенчатых пароструйных эжекторов для повышения экономичности и надёжности конденсационных установок паровых турбин.

Ознакомление с содержанием диссертации, автореферата и опубликованных соискателем работ позволяет сделать следующее заключение.

**1.Актуальность работы**

Диссертационная работа посвящена проблеме совершенствования многоступенчатых пароструйных эжекторов конденсационных установок паровых турбин на основе анализа и обобщения результатов испытаний пароструйных эжекторов различных типоразмеров и исследований газодинамических процессов в струйных аппаратах и их промежуточных охладителях. Актуальность работы подтверждается тем, что эффективная и надёжная работа основных эжекторов по поддержанию глубокого вакуума в конденсаторах во многом определяет эффективность работы конденсатора и турбоустановки в целом, при этом очень важна согласованность характеристик основного эжектора и конденсатора. Особенно важно такое согласование для теплофикационных паротурбинных установок, конденсаторы которых длительно эксплуатируются при пониженных тепловых нагрузках.

Кроме того, по многочисленным эксплуатационным данным, присосы воздуха в вакуумную систему турбоустановок, длительное время находящихся в эксплуатации, в несколько раз превышают нормативные значения, и в этом случае возникает необходимость переоснащения их новыми эжекторами большей производительности, обеспечивающими штатные условия эксплуатации турбоустановки при одном включенном эжекторе.

В диссертационной работе Мурманского И.Б. рассматривается довольно широкий круг решаемых задач, позволяющих рассчитывать и проектировать многоступенчатые пароструйные эжекторы на основе разработанных им методик, что также свидетельствует о несомненной ее актуальности.

## **2. Оценка содержания диссертации и степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

**Введение** содержит обоснование актуальности работы, описание цели, задач, научной новизны и практического значения работы.

**В первой главе** достаточно подробно проведен анализ типовых конструкций методик расчета и направлений совершенствования конструкций струйных аппаратов эжекторов. Также подробно проведен обзор газодинамических исследований процессов в газоструйных эжекторах, мероприятий по повышению эффективности их функционирования. Представлены существующие методики расчета газоструйных эжекторов. На основании проведенного анализа автор утверждает о необходимости разработки уточнённой методики расчёта, наиболее полно учитывающей все параметры газодинамических и теплофизических процессов в многоступенчатых пароструйных эжекторах, и разработки на ее основе новой, более современной конструкции многоступенчатого эжектора, учитывающей существующие недостатки серийных исполнений.

**Во второй главе** представлена разработка уточненной методики расчета многоступенчатых пароструйных эжекторов, на основе обобщения экспериментальных исследований 34х серийных эжекторов конденсационных установок ПТУ, анализа и обобщения геометрических характеристик серийных эжекторов, а также численного моделирования газодинамики в струйном аппарате эжектора. Выводы, сделанные по результатам исследований, представляются достаточно обоснованными.

**В третьей главе** представлены результаты разработки и экспериментальных исследований и промышленной апробации современного высокоэффективного эжектора для конденсационных установок ПТУ. Достаточно полно обоснована целесообразность разработки нового эжектора. Произведен корректный расчет эжектора по предложенной автором уточненной методике. Представлены новые технические решения, заложенные в конструкцию эжектора. В частности, предложены треугольно расположенные вертикальные выносные охладители, разработан узел закрепления сопла, позволяющий изменять осевое положение сопла (расстояние между соплом и диффузором). На основе разработанной схемы измерений, проведены экспериментальные исследования различных режимов функционирования высоко-

эффективного эжектора в составе конденсационной установки. Измерения при проведении экспериментов выполнены в полном объеме с достаточной точностью. Доказаны эффективность и преимущества функционирования разработанного эжектора по сравнению с эжекторами, выпускаемыми серийно.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований функционирования промежуточных охладителей эжектора. В процессе экспериментальных исследований эжектора ЭПО-3-80 зафиксирован газодинамический эффект повышения давления паровоздушной смеси в промежуточных охладителях эжектора. Автором предложена физико-математическая модель, описывающая полученный эффект как скачок давления в формируемой на входе в теплообменник двухфазной, двухкомпонентной смеси. Обоснована необходимость пересмотра и дальнейшего уточнения методики расчета многоступенчатых пароструйных эжекторов в части влияния газодинамических процессов в промежуточных охладителях на давление в последующих за ними ступенях. Выводы, сделанные по содержанию данной главы, обладают новизной и представляются весьма важными.

**В пятой главе** выполнена оценка технико-экономической эффективности функционирования конденсационных установок с новым эжектором. Оценка эффективности использования эжектора ЭПО-3-80 в составе турбоустановки К-200-130 ЛМЗ выполнена на основе ретроспективы отклонения фактического значения вакуума в конденсаторе от нормативной величины, при работе со штатным эжектором и новым эжектором. Использование нового эжектора позволило углубить вакуум в конденсаторе на величину  $\Delta V = 0,5\%$ , и получить экономический эффект 5 млн. руб./год. Показано также, что при повышенных присосах воздуха и повышении давления в конденсаторе теплофикационной турбины применение высокоэффективного эжектора целесообразно даже в режимах с полностью закрытой диафрагмой.

**В заключении** представлена развернутая оценка полноты решения поставленных задач и перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования.

Автореферат диссертации отражает суть проделанной соискателем работы и достаточно полно иллюстрирован.

В целом представленные в диссертации задачи решаются вполне убедительно и квалифицировано. В тоже время при анализе содержания диссертации у оппонента возникли следующие замечания

### 3. Замечания по диссертационной работе

1. В главе 1 на стр.45 указано: «Использование химочищенной воды также не рационально, т.к. её температура превышает 35-40°C, т.е. выше температуры основного конденсата на расчётных режимах работы турбоустановки. Следует отметить, что согласно СТО 02494733 5.4-02-2006 температура воды непосредственно после химводоочистки не должна превышать 25- 30 °С.

2. В главе 2. На странице 64 на основании данных, приведенных в таблице 2.4, сделан вывод: «Согласно приведённым данным во всех эжекторах завода УТЗ, а также эжекторах ЛМЗ, работающих на низких параметрах рабочего пара ( $P_{рп}=0,5$  МПа), диаметры критических сечений сопел от первой ступени к последней увеличиваются. В то же время у эжекторов ХТЗ и большинства эжекторов КТЗ диаметры критических сечений сопел от первой ступени к последней уменьшаются». Однако из данных, приведенных в таблице 2.4, следует противоположный вывод.

Здесь же указано: «Степени сжатия, напротив, от первой ступени к последней уменьшаются для эжекторов УТЗ и ЛМЗ». Иллюстраций к данному утверждению нет.

3. Из текста раздела 2.3 непонятно, какие геометрические соотношения струйного аппарата были приняты при проведении численного моделирования газодинамических процессов?

4. Почему в разделе 2.2 при численном моделировании газодинамики в струйном аппарате эжектора давление рабочего тела было принято 300 кПа, а не равным давлению рабочего пара существующих эжекторов – 490 или 510 кПа? Почему при проведении газодинамических расчетов рассмотрен только режим с недорасширением?

5. В главе 3 на стр. 87 приведена таблица 3.2, на которой показан пережоги топлива из-за повышения давления пара в конденсаторе и сделан вывод «Для уменьшения пережога топлива и приведения показателей функционирования конденсационной установки к нормативным значениям необходима разработка нового эжектора».

Что является причиной повышения давления? Такими причинами могут быть: загрязнения поверхностей теплообмена, присосы воздуха в вакуумную систему, несоответствие характеристик эжектора нормативным.

6. В главе 3 на стр. 91 Указано «По охлаждающему конденсату, охладители включены последовательно, что позволяет измерять температуры воды на входе и на выходе из каждого охладителя». У большинства существующих эжекторов охладитель первой ступени, по охлаждающему конденсату включен последовательно со второй и третьей ступеню которые, в свою

очередь, включены параллельно друг другу. Поясните, почему при разработке эжектора ЭПО-3-80 принято решение о последовательном соединении охладителей?

7. В главе 2 на стр. 78 сделан вывод «На основе обобщения данных о степенях сжатия от первой ступени эжектора к последней, для многоступенчатого эжектора определена стратегия изменения диаметров критических сопел. В частности, для эжектора конденсационной турбины принято, что диаметры критических сечений сопел необходимо увеличивать от первой ступени к последней». Почему во вновь разработанном эжекторе критический диаметр сопла второй ступени принят большим, чем критический диаметр третьей ступени?

8. На странице 111 Гл.3 сделан вывод «Увеличение температуры охлаждающего конденсата на входе в диапазоне  $t_{ок}=10-32^{\circ}\text{C}$  не влияет на производительность эжектора, при этом давление всасывания при максимальной производительности увеличивается на 0,5 кПа. Температура охлаждающего конденсата оказывает более значительное влияние на параметры работы промежуточных охладителей, а также II и III ступеней эжектора». Характеристики получены на сухом воздухе. По нашему мнению (у нас есть такой опыт) характер влияния температуры на показатели работы эжектора при более высоких температурах может существенно измениться при более высоких температурах конденсата ( $40-45^{\circ}\text{C}$ ) по причинам, изложенным автором в главе 5 на стр.135. Хорошо бы это проверить.

9. Одной из важнейших характеристик эжектора является расход рабочего пара и его распределение по ступеням. Однако нигде в диссертации эти величины расходов не указаны, что существенно затрудняет восприятие содержания 3, 4 и 5 глав. Проведенные нами ориентировочные расчеты показывают, что расход пара на эжектор ЭПО-3-80 составляет порядка 1355 кг/ч (1я ст.- 426 кг/ч, 2я ст. 503 кг/ч, 3я ст.426 кг/ч) при его давлении на входе 0,49 МПа, а при повышении рабочего давления до 0,86 МПа расход пара на эжектор составит уже 1800 кг/ч. Для сведения, расход пара на эжектор ЭП-3-700 при давлении рабочего пара 0,49 равен 875 кг/ч(два эжектора 1750 кг/ч).

10. На рисунке 5.1(стр. 134) представлена ретроспектива отклонения фактического значения вакуума в конденсаторе от нормативной величины. По данным, приведенным на рис 5.1, сделан вывод: «При включении в работу эжектора ЭПО-3-80 и отключении штатных серийных эжекторов отклонение вакуума уменьшилось в среднем на  $\Delta V=0,5\%$ ». С какой точностью производилась оценка данной величины и достаточна ли она для получения достоверного результата? Проводилось ли в процессе обработки экспери-

ментальных данных приведение результатов к одинаковым условиям измерения вакуума?

11. Одним из важнейших показателей эффективности работы конденсатора является его способность обеспечивать заданную ПТЭ концентрацию кислорода в конденсате на выходе из конденсатора. Как показали проведенные нами исследования, деаэрирующая способность конденсатора во многом определяется согласованностью характеристик эжектора и конденсатора. К сожалению, в работе не уделено внимания этим вопросам.

Указанные замечания не снижают ценность представленной работы, представляющей собой законченное научное исследование.

#### **4. Научная новизна**

Одним из главных достижений диссертанта в научном плане является обобщение связей между геометрическими параметрами и рабочими характеристиками многоступенчатых пароструйных эжекторов, а также разработка уточненной методики конструкторского и поверочного расчетов многоступенчатых пароструйных эжекторов в части уменьшения расходов рабочего пара.

Важным научным результатом является выявление газодинамического эффекта изменения давления паровоздушной смеси в промежуточных охладителях эжекторов и разработка физико-математической модели, описывающей повышение давления как скачок давления в формируемой на входе в теплообменник двухфазной, двухкомпонентной среде.

#### **5. Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность изложенных в диссертации основных научных и практических результатов обусловлена проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации теплоэнергетических установок с использованием стандартизированных методов и средств измерения. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчетов по уточненной автором методике с экспериментальными данными, а также хорошим согласованием результатов испытаний эжекторов с данными других авторов и успешной эксплуатацией разработанного эжектора ЭПО-3-80 в составе турбоустановки К-200-130 ЛМЗ

#### **6. Значимость результатов для науки и практики**

Научная и практическая значимость работы обусловлена

- Расширением возможностей разработки высокоэффективных пароструйных эжекторов, за счет использования предложенной автором уточненной методики их расчета.
- Обнаружением газодинамического эффекта изменения давления в промежуточных охладителях многоступенчатого эжектора.
- Разработкой технических решений, позволяющих повысить эффективность и надежность многоступенчатых пароструйных эжекторов на базе обоснованных мероприятий по совершенствованию их конструкций.
- Обобщением результатов промышленных испытаний 34 серийных эжекторов различных заводов-изготовителей.

Эффективность предложенных в работе научных подходов продемонстрирована путем разработки, изготовления и эксплуатации нового пароструйного эжектора, имеющего существенные преимущества перед выпускаемыми серийно.

Проведенные автором исследования в целом носят ярко выраженный прикладной характер. По результатам решения большинства поставленных в работе задач приведены соответствующие документы, подтверждающие практическое использование результатов работы.

## **7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертации соискателем опубликовано 33 печатные работы, в том числе 6 статей, опубликованных в научных журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, определенных ВАК (5 Scopus, 2 WoS), свидетельство о регистрации программного комплекса, патент на полезную модель, патент на изобретение, 2 учебных пособия для студентов. Полный список печатных трудов автора состоит из 47 работ.

## **Заключение**

Диссертация И. Б. Мурманского «Совершенствование многоступенчатых пароструйных эжекторов конденсационных установок паровых турбин», представляет собой завершенную научно-квалификационную исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, содержащую новые научно обоснованные технические и технологические разработки, обеспечивающие создание новых высокоэффективных многоступенчатых пароструйных эжекторов. По актуальности, объему и уровню выполненных исследований и полноте публикаций диссертация отвечает требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в п. 9 Положения о присуждении уче-

ных ступеней (Постановление Правительства №842 от 24. 09. 2013 г. в редакции от 28. 08. 2017 г.) к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук и соответствует паспорту специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки. Соискатель Мурманский Илья Борисович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки.

Доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры  
«Теплотехника и гидравлика»  
ФГБОУ ВО «ВятГУ»  
e-mail:[agshem@mail.ru](mailto:agshem@mail.ru)  
тел. 8-9



Шемпелев Александр Георгиевич

