

### ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Рогалева Андрея Николаевича  
на диссертационную работу Птахина Антона Викторовича

**«Исследование пусковых и переменных режимов воздушных конденсаторов  
и сухих градирен паровых турбин»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные установки

#### **Актуальность темы диссертации**

Традиционно паротурбинные и парогазовые установки тепловых и атомных электростанций оснащались классическими конденсационными установками, охлаждаемыми водой, забираемой из естественных или искусственных водоемов, или циркуляционной водой систем оборотного водоснабжения с градирнями. В связи со снижением доступности водных ресурсов, повышением стоимости их использования и ужесточением экологических требований все большее распространение в энергетике стали получать воздушные конденсационные установки (ВКУ). Стоит также отметить, что независимость от наличия источника охлаждающей воды дает преимущество в отношении возможных районов расположения энергоустановок. За последние 20 лет уменьшились и технологические ограничения – ВКУ стали применяться в том числе и для паротурбинных установок большой мощности, что существенно расширило сферу их использования.

В последние годы интерес к использованию ВКУ увеличился и в России. Целый ряд энергоблоков, в основном парогазовых, были построены с применением в качестве систем охлаждения воздушных конденсационных установок. Одной из важных особенностей использования ВКУ в России является их работа в зимнее время в условиях отрицательных температур, что существенно осложняет эксплуатацию этих установок и снижает уровень надежности, особенно в пусковых режимах работы.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка научно-обоснованных технических решений и рекомендаций по работе ВКУ в переменных режимах, обеспечивающих их надежную эксплуатацию при отрицательных температурах наружного воздуха.

### **Содержание работы**

Диссертационная работа Птахина А.В. включает в себя введение, шесть глав, заключение и список литературы.

В первой главе автором проведен анализ различных способов применения воздушного охлаждения для конденсации пара в парогазовых и паротурбинных установках тепловых электростанций. Проанализированы условия работы воздушных конденсационных установок и сухих градирен в установившихся и пусковых режимах работы, на основании чего сделан вывод о недостаточной проработанности вопросов, связанных с работой ВКУ при отрицательных температурах наружного воздуха. Проведен анализ существующих методик расчета работы конденсаторов паровых турбин, на основании которого сделан вывод о необходимости их адаптации для достоверного моделирования работы воздушных конденсаторов, особенно в переменных режимах работы.

На основе проведенного анализа сформулирована цель диссертационного исследования, заключающаяся в получении новых данных о режимах работы воздушных конденсаторов и сухих градирен, в том числе в условиях низких температур охлаждающего воздуха, для определения показателей их эффективности и разработки методики расчетов, а также для повышения надежности их эксплуатации.

Вторая глава диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям режимов прогрева воздушных конденсационных установок в период пуска при отрицательных температурах наружного воздуха. Экспериментальные исследования проводились на макете воздушного конденсатора. Исследованы варианты обогрева конденсатора перед пуском посредством подачи теплого воздуха и пара внутрь трубной системы, а также путем внешнего обдува теплообменной поверхности горячим теплоносителем. В

процессе эксперимента особое внимание уделено исследованию времени прогрева поверхности до безопасного для пуска уровня температуры и величине неравномерности прогрева теплообменных поверхностей. Измерения проводились как посредством установки термопар, так и термографированием с использованием тепловизионной съемки. На основе проведенных исследований различных вариантов обогрева установлено, что наиболее целесообразной является схема обогрева с внешним обдувом поверхности горячим паром и одновременной его подачей в трубную систему через коллектор сбора конденсата. Определено время прогрева конденсатора и время его охлаждения при отключении обогрева до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которое и определяет время на осуществление пуска ВКУ.

В третьей главе представлены разработанные автором математические модели и методики для различных способов обогрева, обеспечивающие пересчет полученных на макетах воздушных конденсаторов экспериментальных характеристик на другие условия окружающей среды. Установлена адекватность разработанных математических моделей на основе сопоставления результатов расчетного и физического моделирования.

Четвертая и пятая главы диссертации посвящены исследованиям пусковых режимов работы экспериментальной секции воздушного конденсатора при отрицательных температурах наружного воздуха. В результате проведенных испытаний установлены режимные и конструктивные параметры, обеспечивающие быстрый прогрев теплообменных поверхностей перед пуском при отрицательных температурах наружного воздуха, обеспечивающие сравнительно небольшую температурную неравномерность (максимальная разница температур отдельных труб не превышала  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). С использованием полученных в результате эксперимента данных автором предложена усовершенствованная методика расчета переменных режимов работы конденсационной установки, заключающаяся во введении поправок для тепловых нагрузок в диапазоне 20-80 %, в котором при расчете по существующей методике наблюдалось существенное расхождение экспериментальных и расчетных значений давления.

В шестой главе приведены результаты исследования тепловых режимов сухой вентиляторной градирни турбины Т-56/73-7,8, работающей в составе теплофикационного парогазового энергоблока мощностью 220 МВт.

После ознакомления с диссертационной работой Птахина А.В. можно заключить, что все поставленные задачи исследования решены, полученные результаты изложены полно, ключевые аспекты, связанные с исследованием работы воздушных конденсационных установок в период пуска при отрицательных температурах, проработаны на высоком научно-техническом уровне.

### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

В диссертационной работе:

- впервые получены экспериментальные данные по динамике прогрева и охлаждения макетов и натурной секции воздушно-конденсационных установок при отрицательных температурах наружного воздуха;
- разработаны физическая и математическая модели процессов прогрева и охлаждения, обеспечивающие приведение результатов экспериментальных исследований к расчетным условиям реализации прогрева и пуска воздушно-конденсационных установок и сухих градирен;
- проведен анализ методики расчета переменных режимов работы воздушно-конденсационных установок и разработана усовершенствованная методика расчета, обеспечивающая повышение точности оценок в диапазоне частичных тепловых нагрузок 20-80 %;
- впервые получены экспериментальные данные по работе сухой градирни в условиях «теплой камеры».

### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, вносят важный вклад в понимание процессов нагрева и охлаждения теплообменных поверхностей в условиях низких температур окружающего воздуха и работы воздушных конденсаторов и сухих градирен на нерасчетных режимах.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации воздушных конденсаторов и сухих градирен паровых турбин в

следующих практических ситуациях:

- разработка рекомендаций по безопасному пуску ВКУ, что представляет исключительную важность для тепловых станции России;
- определение минимально допустимых тепловых нагрузок, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию воздушных конденсаторов и сухих градирен в зимних условиях;
- разработка методики расчета переменных режимов работы воздушных конденсаторов и оценка эффективности работы этих аппаратов в широком диапазоне нагрузок.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных методик обработки результатов экспериментов, основанных на общеизвестных закономерностях тепломассообмена, корректной постановкой задач и планированием эксперимента, использованием поверенных измерительных приборов, удовлетворяющих требованиям точности в диапазоне измеряемых величин, характерных для проводимых экспериментальных исследований, детальным анализом результатов измерений с обеспечением достоверных значений тепловых и материальных балансов.

Основные результаты по теме диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования результатов диссертационных исследований на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Полученные автором результаты представлены на 8 всероссийских научных конференциях, что свидетельствует о достаточном уровне апробации.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. При анализе работы воздушных конденсационных установок и сухих градирен наряду с экспериментальными исследованиями целесообразно было использовать методы конечно-элементного анализа. Особенно актуальным использование указанных методов представляется при исследовании работы сухой

градирни, результаты которого приведены в главе 6 диссертации. Это позволило бы получить больше информации, в том числе количественной, о структуре и параметрах потока охлаждающего воздуха в рабочем пространстве градирни.

2. В первой главе диссертации мало внимания уделено конструктивному исполнению и особенностям функционирования существующих вариантов систем подогрева;

3. Из текста диссертации не вполне понятно, каким образом результаты, полученные на макете воздушного конденсатора, могут быть перенесены на натурный образец, какие критерии подобия макета и натурального образца должны соответствовать для обеспечения достоверности такого переноса.

4. На странице 18 автореферата автор, ссылаясь на результаты испытаний, делает вывод о возможности прогрева поверхности теплообмена при обдуве паром до 40-45 °С за 8-10 минут. При этом из представленных на этой же странице графиков изменения температуры теплообменной поверхности при прогреве во времени, приведенных на рисунке 8, этого не следует.

5. В работе стоило провести оценки сравнительной экономической эффективности применения ВКУ и СВГ в сопоставлении с классическими схемами отвода тепла.

Отмеченные недостатки могут быть рассмотрены в ходе дискуссии и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

### **Заключение по диссертационной работе**

В целом рассматриваемая диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, связанную с совершенствованием воздушных конденсаторов и сухих градирен паровых турбин, в том числе в части эксплуатации в условиях низких температур окружающего воздуха. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на научно-технических конференциях и опубликованы в научных трудах соискателя.

Диссертационная работа на тему «Исследование пусковых и переменных режимов воздушных конденсаторов и сухих градилен паровых турбин» соответствует требованиям ВАК Минобрнауки России, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Птахин Антон Викторович – заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки.

### Официальный оппонент

Доктор технических наук, доцент

Начальник управления – руководитель программ перспективных разработок

управления внедрения инноваций,

перспективных и нишевых продуктов

дирекции по технической политике

и научно-исследовательской работе

ПАО «Силовые машины»

Рогалев Андрей Николаевич

11 июня 2019 г.

Подпись А.Н. Рогалева заверяю.

11 июня 2019 г.

*Верушин Евгений*  
*Григорьев Е.В.*



Публичное акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт» (ПАО «Силовые машины»)  
195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, д. 3А  
Телефон: +7 (903) 788-72-37  
Адрес электронной почты: Rogalev\_AN@power-m.ru