

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**доцента, доктора технических наук Хохлова Владимира Александровича на диссертационную работу Голубева Андрея Вячеславовича на тему «Переходные процессы в гидравлических системах энергетических объектов в напорном и безнапорном режимах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.6. «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология»**

### **Актуальность темы исследования.**

Системы охлаждения основных потребителей АЭС относятся к первому классу ответственности, к ним предъявляются повышенные требования в части надежности и безопасности эксплуатации, которые учитываются при проектировании и эксплуатации. Нормативные документы требуют обязательного выполнения комплекса исследования потенциальных режимов, возникающих при эксплуатации, среди которых большое значение имеют режимы пусков, при которых достигаются повышенные нагрузки на насосное оборудование, водоводы и теплообменники. В свете сказанного тема диссертационного исследования, в котором комплексно решена задача обеспечения допустимых условий протекания переходных процессов пусков для применяемых различных по составу сооружений и оборудования систем охлаждения основных потребителей АЭС представляется актуальной.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа Голубева А.В. состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы из 108 наименований. Объем работы - 139 страниц машинописного текста, включая 64 рисунка и 8 таблиц.

**Во введении** приведены актуальность темы выполненных исследований, цель и основные задачи, представлены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертантом выполнен обзор литературы по вопросам исследования переходных процессов насосных станций, с выявлением их специфики и отличительных особенностей. Представлена классификация гидросооружений и оборудования систем охлаждения основных потребителей с точки зрения особенностей протекающих переходных процессов пусков. Представлены требования к используемым математическим моделям в части рассчитываемых процессов и учитываемых параметров.

**Во второй главе** представлено подробное описание разработанной автором оригинальной математической модели расчетов переходных процессов во всем комплексе взаимосвязанных гидравлических и пневматических элементов рассматриваемой системы включая насосный агрегат, водоводы, конденсатор тепловой турбины, регулирующую арматуру, систему выпуска воздуха, сливные колодцы с водосливами, распределительную сеть градирни.

Особое внимание автор уделяет обеспечению устойчивости расчетного алгоритма, при совместном решении уравнений гидроудара на примыкающих к конденсатору участках напорных водоводов и системы нелинейных уравнений, описывающих гидравлические режимы работы элементов проточной части конденсатора паровой турбины в виде двух емкостей, связанных системой длинных трубок часть из которых работает в подтопленном, а часть в неподтопленном режиме. Кроме гидравлической части модель учитывает изменение давления в заполненной воздухом части полостей и трубок конденсатора и его удаление через специально установленные клапаны. Автором показано, что в условиях рассматриваемой нелинейной модели хорошую устойчивость решения в итерационном процессе дает итерационный метод Ньютона-Рафсона.

В описании работы в переходных процессах насоса использован хорошо зарекомендовавший себя в практике метод представления его расходной и моментной характеристик в полярных координатах Сьютера. Итерационный метод Ньютона-Рафсона применен при совместном решении системы



нелинейных уравнений вращения насосного агрегата и расхода через насос с учетом гидроудара на прилегающих участках.

Выполненный анализ позволил автору дать рекомендации по варианту описания граничного условия, описывающего работу регулирующей арматуры при малых открытиях и значениях потерь напора, соизмеримых с напором насоса.

В целом, представленное описание расчетного алгоритма соответствует задачам и необходимой подробности описания процессов в гидравлической и пневматической частях рассматриваемой динамической системы для получения адекватной картины протекания переходных процессов.

**В последних трех главах** представлены результаты исследований процессов пусков в трех специфических по условиям протекания переходных процессов системах с определенным составом гидросооружений и регулирующего расход оборудования.

**В третьей главе** рассмотрены особенности протекания пусков в насосных системах без регулирующих затворов и со сливными колодцами в верхнем бьефе, характерной для разомкнутых систем охлаждения. Представлена оригинальная схема ограничений по условиям протекания пусков, включающая, кроме максимального давления по трассе, максимальный напор насоса, время разворота электродвигателя, максимальную и минимальную отметку колебаний уровня в сливном трубопроводе и связанной с ним сливной камерой конденсатора, режим работы воздушного клапана.

Автором даются рекомендации по параметрам насоса и двигателя, воздушных клапанов, трассировки трубопроводов, позволяющим вписаться в указанные ограничения.

**В четвертой главе** рассмотрены особенности протекания пусков в насосных системах с градирнями в верхнем бьефе при условии отсутствия регулирующих расход затворов. Автором показана важность учета особенности таких систем, заключающейся в переходе конденсатора из

безнапорного в напорный режим работы после выхода всего воздуха, сопровождающееся всплеском давления за счет выравнивания расходов на входе и выходе из конденсатора.

Выполнен анализ влияния инерционного показателя напорной системы на режим прохода насосом зоны неустойчивых режимов работы.

**В пятой главе** рассмотрены особенности протекания пусков в насосных системах с градирнями в верхнем бьефе при условии наличия регулирующих расход затворов и места их размещения по трассе водоводов.

Показаны преимущества и недостатки пуска диагональных насосов на закрытый затвор и влияние условий выпуска воздуха на всплеск давления при переходе конденсатора в напорный режим работы.

**В заключении** приведены основные выводы и рекомендации по результатам выполненного диссертационного исследования.

**Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методик, лежащих в основе расчетных алгоритмов разработанного программного комплекса, опытом эксплуатации реальных объектов, на которых были реализованы полученные в работе рекомендации.

Научная новизна результатов исследований, проведенных в рамках данной работы заключается в следующем:

- выполнено комплексное исследование процессов в насосных системах охлаждения крупных энергетических объектов с учетом их специфики, особенностей компоновки регулирующего оборудования и различного состава гидросооружений;
- впервые систематизированы комплексы ограничений с учетом специфики насосных систем охлаждения основных потребителей АЭС, определены влияющие факторы и показаны возможности по достижению допустимых условий для переходных процессов пусков;



– решен ряд вопросов, касающихся устойчивости итерационных алгоритмов в рамках математического моделирования переходных процессов с учетом специфических граничных условий.

Считаю, что научная новизна корректно отражает полученные результаты и является достаточной по объему и значимости для кандидатской диссертации.

### **Теоретическая значимость работы**

Сформулирован и подтвержден результатами моделирования комплекс требований к расчетным алгоритмам программы расчетов переходных процессов, позволяющих адекватно натуре моделировать процессы пусков насосных станций с учетом специфики систем охлаждения основных потребителей АЭС.

Разработаны рекомендации, позволяющие в применяемых конструктивных вариантах систем охлаждения, обеспечить успешное и безопасное протекание пусков.

### **Практическая значимость работы**

Выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, использовались в реализации проектов построенных и строящихся крупных энергетических объектов, о чем свидетельствуют имеющиеся у автора документы о внедрении.

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

Автор при формулировании научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов. Выводы и рекомендации, сформулированные в научно-квалификационной работе, базируются на результатах численных экспериментов, подтверждены опытом

эксплуатации насосных систем охлаждения, на которых они были реализованы.


### **Замечания**

1. В работе рассматриваются переходные процессы пусков только для блочных систем охлаждения, в которых насос связан с одной секцией конденсатора. Из области рассмотрения выпали системы группового питания, в которых несколько насосов объединены в общий подводящий коллектор и питают несколько секций конденсатора. Остаются вопросы об особенностях пусков в таких системах охлаждения?
2. Учитываются ли в математической модели потери в тракте выпуска воздуха или модель ограничивается учетом только расходной характеристики воздушного клапана. Какие скорости допускаются в воздуховодах при пусках?
3. При моделировании пусков не учитываются процессы в электрической части электродвигателя и системе собственных нужд. Как это повлияет на результаты выполняемых расчетов разворота насосного агрегата?
4. Какие практические выводы следуют из выполненного в работе анализа прохождения насосом области неустойчивых режимов?
5. Известно, что пуски диагональных насосов на закрытый затвор происходят с существенно более высокими значениями напора по сравнению с установившимся режимом. Это его существенный недостаток. Какие преимущества дает такой способ пусков?
6. В выводах по работе отсутствуют обобщенные рекомендации по наиболее эффективным условиям пусков, а также рекомендуемым конструктивным решениям по составу и компоновке оборудования насосных станций систем охлаждения АЭС, которые можно было бы оформить в виде отдельного локального нормативного документа для проектных организаций.



Диссертационная работа Голубева Андрея Вячеславовича является самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, содержащей научные результаты, выводы и рекомендации, отличающиеся новизной. Диссертация на тему «Переходные процессы в гидравлических системах энергетических объектов в напорном и безнапорном режимах» отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.) для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Голубев Андрей Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.6. «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология».

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», кафедра  
«Энергетические и  
гидротехнические сооружения»,  
профессор 

**Хохлов Владимир Александрович**

111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г.

Муниципальный округ Лефортово  
ул. Краснознаменская, д.14, стр.1  
тел.: +7 915 378-83-46

e-mail: [hohlov.vladimir@mail.ru](mailto:hohlov.vladimir@mail.ru)

*Лорисов* *установлено*



«28» марта 2024 г.