

На правах рукописи



Голубев Андрей Вячеславович

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НАПОРНОМ И БЕЗНАПОРНОМ
РЕЖИМАХ**

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Муравьев Олег Алексеевич

Официальные оппоненты: **Хохлов Владимир Александрович**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Энергетические и гидротехнические сооружения», профессор.

Али Мунзер Сулейман
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева», кафедра «Сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций», и.о. заведующего кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «16» апреля 2024 г. в 13:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь



Бестужева Александра Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Водопроводящие гидротехнические сооружения (ГТС), такие как водоводы, трубы, туннели, лотки и др., транспортируют воду с определенными расходами для самых разнообразных целей, для подачи воды к турбинам гидроэлектростанций, в гидравлические системы охлаждения тепловых, атомных электростанций (ТЭС, АЭС) и промышленных предприятий, в ирригационные системы и т.п. Движение жидкости в водопроводящих сооружениях различного назначения может быть стационарным и нестационарным. Изменения режимов работы систем водоподачи, гидравлических установок (гидротурбин, насосов, обратимых гидромашин), водозаборных устройств, сопровождаются переходными процессами, характеризующимися неустановившимся движением в гидравлической и пневматической частях системы, вызывающим значительные динамические нагрузки на элементы проточной части гидроагрегатов и водопроводящих ГТС.

Степень разработанности исследования

Разработка теории расчетов переходных процессов на ГЭС началась в нашей стране в довоенный период и получила развитие в пятидесятые – шестидесятые годы прошлого столетия. Основные результаты этого периода изложены в трудах теоретиков: М.А.Мосткова, Ф.Ф.Губина, Н.М.Щапова, Н.А.Картвелишвили, Г.И.Кривченко, А.А.Башкирова, Н.Н.Аршеневского, Е.В.Квятковской, Н.Ф.Манджавидзе и многих других авторов.

В последующие десятилетия наступил период разработки компьютерных программ, в том числе для расчетов переходных процессов на ГЭС, ГАЭС и насосных станциях отраженные в публикациях В.В.Елистратова, Б.Б.Поспелова, К.П.Вишневого, Н.В.Арефьева, В.И. Виссарионова, Д.С. Беглярова, В.В. Берлина, Г.Г. Сотникова, О.А.Муравьева и многих других.

Что касается переходных процессов в системах охлаждения тепловых и атомных электростанций, то публикаций по этой тематике достаточно мало. Специфика отражена в монографии Р.А.Новодережкина, диссертациях О.Ш.Оспанова, Б.Р.Новодережкина, в их статьях, а также в приведенных в диссертации статьях зарубежных авторов.

До настоящего времени нет научно и практически обоснованных материалов, показывающих связь исходных данных и их многочисленных вариантов с особенностями, характером и результатами протекания переходных процессов в крупных гидравлических системах охлаждения. Такие системы включают подводящие и отводящие водоводы, градири или сливные колодцы в верхнем бьефе, насосы различных типов с электродвигателями, регуливающую арматуру, специальные крупные теплообменники - конденсаторы с приемными, сливными

камерами, фильтрами, шарикоулавливающими устройствами, клапанами впуска-выпуска воздуха.

Диссертационная работа направлена на разработку теории, анализа и практических рекомендаций для всестороннего обеспечения, в том числе безопасности, процессов пуска гидроагрегатов в системах водоподачи энергоустановок, и соответствуют пунктам 13, 14 и 18 паспорта научной специальности 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

Цель работы

Разработать методологические основы оценки переходных процессов пусков в гидравлических системах охлаждения основных потребителей тепловых и атомных электростанций, базирующиеся на комплексе расчетов, с использованием математического моделирования, процессов с учетом основных влияющих факторов.

Основные задачи исследования

1. Систематизация гидравлических систем охлаждения крупных энергетических объектов с точки зрения переходных процессов пусков насосных агрегатов.

2. Разработка расчетных алгоритмов и математических моделей оборудования, в том числе конденсаторов паровых турбин, насосных агрегатов, регулирующей расход арматуры, обеспечивающих устойчивость итерационных циклов решения в полном диапазоне возможных гидравлических режимов.

3. Разработка системы ограничений, обеспечивающей допустимые условия протекания переходных процессов и комплекс параметров, обеспечивающих эти ограничения, которые могут варьироваться при проектировании.

4. Исследование влияния параметров оборудования и его состава на условия протекания гидромеханических переходных процессов пусков.

Научная новизна исследования

- Разработана методика оценки процессов пусков в системах водоподачи крупных энергетических объектов, в основе которой лежит классификация систем по условиям протекания переходных процессов, а также комплекс ограничений, обеспечивающих успешное их протекание.

- Предложены алгоритмы расчета гидромеханических переходных процессов в крупных теплообменниках (конденсаторах) с учетом их последовательного заполнения, гидравлических потерь напора, сжатия и разрежения воздушной полости, ее воздухообмена с атмосферой, гидроудара в примыкающих к камерам участках напорных водоводов, обеспечивающие получение устойчивого решения в рамках итерационного процесса последовательных приближений.

- Предложена система ограничений и варьируемых параметров, определяемых при проектировании, которые обеспечивают допустимые условия протекания переходных процессов пусков.

- Показаны опасные с точки зрения оборудования и сооружений условия протекания переходных процессов.

Теоретическая значимость работы состоит:

- в разработке оригинальных алгоритмов расчета переходных процессов в гидравлической и пневматической составляющих комплексной системы, обеспечивающих расчетную устойчивость получения решения в итерационном цикле последовательных приближений.

- в обосновании комплекса учитываемых процессов и определяющих их факторов, которые обеспечивают адекватное натуре описание переходных процессов в водоводах и оборудовании различных по составу сооружений систем охлаждения крупных энергетических объектов.

Практическая значимость работы состоит в прямом использовании проектными институтами результатов диссертационного исследования в проектах ряда проектируемых АЭС в части назначения параметров сооружений и оборудования, а также технологии режимов пусков в насосных системах водоподдачи.

Методология и методы исследования

В рамках проведенных исследований использовались обобщение и анализ на основе большого объема результатов расчетов с выявлением основных влияющих факторов в условиях их комплексного взаимодействия.

Исследования выполнены методом математического моделирования по разработанной автором и апробированной по данным натурных испытаний математической модели расчета переходных процессов.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении аналитического обзора научных достижений в исследуемой области, формулировке цели и постановке задач исследований, теоретических разработках, освоении расчетных методов и разработке математических моделей, проведении численных исследований и обработке результатов компьютерных экспериментов и натурных данных, составлении заключительных положений исследований. Работа выполнена по личной инициативе соискателя.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа условий устойчивости расчетного алгоритма для неустановившегося режима на участках напорного водовода с учетом граничного условия при малых открытиях регулирующей арматуры.

2. Комплекс технических требований по составу учитываемых процессов и описывающих их характеристик для адекватного натуре представления переходных процессов в комплексе сооружений и оборудования насосных станций охлаждения основных потребителей ТЭС и АЭС.

3. Выполненная классификация гидравлических систем охлаждения крупных энергообъектов по условиям протекания переходных процессов пусков.

4. Разработанная система ограничений и параметров оборудования, обеспечивающих допустимые условия протекания переходных процессов пусков.

5. Количественные характеристики, показывающие влияние параметров оборудования и сооружений на экстремумы переходных процессов.

Степень достоверности результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени

Степень достоверности полученных результатов основана на применении фундаментальных положений гидравлики неустановившегося движения, актуальных характеристиках оборудования, описываемых граничными условиями, сопоставимостью результатов, полученных численными методами с результатами натурных исследований, проанализированных и обобщенных автором.

Основным показателем достоверности разработанной методики и созданных на этой основе математической и компьютерной моделей пусков насосных станций является успешное применение моделирования и расчетов для реальных объектов и сопоставление с параметрами контрольных пусков агрегатов в процессе проверки работы систем перед вводом станций в эксплуатацию. На всех объектах, для которых выполнялось моделирование, процессы пуска проходили в полном соответствии с расчетами (Ростовская-2, Нововоронежская-2, Куданкулам - блоки 1 и 2).

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования докладывались на конференциях:

- десятая научно-техническая конференция "Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии" (г. Санкт-Петербург, 2016 г.) представлен доклад на тему "Особенности пусков насосных агрегатов в системах технического водоснабжения основных потребителей АЭС";

- одиннадцатая научно-техническая конференция "Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии" (г. Санкт-Петербург, 2017 г.) представлен доклад на тему "Особенности пусков насосных агрегатов в системах технического водоснабжения основных потребителей АЭС";

- двенадцатая научно-техническая конференция "Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии" (г. Санкт-Петербург, 2018 г.)

представлен доклад на тему "Особенности пусков насосных агрегатов в системах технического водоснабжения основных потребителей АЭС";

- четырнадцатая научно-техническая конференция "Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии" (г. Санкт-Петербург, 2022 г.);

- восьмая международная научная конференция "Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании" (г. Москва, 2022) представлен доклад на тему "Особенности пусков насосных агрегатов в системах технического водоснабжения".

Публикации по результатам исследований

Материалы диссертации достаточно полно изложены в 5-и научных публикациях, из которых 3 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и 2 работы опубликованы в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 139 страницах машинописного текста, состоит из введения, основной части, включающей 5 глав, заключения, списка литературы из 108 наименований, содержит 64 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы научной работы, сформулированы цели и задачи исследований.

Глава 1. Тепловые и атомные электростанции являются энергетическими объектами, использующими в технологических процессах большие объемы циркулирующей воды. Наиболее крупной из перечисленных систем, как по расходам перекачиваемой воды, так и по размерам оборудования и сооружений, является система охлаждения основных потребителей, в которой теплообменниками являются конденсаторы тепловых турбин. В рамках диссертационной работы обобщен опыт исследований этой системы для ряда проектов атомных электростанций, в работе над которыми автор принимал участие.

По характеру технологического цикла системы делятся на замкнутые и разомкнутые. В замкнутых системах в состав сооружений, включаются градирни в разомкнутых напорная часть заканчивается водовыпуском в виде сливного колодца с водосливом (рисунки 1 и 2).

При проектировании систем охлаждения, подборе насосов и электродвигателей, определении высотного положения конденсаторов и трассы

водоводов большое внимание уделяется переходным процессам. На основании расчетов определяются:

- максимальное внутреннее давление воды по трассе водоводов и в элементах конденсатора;
- минимальное давление с предотвращением разрыва сплошности потока;
- максимальная частота обратного вращения электродвигателя при потере привода;
- необходимые параметры пусковой характеристики электродвигателя;
- состав и режимы регулирования запорной арматуры по трассе;
- состав и параметры специального оборудования для уменьшения динамических нагрузок от внутреннего давления воды (воздушных клапанов и перепускных устройств).

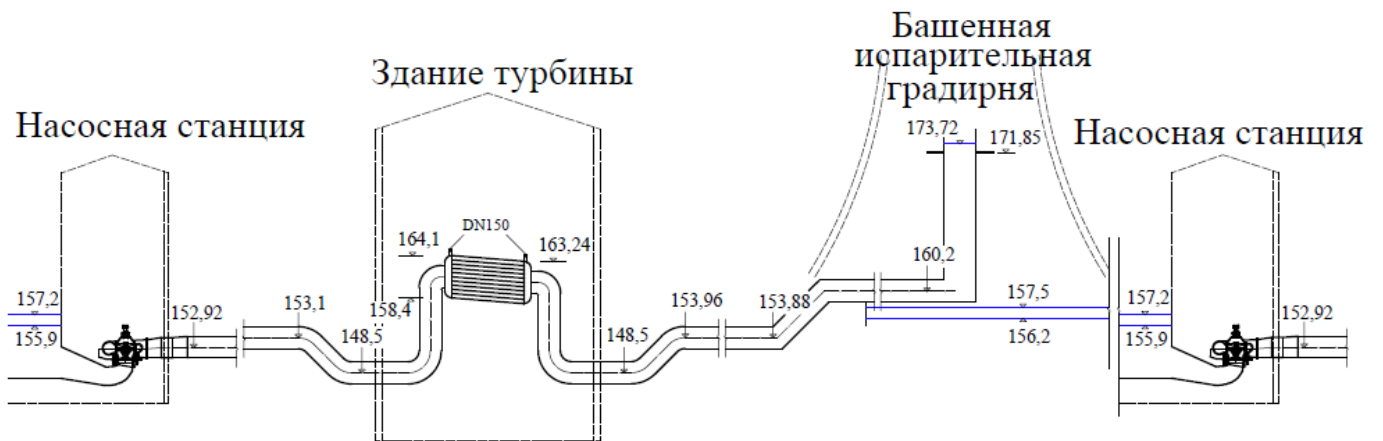


Рисунок 1 – Замкнутая схема насосной системы охлаждения с градирней в верхнем бьефе

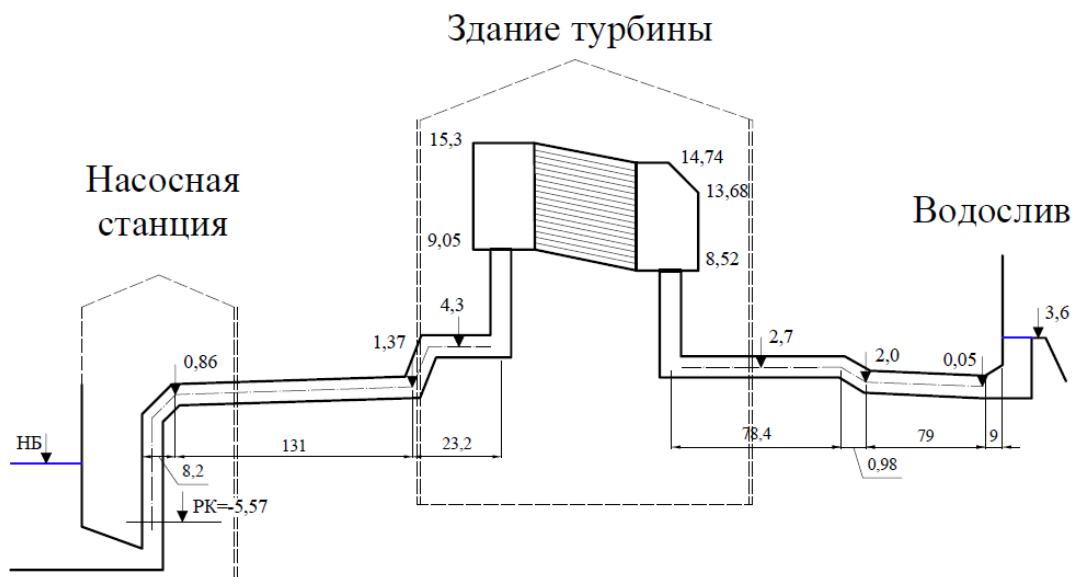


Рисунок 2 – Разомкнутая схема насосной системы охлаждения с разомкнутым циклом и сливным колодцем в верхнем бьефе

Заложенные в процессе разработки проекта технические решения, обоснованные расчетами переходных процессов, позволяют обеспечить надежные условия работы, поскольку моделируются все наиболее тяжелые режимы, которые могут встретиться при эксплуатации.

В литературе по переходным процессам насосных станций основное внимание уделяется аварийным процессам при потере привода, по которым решаются вопросы защиты водоводов от гидравлического удара. При этом остаются в тени плановые процессы, при которых, как показал опыт наших исследований, возникают высокие нагрузки на насосное оборудование, конденсаторы и другие узлы системы.

Опыт исследований и эксплуатации насосных станций систем охлаждения показал необходимость систематизации требуемых ограничений для параметров переходных процессов при пусках. Такой подход позволяет гарантировать безопасное протекание процессов с учетом специфики конструкций, состава сооружений и установленного оборудования.

Глава 2. Математическая модель расчетов переходных процессов в водоводах насосной станции систем охлаждения базируются на использовании модели упругого гидроудара. Специфической особенностью напорных систем охлаждения является высокое расположение трубопроводной сети и конденсатора над уровнем нижнего бьефа. В этих условиях пуски насосов происходят на систему, в которой находится большое количество воздуха. Связь между незаполненными водой участками водовода осуществляется через давление воздуха, которое определяется уравнением состояния воздушной полости. Кроме того, в расчете воздушной полости необходимо учитывать работу воздушных клапанов.

Специально должно учитываться изменение длины напорного участка водовода и волновой эффект при заполнении участка водовода со свободной поверхностью. Обязательным является учет гидравлических потерь по длине, местных и на регулирующей арматуре.

Важным является учет специфики работы в переходных процессах такого сложного оборудования, как насосный агрегат и конденсатор тепловой турбины. В расчетах это оборудование описывается граничными условиями.

В качестве граничного условия по насосному агрегату используется уравнение, в котором расход определяется по полной оборотно-расходной характеристике насоса через напор (с учетом гидроудара) и частоту вращения. Работа насоса с переменной частотой требует решения уравнения вращения агрегата, в котором фигурируют момент электродвигателя и гидравлический момент, определяемый по полной оборотно-моментной характеристике с учетом гидроудара.

Для исключения неоднозначности в описании характеристики насоса, его расходная и моментная характеристики представляются в полярной форме Сьютера, в виде двух безразмерных параметров W_H и W_T .

Уравнение гидроудара на примыкающих к насосу участках напорного водовода и уравнение вращения агрегата с учетом граничных условий приводятся к виду:

$$F_1 = H_0 W_H^2 [(Q/Q_0)^2 + (n/n_0)^2] - a + ((c/gF)^{AB} + (c/gF)^{CD}) Q, \quad (1)$$

$$F_2 = n - b - \frac{\Delta t}{MD^2} W_T |W_T| [(Q/Q_0)^2 + (n/n_0)^2] (M_0 - M_{эл}(n)), \quad (2)$$

где H и Q – напор и расход насоса, c – скорость распространения волны гидроудара, F – площадь поперечного сечения участка водовода, a и b – коэффициенты, постоянные на шаге расчета, n – частота вращения, M и $M_{эл}$ – гидравлический момент на валу насоса и момент электродвигателя, MD^2 – маховой момент вращающихся масс гидроагрегата, Δt – шаг расчета.

Совместное решение уравнений (1) и (2) выполняется итерационным методом Ньютона. Неизвестные расход и частота вращения находятся в результате итерационного решения системы нелинейных алгебраических уравнений.

Важным является учет изменения гидравлического момента на лопастях насоса в переходном процессе. Для его расчета в алгоритме используется универсальная характеристика, а сами значения момента на лопастях определяются в зависимости от частоты вращения, напора и угла установки лопастей.

Граничные условия по конденсатору должны учитывать изменение уровней в приемной и сливной камерах, расходы через трубки, изменение давления в воздушной полости, постепенное заполнение трубок при пусках. Фактически конденсатор работает в процессах пуска как двухкамерный полупневматический уравнительный резервуар, имеющий воздухообмен с атмосферой. Следует рассматривать возможность занaporивания обеих камер или одной из них. В общем случае модель конденсатора представляется четырьмя характерными режимами работы. Попадание в каждый из режимов должно определяться по критериальным параметрам переходного процесса, зависящими от соотношений между уровнями в камерах, давления воздуха и условий наполнения и опорожнения трубок. Трубки могут работать как в подтопленном, так и в неподтопленном режимах (рисунок 3).

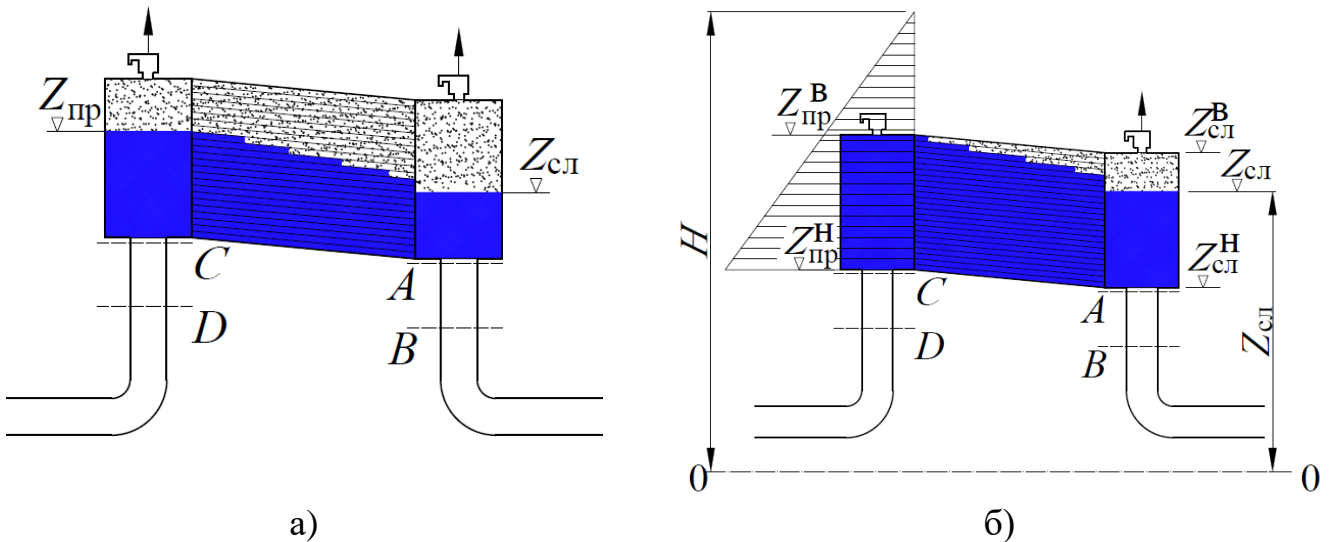


Рисунок 3 – Схема к расчету безнапорного (а) и напорно-безнапорного (б) течения в конденсаторе и прилегающих участках водовода

Ниже представлены формулы расчета для режима на рисунке 3,б. Конденсатор дает два граничных условия:

- для участка отводящего водовода это зависимость (3) потенциального напора в сечении A от уровня в сливной камере, потерь напора и избыточного давления воздуха;

- для участка подводящего водовода это зависимости расходов трубного пучка в подтопленном режиме $Q_{\text{п}}$ (4) и в неподтопленном режиме $Q_{\text{нп}}$ (5) от потенциального напора в сечении C , уровня в сливной камере и избыточного давления воздуха.

$$H^A = z_{\text{сл}} + \frac{p}{\rho g} . \quad (3)$$

$$Q_{\text{п}} = \mu_{\text{конд}} \cdot B_{\text{конд}} (z_{\text{сл}} - z_{\text{сл}}^{\text{H}}) \sqrt{2g(H^C - z_{\text{сл}} - p/\rho g)} , \quad (4)$$

$$Q_{\text{нп}} = \frac{2}{3} \mu_{\text{конд}} \cdot B_{\text{конд}} \sqrt{2g} \left[(H^C - z_{\text{сл}} - p/\rho g)^{3/2} - (H^C - z_{\text{сл}}^{\text{B}} - p/\rho g)^{3/2} \right] . \quad (5)$$

Цепное уравнение гидроудара на участке CD с учетом граничного условия (4), (5) решается методом итераций Ньютона. Уравнение приводится к виду (6), от него берется производная (7). Искомым параметром является напор H_{i+1}^C (8).

$$F_i = A_1 - \left(\frac{c}{gF} \right)_{\text{CD}} \left(B_2 \cdot |H_{(n-1)t}^C - C_1|^{0,5} + B_1 \cdot |H_{(n-1)t}^C - C_1|^{1,5} - B_1 \cdot |H_{(n-1)t}^C - C_1|^{1,5} - C_2 |^{1,5} \right), \quad (6)$$

$$\frac{dF_i}{dH_i^C} = - \left(\frac{c}{gF} \right)_{\text{CD}} \left(0,5B_2 \cdot |H_{(n-1)t}^C - C_1|^{-0,5} + 1,5B_1 \cdot |H_{(n-1)t}^C - C_1|^{0,5} - 1,5B_1 \times \right. \\ \left. \times |H_{(n-1)t}^C - C_2|^{0,5} \right) \quad (7)$$

$$H_{i+1}^C = H_i^C - \frac{F_i}{dF_i/dH_i^C} \quad (8)$$

где $A_1 = H_1^D - \left(\frac{c}{gF}\right)_{CD} Q_1^D + H_w$,

$$B_1 = 2,95\mu_{\text{конд}} H_{\text{труб}}, \quad B_2 = 4,43\mu_{\text{конд}} H_{\text{труб}} (Z_{\text{сли}} - Z_{\text{сли}}^{\text{низ}}),$$

$$C_1 = Z_{\text{сли}} - \nabla\text{НБ} + \frac{P_{\text{абс}}}{\rho g}, \quad C_2 = Z_{\text{сли}}^{\text{верх}} - \nabla\text{НБ} + \frac{P_{\text{абс}}}{\rho g}.$$

Коэффициенты A_1 , B_1 , B_2 , C_1 и C_2 – константы на данном шаге расчета, определяемые через параметры процесса на предыдущем шаге, а также через параметры водоводов и конденсатора.

В рамках разработки математической модели решена задача обеспечения устойчивости расчетного алгоритма расчета гидроудара на участках с регулирующей арматурой при малых открытиях регулирующего органа и, как следствие, высоких местных потерях напора. Рассмотрены три модели формирования граничного условия: модель 1 через расходную характеристику затвора, модели 2 и 3 через переменный коэффициент сопротивления. При этом в модели 2 потери напора выполнялись через расход в предыдущий момент времени, а в модели 3 – через произведение искомого расхода через затвор и известного расхода в предыдущий момент времени. Выполненные исследования показали, что необходимая устойчивость алгоритма при решении уравнения гидроудара обеспечивается только моделью 3 (9):

$$Q_{nt} = \frac{\frac{gF}{c} H_{(n-1)t} + Q_{(n-1)t}}{1 + \frac{gF}{c} \zeta |Q_{(n-1)t}|}. \quad (9)$$

На рисунке 4 представлены результаты расчета переходного процесса закрытия затвора.

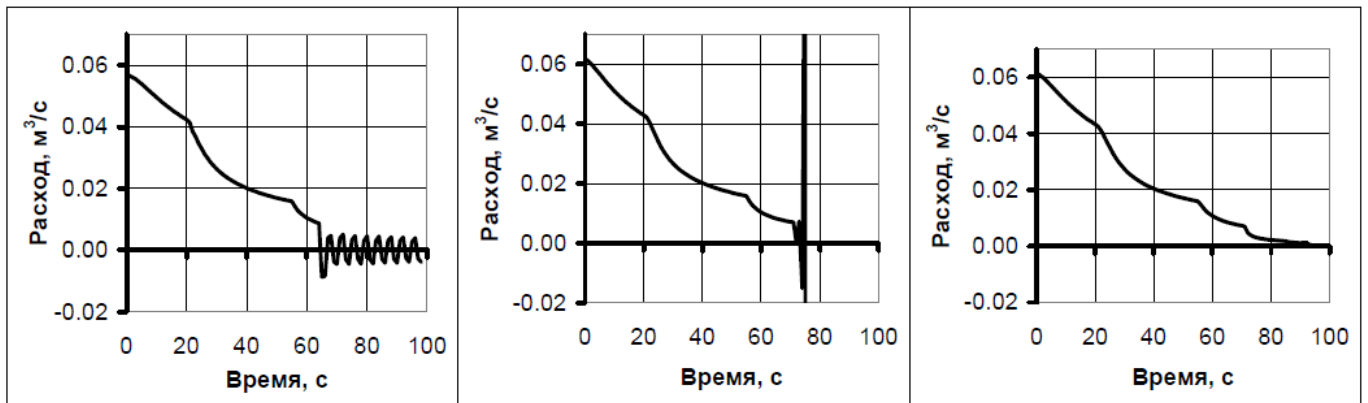


Рисунок 4 – Результаты расчета закрытия затвора по алгоритму 1 (а), по алгоритму 2 (б) и по алгоритму 3 (в)

Пуски насосов системы охлаждения происходят на опорожненный трубопровод и конденсатор. Вытеснение воздуха из системы в процессе пуска насоса происходит через воздушные клапаны, выведенные камер конденсатора. Расход воздуха зависит от давления в камере и является саморегулируемым. Изменение давления p и плотности ρ воздуха в конденсаторе связано с процессами заполнения трубопроводов и камер конденсатора. Текущее значение давления во внутренней полости конденсатора определяется из уравнения Клайперона-Менделеева, вычисляются переменный массовый расход воздуха и его плотность.

Одной из проблем при пуске насоса и наличии длинных подводящих трубопроводов является длительная работы насоса с пониженными напорами при номинальной частоте вращения, сопровождающиеся повышенными пульсациями, вибрациями и нагрузками на лопастную систему насоса.

Пониженные напоры насоса возникают в процессе заполнения подводящего трубопровода. Для исключения подобных режимов Р.А. Новодережкиным предложен способ повышения напора насоса за счет динамического волнового напора, возникающего при пуске в процессе вовлечения в движение находящейся в трубопроводе воды при частичном его заполнении. Заполнение водой большей части подводящего трубопровода перед пуском обеспечивается созданием предварительного вакуума. Величина верхней воздушной прослойки подбирается по требуемой величине динамического волнового напора H_B .

Методика расчета дополнительного волнового напора базируется на известных уравнениях, используемых в расчетах бегущей волны. Искомый динамический волновой напор определяется в функции расхода насоса и степени начального заполнения трубопровода. На рисунке 5,а представлены зависимости волнового повышения давления, полученные нами для условий водовода диаметром 2,6 м насосной станции АЭС Куданкулам. На рисунке 5,б показано как волновое давление изменяется в переходном процесс пуска. Требуемый волновой напор насоса 4 – 6 м существенно улучшил режим работы насоса, сдвигая режимную точку ближе к оптимуму (рисунок 5,б).

Глава 3. Блочные системы охлаждения с водосливом в верхнем бьефе сооружаются на статические напоры 5 – 10 м. При этом сливная камера конденсатора работает в нормальном режиме под вакуумом. Вакуум в верхнем сечении сливной камеры конденсатора составляет 6 – 7 м.

На рисунке 6 показан типичный переходный процесс пуска на частично заполненную водой систему водоводов и опорожненный конденсатор.

В таблице 1 представлены действующие ограничения по параметрам пусков и решения по их удовлетворению.

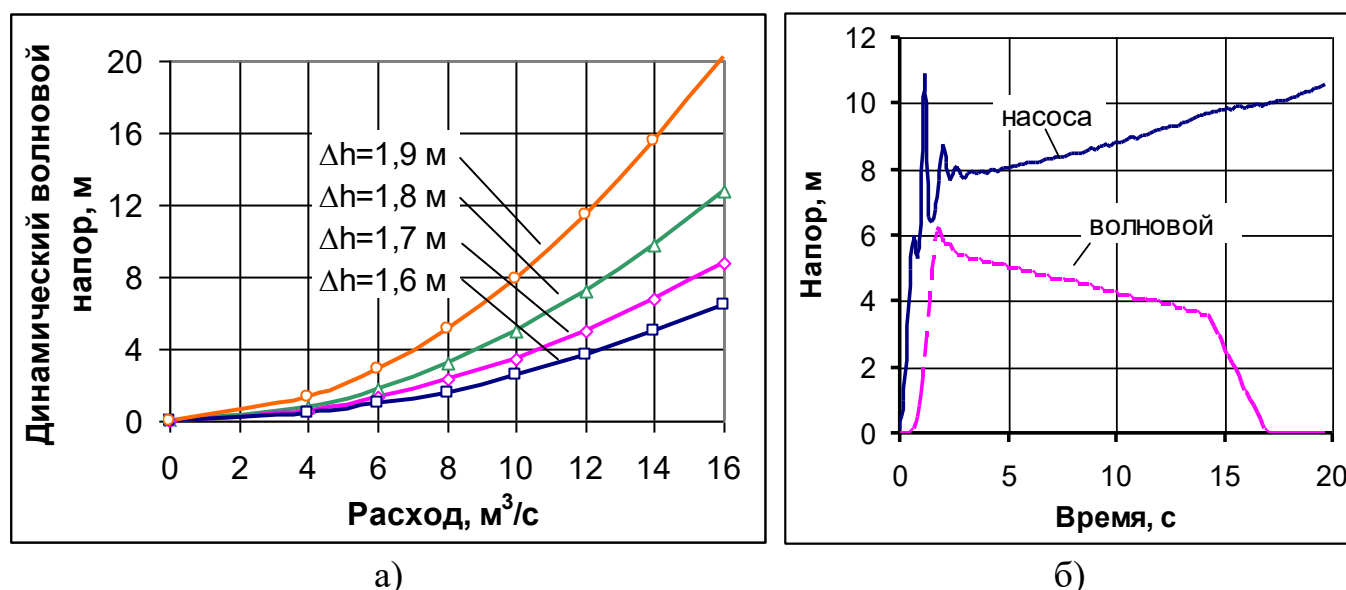


Рисунок 5 – Зависимости волнового повышения давления для условий водовода диаметром 2,6 м насосной станции АЭС (а) и изменение волнового напора и напора насоса в переходном процессе пуска насоса основных потребителей (б)

Таблица 1 – Ограничения, действующие при пусках и мероприятия по их обеспечению при блочной компоновке с сифонными колодцами в верхнем бьефе

| Действующие ограничения при пусках | Негативные условия | Конструктивные и режимные решения для удовлетворения ограничению |
|---|--|---|
| Длительность выхода на номинальную частоту вращения. | Перегрев электродвигателя при длительном, более 10 с, процессе. | - Подбор типа электродвигателя и его пусковой характеристики для обеспечения 20% запаса по вращающему моменту |
| Работа насоса на пониженных напорах ($0,15 - 0,3H_{ном}$) при заполнении водой подводящего трубопровода | Повышенные пульсации и вибрации агрегата в режимах низких напоров. | - Полное или частичное заполнение подводящего к конденсатору трубопровода водой за счет создания предварительного вакуума |
| Отжатие уровня в отводящем трубопроводе при повышении давления воздуха. | Проскок воздушного пузыря по отводящему водоводу. | - Подбор размеров клапанов выпуска воздуха; - Уменьшение пускового расхода за счет: разворота угла лопастей насоса или сброса части расхода в бьеф. |
| Работа насоса с повышенными напорами при пуске. | Попадание насоса в область помпажных режимов с повышенными автоколебаниями напора и расхода. | - Подбор насоса с повышенным напором перехода в помпажные режимы; - Подбор размеров клапанов выпуска воздуха; - Коррекция высотного положения конденсатора. |
| Максимальная амплитуда колебаний уровня в сливной камере конденсатора. | Замыкание уровня при колебаниях на крышку сливной камеры конденсатора. | - Подбор размеров клапанов выпуска воздуха; - Коррекция уровня НБ. |

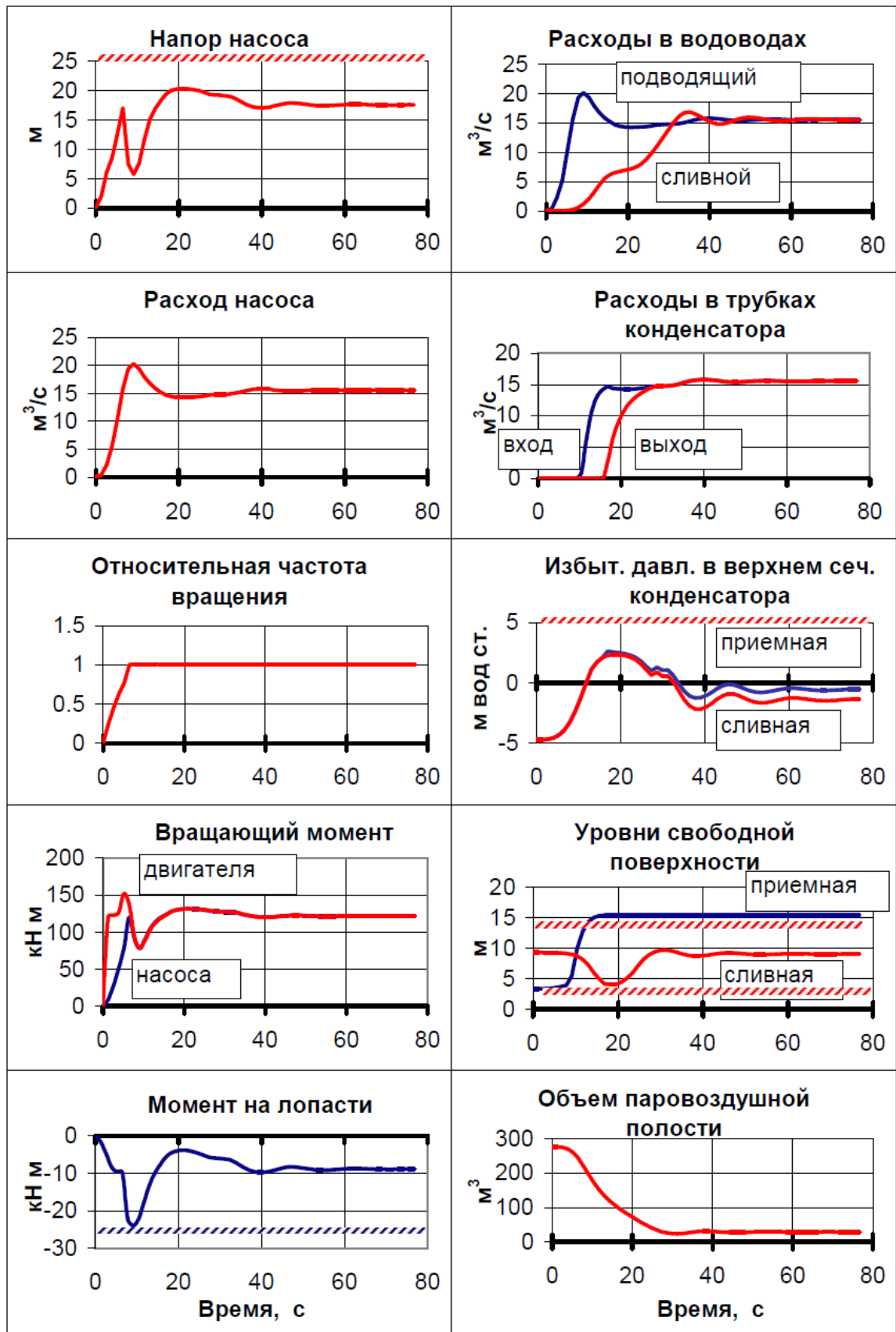


Рисунок 6 – Типичный переходный процесс в насосном агрегате (а) и конденсаторе (б); штриховкой показаны ограничения по параметрам переходного процесса

Созданием предварительного вакуума можно существенно повлиять на условия протекания пусков. Частичное заполнение подводящего водовода перед пуском помогает избежать работы насоса при пониженных напорах. Вакуумом возможно и полностью заполнить подводящий водовод. Пуск при этом будет проходить с ростом на 20% максимального давления в водоводе, но без увеличения максимального давления в конденсаторе (рисунок 7).

Выпуск воздуха играет важную роль в снижении динамических нагрузок на конденсатор и водоводы при пусках на частично заполненные водой напорную систему и конденсатор, позволяет предотвратить выдавливание пузырей через сливной трубопровод в сливной колодец или градирню.

Наиболее крупные по размерам и выпускаемым расходам клапаны необходимы в схемах с водосливами в верхнем бьефе, в которых сливная камера конденсатора работает после пуска под вакуумом. Размеры и количество клапанов определяются из условия допустимого избыточного давления воздуха, чтобы предотвратить прорыв воздушного пузыря в сливной трубопровод.

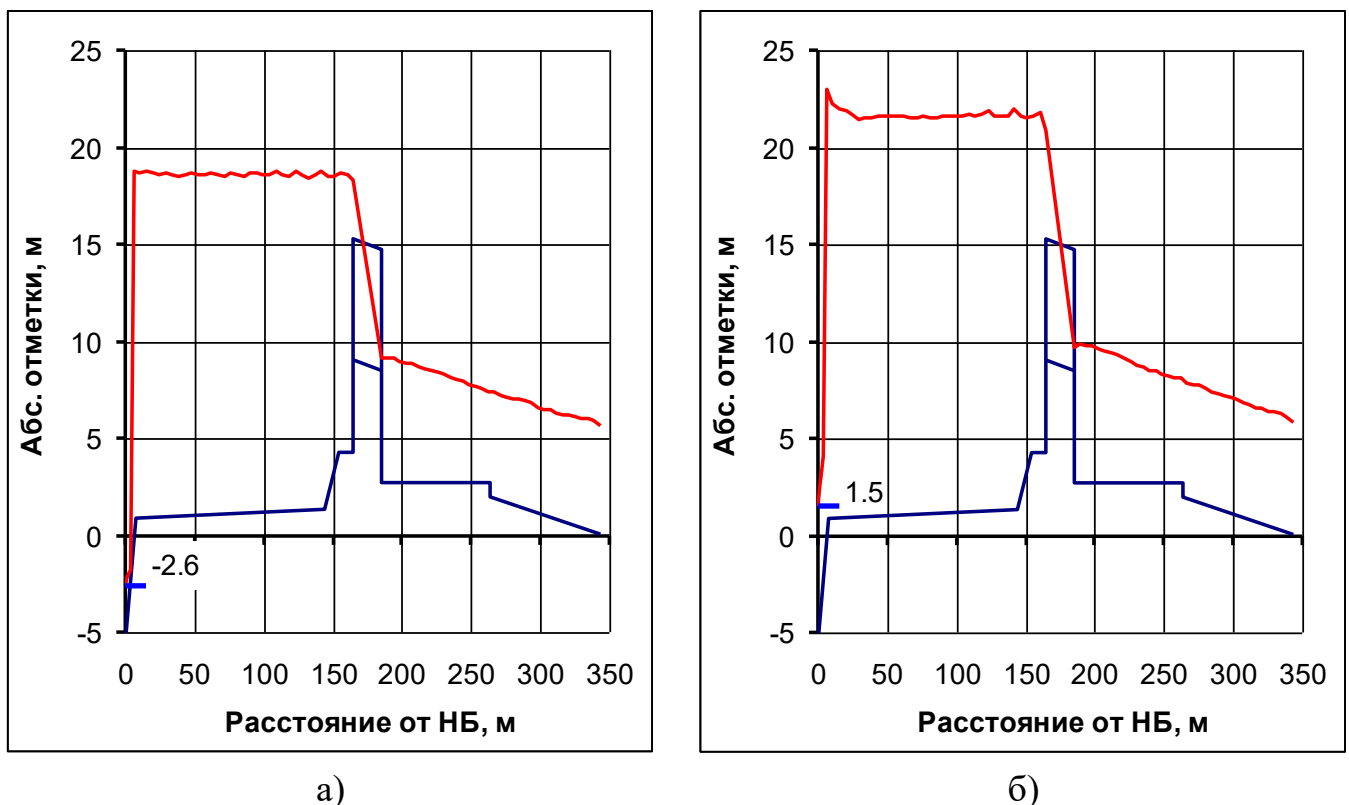


Рисунок 7 – Эпюры максимального давления в водоводах и конденсаторе при пусках а – на частично заполненный подводящий трубопровод, б – на полностью заполненный подводящий трубопровод

На рисунке 8 представлены обобщенные данные экстремумов процесса пуска для вариантов с клапанами диаметром 0,3 м, 0,4 м и 0,5 м. Анализ показывает, что размеры клапанов существенно влияют на расход выпускаемого воздуха, а также колебания уровня в сливном водоводе и сливной камере конденсатора. С увеличением диаметра клапана:

- уменьшается наибольший напор насоса (положительный фактор);
- снижается отжатие уровня в сливном трубопроводе (положительный фактор);
- увеличивается амплитуда колебаний в сливной камере (отрицательный фактор).

Ограничениями к увеличению диаметра воздушного клапана являются:

- замыкание уровня в сливной камере при колебаниях на крышку конденсатора;
- периодическое срабатывание и отключение клапана при завышенном его размере.

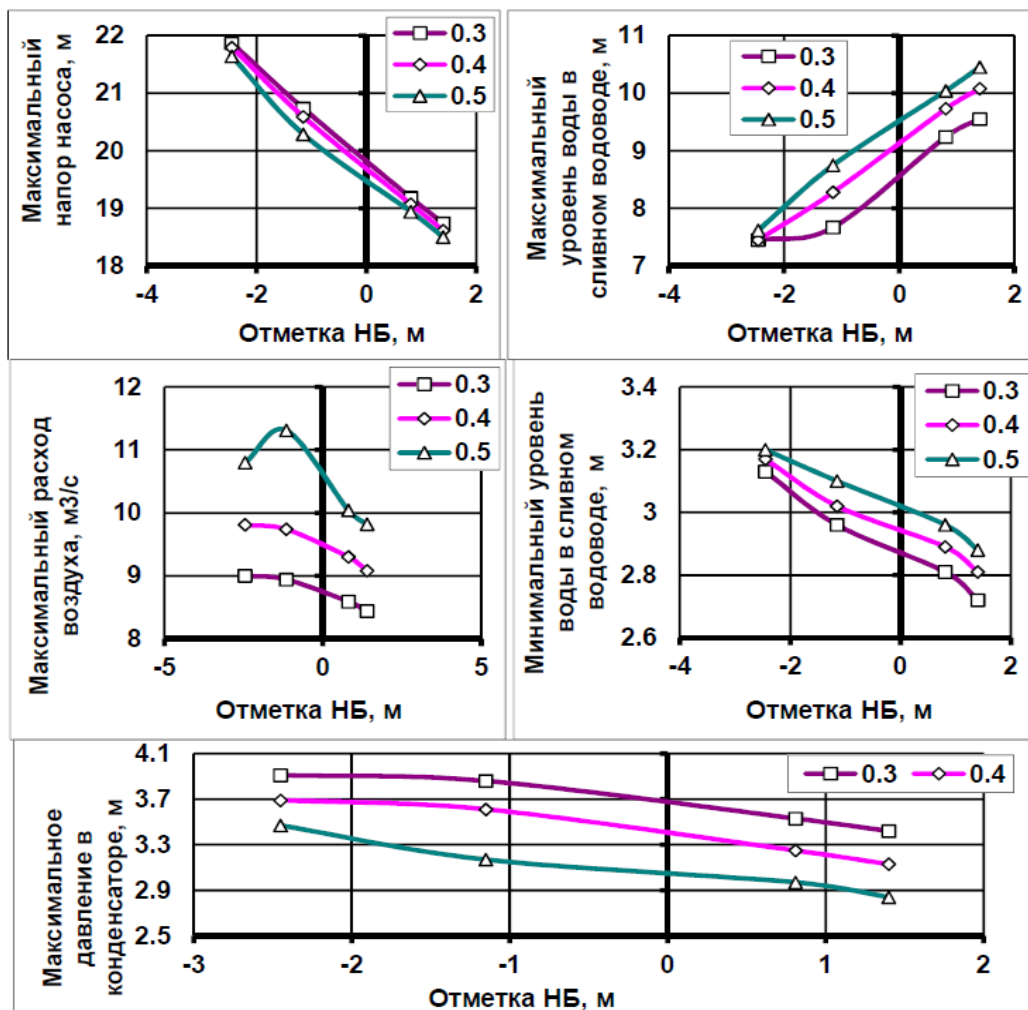


Рисунок 8 – Обобщенные данные по экстремумам пусков в схеме охлаждения с сифонным колодцем. Влияние параметров воздушных клапанов и уровня НБ

Глава 4. Блочные системы охлаждения с градирнями и без затворов на напорном патрубке насоса характеризуются статическими напорами 15 – 20 м. При этом все камеры конденсатора при эксплуатации работают под избыточным давлением. Типичный переходный процесс в водоводах и конденсаторе показан на рисунке 9. Он имеет следующие особенности:

- выпуск большого количества воздуха в процессе пуска ($600 - 800 \text{ м}^3$);
- длительная работа насоса на низких напорах 5 – 10 м до начала заполнения конденсатора;
- отжатие уровня в вертикальном участке сливного трубопровода при увеличении давления воздуха;
- при пуске происходит переход всех камер в напорный режим после выхода из них воздуха, сопровождаемый всплеском давления;
- большая длительность процесса пуска (200 – 400 с).

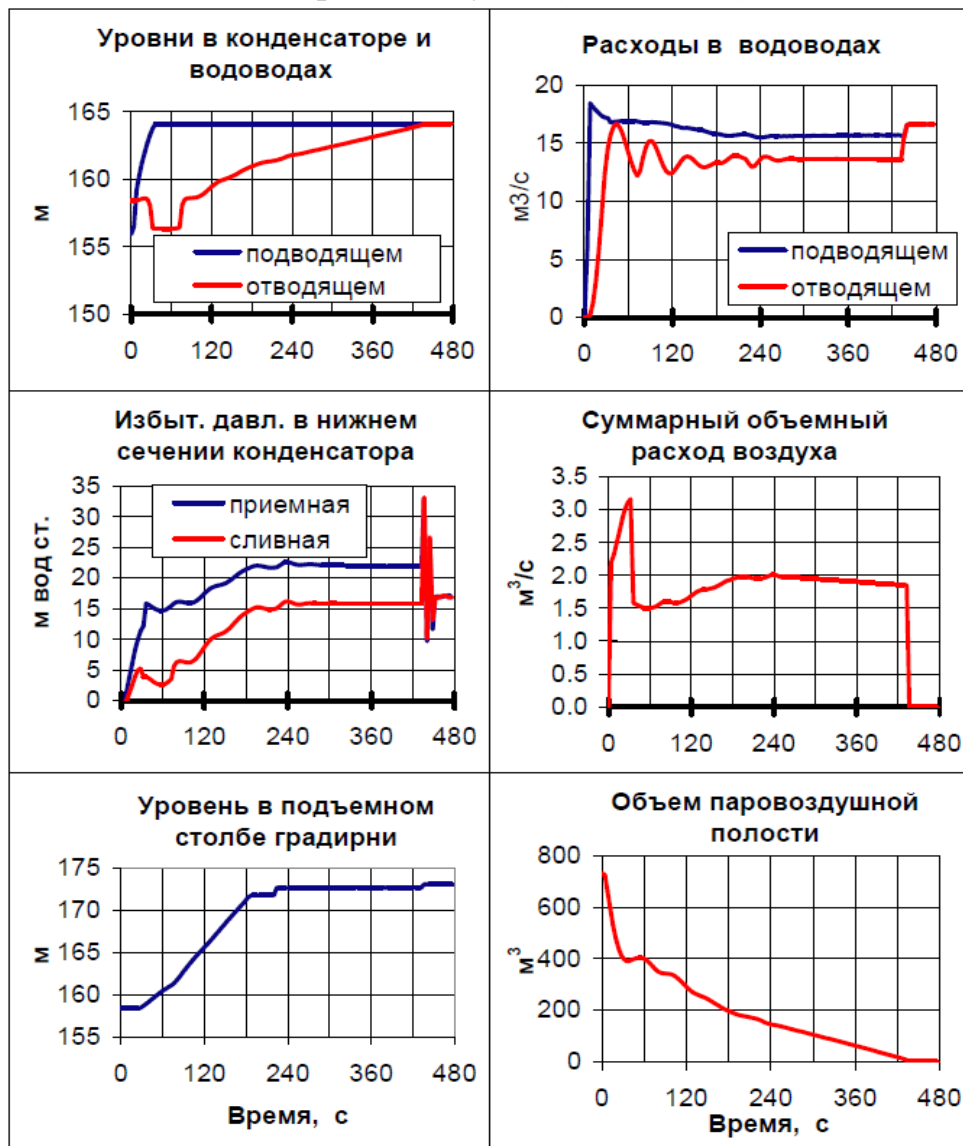


Рисунок 9 – Пуск насоса на частично заполненную систему водоводов.
Процесс в конденсаторе и водоводах

Ограничения, действующие при пусках, и мероприятия по их обеспечению в блочных системах охлаждения с градирнями и без затворов в дополнение к таблице 1 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Дополнительные ограничения, действующие при пусках и мероприятия по их обеспечению в блочных системах охлаждения с градирнями и без затворов

| Действующие ограничения при пусках | Негативные условия | Конструктивные и режимные решения для удовлетворения ограничений |
|---|--|--|
| Работа насоса с повышенными напорами при пуске. | Попадание насоса в область помпажных режимов | - Подбор насоса с повышенным напором перехода в помпажные режимы; - Увеличение размеров клапанов выпуска воздуха. |
| Занапоривание камеры конденсатора после выхода воздуха. | Резкое повышение давления при выравнивании расхода на входе и выходе из камеры конденсатора. | - уменьшение размеров клапанов выпуска воздуха и демпфирование выпуска воздуха при высоком давлении. |

Область неустойчивых режимов присутствует на характеристиках осевых и диагональных насосов. Она характеризуется положительным значением производной dH/dQ . Режимная точка может перемещаться по этой области, но не может на ней остаться с установившимся значениям напора и расхода.

При пусках проход области неустойчивых режимов происходит в трех случаях (рисунок 10):

- случай 1 соответствует скачку напора при проходе опрокидывающего момента электродвигателя в процессе раскрутки насосного агрегата;

- случай 2 соответствует выходу насоса на режим малой подачи вследствие высокой инерционности напорного водовода и малого времени достижения номинальной частоты вращения, когда проход области неустойчивости происходит по мере увеличения расхода (тот же эффект может иметь место при пуске насоса на закрытый обратный клапан);

- случай 3 соответствует постепенному нарастанию напора насоса при пуске в результате повышения уровня свободной поверхности или давления воздуха.

В первом случае процесс прохода области неустойчивых режимов происходит быстро, поскольку режим роста и последующего снижения напора определяется изменением вращающего момента двигателя.

Во втором случае насос проходит область неустойчивых режимов по мере роста расхода с колебаниями и за время 0,5 – 1,5 с. Нами отмечено, что в

зависимости от соотношения между постоянной инерции T_w и временем разворота электродвигателя до номинальной частоты вращения T_n насос может к концу разворота двигателя попадать или не попадать в область неустойчивых режимов.

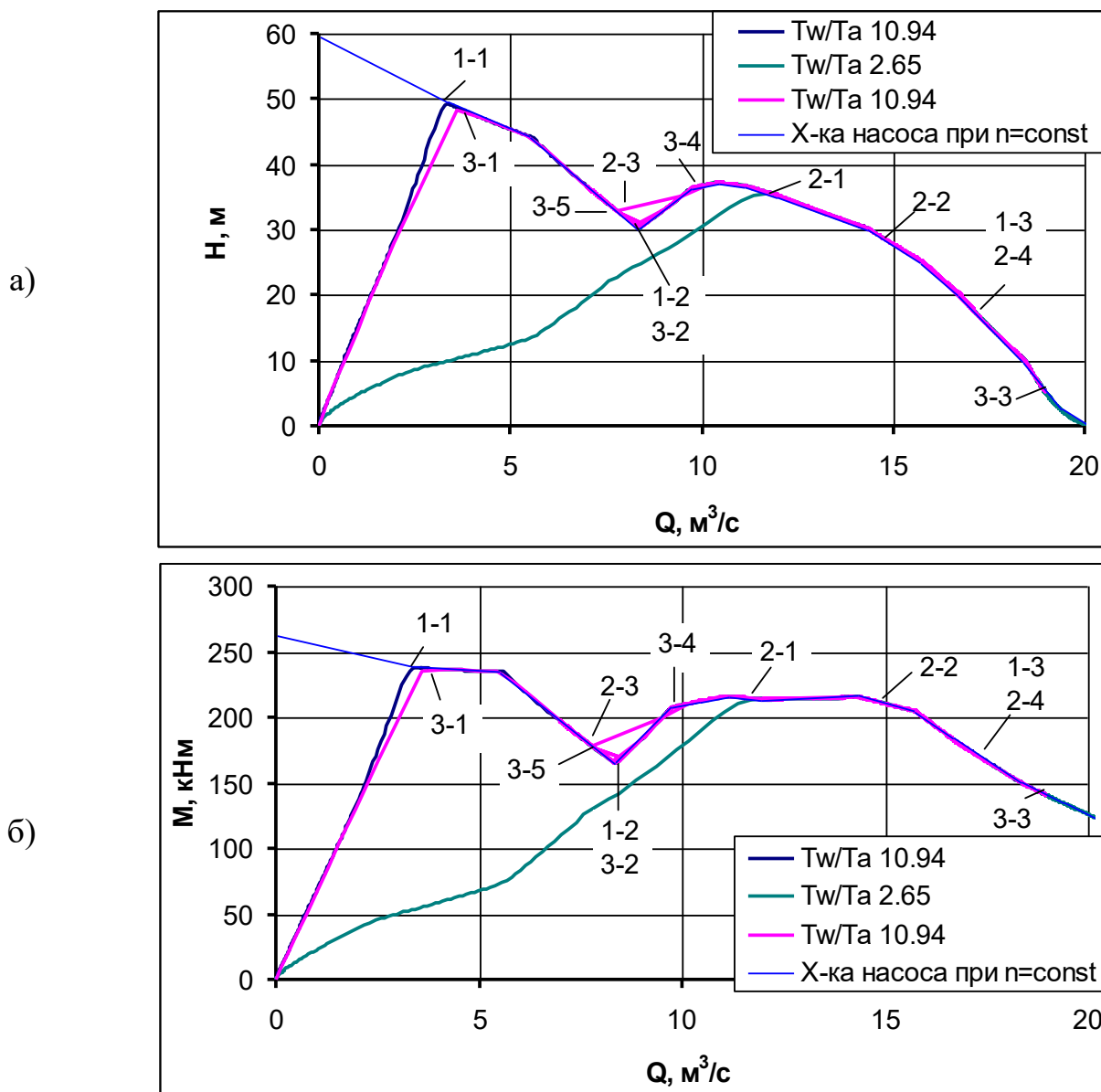


Рисунок 10 – Траектории процесса прохода области помпажных режимов в поле напорно-расходной (а) и расходно-мощностной (б) характеристик насоса; траектория движения режимной точки: Случай 1 – 0 – 1-1 – 1-2 – 1-3; Случай 2 – 0 – 2-1 – 2-2 – 2-3 – 2-4; Случай 3 – 0 – 3-1 – 3-2 – 3-3 – 3-4 – 3-5 – 3-4 – 3-5 – 3-4 ...

На рисунке 11,а представлены траектории начального этапа процесса пуска в зависимости от времени разворота насосного агрегата и в зависимости от постоянной времени водовода. Режимная точка попадает на область неустойчивых режимов при значениях $T_w > 1,5$ с (рисунок 11,б) и при времени разворота агрегата

меньше 5 с, то есть в подавляющем большинстве реальных проектов систем охлаждения.

Третий случай – самый неприятный, поскольку насос попадает сначала на ветвь неустойчивых режимов, по инерции заходит на устойчивую ветвь высоких напоров и малых расходов, затем опять возвращается на неустойчивую. В результате начинаются длительные низкочастотные колебания, сопровождаемые высокими пульсациями давления и вибрациями насосного агрегата. Выход из режима помпажа в этом случае осуществляется отключением насосного агрегата от сети, после чего идет переходный процесс потери привода.

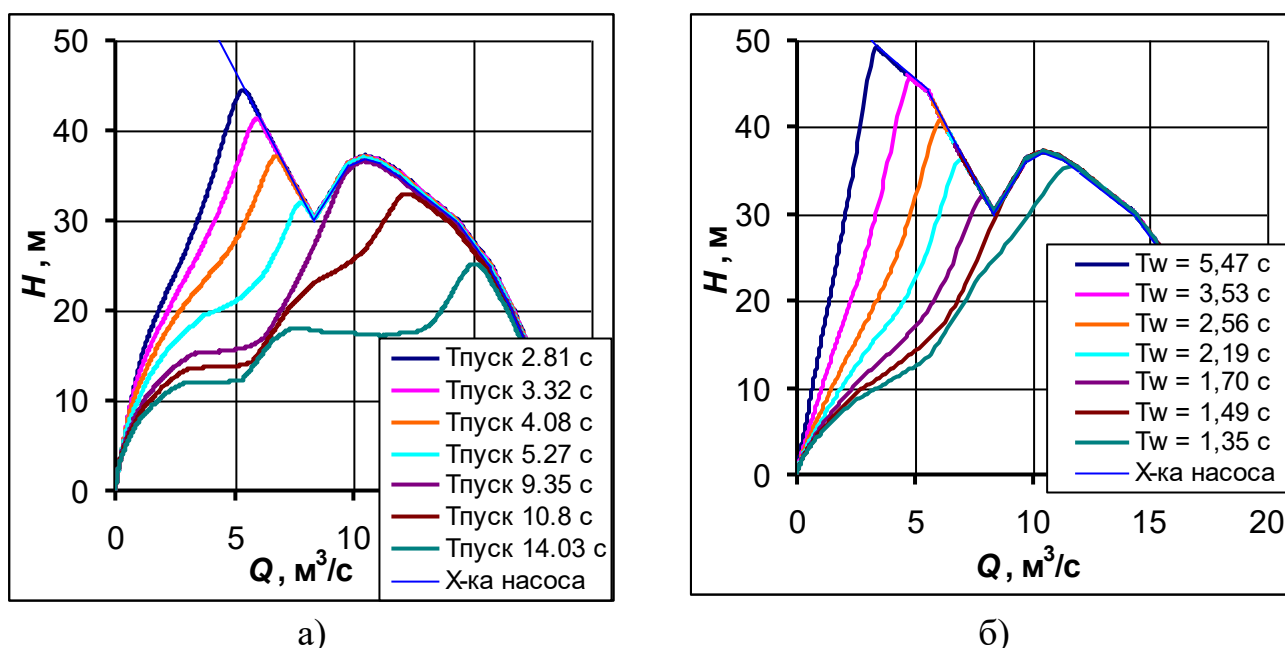


Рисунок 11 – Траектории начального этапа пуска насосного агрегата в зависимости от времени раскрутки до номинальной частоты вращения (а), в зависимости от постоянной времени водовода (б)

Глава 5. Блочные системы охлаждения с градирнями и насосами, оборудованными затворами характеризуются статическими напорами 15 – 20 м. Затвор может быть установлен на напорном патрубке насоса или на сливном трубопроводе между конденсатором и градирней.

При установке затвора между конденсатором и градирней процесс пуска практически не отличается от пуска в системе без затвора. Важным в этом случае является режим своевременного, без задержки режима открытия, чтобы не вывести насос в режим повышенного напора с проходом помпажной области.

Типичный переходный процесс пуска при установке затвора на напорном патрубке показан на рисунке 12. Он имеет следующие особенности:

- залив системы, выпуск всего воздуха и запаривание конденсатора происходит перед пуском;
- пуск насоса и выход на номинальную частоту вращения при нулевом расходе и напоре в 1,5 – 2 раза превышающем напор установившегося режима;
- увеличенные нагрузки на систему привода затвора на напорном патрубке;
- быстрый (за 30 - 40 с) выход на установившийся режим.

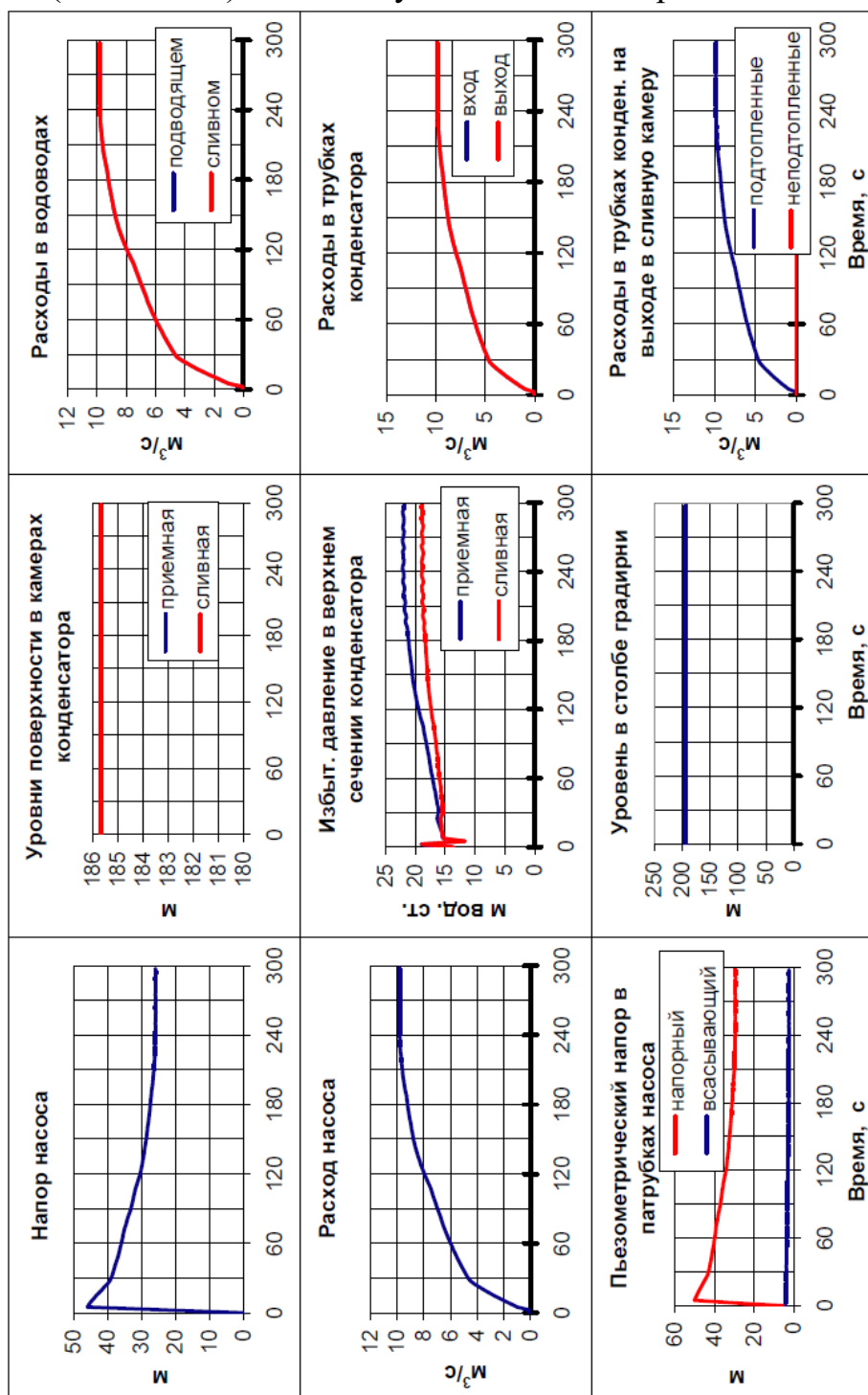


Рисунок 12 – Пуск на полностью заполненный водой конденсатор и работающую градирню; процесс в насосном агрегате и водоводах

В схеме с затвором обязательным является полный выпуск воздуха из камер конденсатора перед пуском. Наличие большого объема воздуха под давлением и прорыв его при пуске пузырями в камеру с установленным на ней воздушным клапаном большого диаметра может вызвать повышенный гидроудар. В этом случае абсолютно необходимым является установка воздушных клапанов на всех корпусах конденсатора для обеспечения выпуска всего воздуха в процессе предварительного заполнения системы водой.

Всплеск давления возникает в момент выпуска последней партии воздуха, занaporивания конденсатора и выравнивания расходов в подводящем и отводящем водоводе, примыкающих к конденсатору. Анализ результатов специальной серии расчетов показал, что на максимально допустимый расход воздуха влияют постоянная инерции напорного отводящего водовода и развиваемый напор насоса. С их ростом максимально допустимый расход выпускаемого воздуха должен снижаться, чтобы не допустить высокого всплеска давления при переходе конденсатора в напорный режим (рисунок 13).

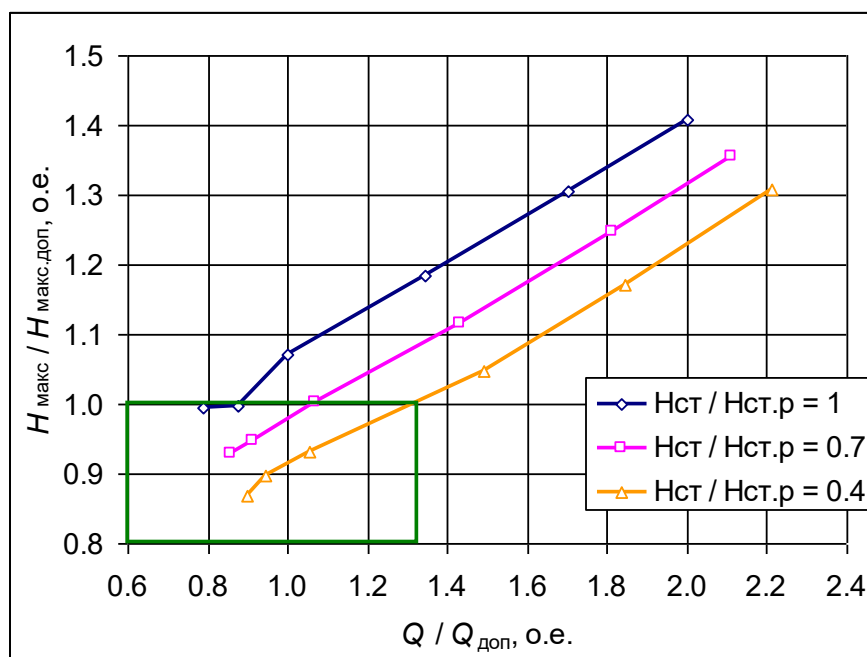


Рисунок 13 – Влияние расхода выдавливаемого воздуха и напора насоса на максимальное повышение давления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Насосные станции систем охлаждения крупных энергетических объектов имеют специфическую трассировку, состав сооружений и оборудования, включая конденсаторы тепловых турбин, градирни, сливные колодцы, особые условия пуска насосных агрегатов, сопровождающиеся в частности необходимостью выпуска

большого объема воздуха, переходом водовода из безнапорного режима в напорный, работой насосов в режимах повышенных и пониженных напоров, высокой динамикой изменения давления в напорных водоводах. Важным аспектом является формулировка системы ограничений, по параметрам и режимам оборудования, позволяющих обеспечить безопасное протекание этих процессов с учетом применяемых типов и состава сооружений насосных станций.

2. Опыт исследований показал, что математическая модель расчетов переходных процессов в водоводах насосной станции систем охлаждения должна базироваться на использовании модели упругого гидроудара. Специально должно учитываться изменение длины напорного участка водовода и волновой эффект при заполнении участка водовода со свободной поверхностью, сжатие и выпуск воздуха, находящегося в системе перед пуском, эффект заполнения трубок конденсатора, колебания свободной поверхности в камерах.

3. Важную роль играет учет гидравлических потерь напора по длине, местных и на регулирующей арматуре (затворах и обратных клапанах). Выполненный анализ трех альтернативных моделей для описания потерь напора в запорной арматуре, особенно при малых открытиях показал, что модель расчета потерь напора через переменный коэффициент сопротивления и произведение скоростных напоров в предыдущий и текущий моменты времени обеспечивает устойчивость расчетного алгоритма в отличие от расчета потерь напора через коэффициент расхода и произведение скоростных напора в предыдущий момент времени.

4. Универсальной, для представления расходной и моментной характеристик насоса является система полярных координат. Она позволяет однозначно определять положение режимной точки в поле характеристики, в том числе и при попадании насоса в область неустойчивых помпажных режимов.

5. Граничные условия по изменению расхода и вращающего момента с учетом оборотно-расходной и оборотно-моментной характеристик насоса вместе с уравнениями гидроудара на примыкающих к насосу участках напорного водовода приводят к системе 2-х нелинейных уравнений относительно напора и частоты вращения переменными, уточняемыми на этапах итераций коэффициентами. Наилучшую сходимость алгоритма во всех практических случаях при количестве итераций не более 10-ти обеспечивает метод Ньютона.

6. Анализ влияния на условия пусков угла установки лопастей показал, что пуск на минимальном угле установки лопастей диагонального насоса снижает на 15 – 17% максимальное давление в конденсаторе по сравнению с пуском на рабочем угле. Однако следует учитывать, что при пуске на минимальном угле лопастей на 30 – 40% увеличивается амплитуда колебаний момента на лопастях рабочего колеса насоса.

7. В схемах охлаждения с высоким расположением подводющих трубопроводов, положительного эффекта увеличения минимального напора насоса можно добиться за счет дополнительного волнового напора при занaporивании безнапорного горизонтального участка подводящего водовода. Выполненный обобщенный анализ расчета дополнительного волнового напора показал, что требуемое увеличение напора насоса на 4 – 6 м обеспечивается при начальном заполнении трубопровода на 70 – 80 % по высоте.

8. По условиям протекания переходных процессов выделены две характерные схемы: с водосливом в верхнем бьефе и с градирней. В свою очередь схема с градирней имеет особенности пусков в зависимости от наличия или отсутствия регулирующего затвора по трассе водоводов.

9. Исследования переходных процессов позволили сформулировать состав ограничений для процесса пуска в системах охлаждения, среди которых выделяются:

- длительность выхода агрегата на номинальную частоту вращения;
- работа насоса на пониженных и повышенных напорах;
- отжатие уровня в отводящем трубопроводе по мере сжатия воздуха;
- амплитуда колебаний уровня в сливной камере;
- высокая амплитуда колебаний момента на лопастях.

10. Анализ влияния на условия пусков соотношения постоянных инерции водоводов и насосного агрегата показал, что при значениях T_w/T_a более 1,75 режимная точка выходит на неустойчивую ветвь характеристики диагонального насоса.

Проход области неустойчивых режимов при пуске вследствие высокой инерционности напорного водовода или при пуске насоса на закрытый обратный клапан происходят быстро с гарантированным выходом на устойчивую ветвь характеристики. Опасным и длительным является случай попадания на неустойчивую ветвь при постепенном нарастании напора в процессе заполнения системы и выпуска воздуха. Такой вариант увеличения напора при пуске должен быть исключен.

11. При технической возможности, в системах с градирней, рекомендуется полное заполнение системы водой перед пуском путем создания вакуума. В этом случае процесс пуска происходит при меньшем максимальном давлении, чем с выпуском воздуха. Анализ влияния уровня нижнего бьефа показал, что максимальные давления по трассе достигаются при максимальной его отметке.

12. При пусках насоса на закрытый затвор на напорном патрубке важным является выпуск всего воздуха из конденсатора. Наличие большого объема воздуха под давлением (при заполненной градирне) приводит к высокой динамике и

высокому гидроудару при его выпуске в переходном процессе. Анализ результатов специальной серии расчетов показал, что на максимально допустимый расход воздуха влияют постоянная инерция напорного отводящего водовода и развиваемый напор насоса. С их ростом максимально допустимый расход выпускаемого воздуха должен снижаться, чтобы не допустить высокого всплеска давления при переходе конденсатора в напорный режим.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Основным направлением для дальнейшей работы является исследование специальных гидромеханических переходных процессов с учетом специфики и структуры гидравлических систем охлаждения крупных энергетических объектов, таких, как системы ответственных и неответственных потребителей, а также системы подпитки.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»:

1. Голубев А.В. Особенности моделирования потерь напора на регулирующих затворах в расчетах переходных процессов насосных станций // Вестник МГСУ, 2013, № 12, с. 148-155.

2. Берлин В.В., Муравьев О.А., Голубев А.В. Пуски насосных агрегатов в системах технического водоснабжения с градирнями на ТЭС и АЭС // Гидротехническое строительство, 2016, № 10, с. 27-34.

3. Голубев А.В. Особенности пусков насосных агрегатов в системах технического водоснабжения // Гидротехническое строительство, 2023, № 3, с. 47-53.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science:

4. Berlin V.V., Murav'ev O.A., Golubev A.V. Startup of Pumping Units in Process Water Supplies with Cooling Towers at Thermal and Nuclear Power Plants // Power Technology and Engineering, 2017, Vol. 50, Issue 6, pp. 593-599.

5. Golubev A.V. Features of the Start-Up of Pumping Units in Service Water Systems // Power Technology and Engineering, 2023, Vol. 57, Issue 3, pp. 377-382.