

## Особенности пусков насосных агрегатов в системах технического водоснабжения

Голубев А. В.<sup>1</sup>, старший преподаватель (НИУ МГСУ; ООО “Белый уголь”)

Приводится описание результатов исследований насосных станций систем технического водоснабжения (ТВС), работающих на охлаждение конденсаторов мощных паровых турбин. Рассматриваются особенности переходных процессов при пусках насосных агрегатов на станциях с различным составом сооружений и оборудования. Предложена классификация рассматриваемых систем по условиям протекания переходных процессов. Показаны основные характеристики программы расчётов по учитываемым факторам и используемому математическому аппарату, особенности процессов в конденсаторе паровой турбины, специфика энергетических характеристик диагональных насосов. Дается описание процессов пуска в различных системах ТВС — с водосливами, с градирнями, при установленных или отсутствующих регулирующих затворах, а также системы ограничений по параметрам процессов пуска, обеспечивающей их успешную и безопасную работу. Исследования переходных процессов выполнены методом математического моделирования с учётом упругости воды.

**Ключевые слова:** насосные станции технического водоснабжения, системы охлаждающей воды, переходные процессы, пуски насосных агрегатов, математическое моделирование, конденсатор паровой турбины, характеристики диагональных насосов, гидравлический удар в напорных водоводах.

## Features of starting pumping units in technical water supply systems

Golubev A. V.<sup>1</sup>, Senior teacher (NRU MGSU; Ltd. “White Coal”)

A description is given of the results of studies of pumping stations of industrial water supply systems (TWS), working to cool the condensers of powerful steam turbines. The features of transient processes during start-ups of pumping units at stations with different designs and equipment are considered. The proposed classification of the systems under consideration according to the conditions for the occurrence of transient processes is shown. The main characteristics of the calculation program according to the factors taken into account and the mathematical apparatus used, the features of the processes in the condenser of a steam turbine, the specifics of the energy characteristics of diagonal pumps are given. The description of starting processes in various TWS systems — with spillways, with cooling towers, with installed control gates and without them, as well as a system for limiting the parameters of starting processes, which ensures their successful and safe operation, is given. The study of transient processes was carried out by the method of mathematical modeling, taking into account the elasticity of water.

**Keywords:** industrial water supply pumping stations, cooling water systems, transient processes, pumping unit start-ups, mathematical modeling, thermal turbine condenser, characteristics of diagonal pumps, water hammer in penstocks.

В статье изложены результаты исследований переходных процессов в системах технического водоснабжения (ТВС) и охлаждения конденсаторов крупных паровых турбин тепловых электростанций.

В литературе по рассматриваемой теме [10, 11, 13] предложена классификация систем, включающих конденсатор, подводящий и отводящий водоводы, фильтры и другое оборудование, из которой можно выделить две группы компоновок с близким характером переходных процессов: блочные системы ТВС с сифонными колодцами в верхнем бьефе (рис. 1) и блочные/центральные системы с градирнями (рис. 2). Дополнительную специфику процессам придаёт установка на трассе регулирующих затворов.

Обзор источников показал [1, 2, 4, 9, 10], что в анализе процессов, протекающих в системах технического водоснабжения, преобладают описания переходных процессов в натуральных условиях с ана-

лизом осциллограмм, полученных при натуральных испытаниях.

В обширной литературе по моделированию переходных процессов в вышеупомянутых системах насосных станций обычно рассматриваются аварийные процессы при потере привода, сопровождающиеся, как правило, разрывом сплошности потока [5 – 7, 9, 14], что ставит вопросы защиты водоводов от гидравлического удара при разрыве и последующем смыкании разошедшихся колонн жидкости. При этом остаются неохваченными плановые процессы, при которых, как показал опыт наших исследований, возникают высокие нагрузки на насосное оборудование, конденсаторы и другие узлы системы.

В публикациях рассматриваются вопросы расчётов переходных процессов в системе “напорные водоводы — насосные агрегаты” [5, 7, 8, 12, 15, 16]. Из них следует, что основным методом исследования является математическое моделирование неустановившегося движения жидкости с учётом граничных условий, характеристик насосного и регулирующего оборудования.

<sup>1</sup> GolubevAV@whitecoal.ru

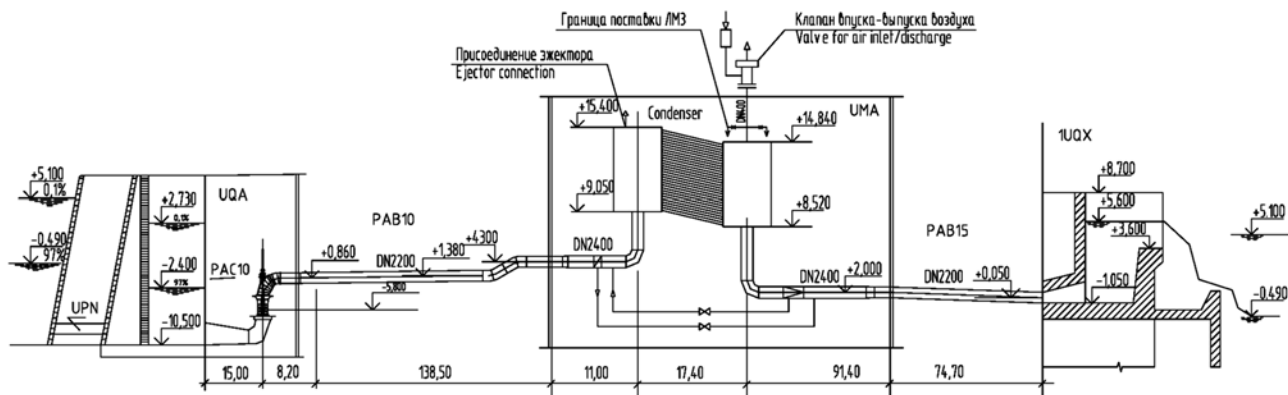


Рис. 1. Блочная система технического водоснабжения с сифонными колодцами

Поскольку размеры по длине на несколько порядков превышают размеры поперечных сечений напорных водоводов, то в описании неустановившегося напорного течения традиционно используются одномерные математические модели упругого гидравлического удара, когда скорость волны определяется с учётом упругости воды и облицовки водоводов.

Система дифференциальных уравнений в частных производных приводится к конечно-разностному виду методом характеристик. В условиях постоянной скорости волны наиболее подходящим является метод характеристик с регулярной сеткой, однозначно связывающий длину расчётных участков по трассе водовода с шагом расчёта по времени и скоростью волны [7, 8, 12].

Подводя итоги обзора публикаций, следует отметить, что в имеющейся литературе недостаточное место уделяется моделированию плановых процессов, в частности пусков насосных агрегатов, и учёту специфики работы в переходных режимах такого сложного оборудования, как конденсатор паровой турбины.

Опыт проектирования и эксплуатации насосных станций систем технического водоснабжения и охлаждения конденсаторов паровых турбин показал необходимость систематизации требуемых ограничений величин параметров при пусках насосных агрегатов.

Такой подход позволяет гарантировать безопасное протекание процессов с учётом специфики конструкций, состава сооружений и установленного оборудования. Основные результаты исследований получены с использованием математического моделирования и подтверждены результатами натурных испытаний.

Требования к расчётной модели переходных процессов должны включать учёт упругости воды и облицовки водоводов, потерь напора по длине и местных, в том числе на регулирующих затворах и фильтрах, учёт специфики работы в переходных

процессах такого сложного оборудования, как насосный агрегат и конденсатор паровой турбины, а также возможность имитации разрыва сплошности потока с его последствиями.

Граничные условия по насосу агрегату формируются с использованием четырехквadrантных оборотно-расходной и оборотно-моментной характеристик в полярных координатах [1, 8, 14, 15]. Такое представление характеристик насоса позволяет однозначно определять параметры режимной точки по напору, расходу и мощности в любой области характеристики, включая область неустойчивых (помпажных) режимов.

Для получения адекватной картины процесса граничные условия по конденсатору должны учитывать изменение уровней в приёмной и сливной камерах, расходы через титановые трубки, изменение давления в воздушной полости, постепенное заполнение трубок при пусках.

Конденсатор моделируется идентично пневматическому уравнительному резервуару, имеющему воздухообмен с атмосферой. По результатам расчётов подбираются параметры воздушных клапанов и их количество. Следует учитывать возможность запаривания камер конденсатора при выходе всего воздуха, когда возникает всплеск давления в результате выравнивания приходящего и уходящего расходов.

На рис. 3 показана упрощённая схема конденсатора паровой турбины, основными частями которого являются приёмная и сливная камеры и соединяющий их блок титановых трубок. Для удаления воздуха из полости конденсатора в верхней части камер предусмотрены воздухопроводы для установки на них клапанов впуска-выпуска воздуха и запорной арматуры. В процессе пуска камеры могут работать со свободной поверхностью и переходить в напорный режим при выпуске всего находящегося в них воздуха.

Рабочий диапазон напоров рассматриваемых систем ТВС находится в диапазоне 20 – 30 м, что

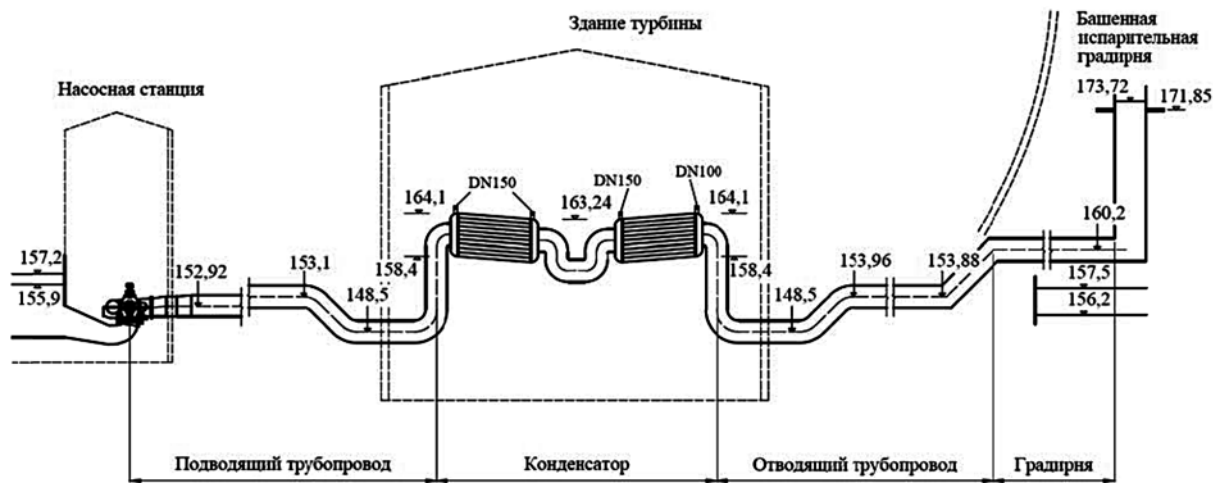
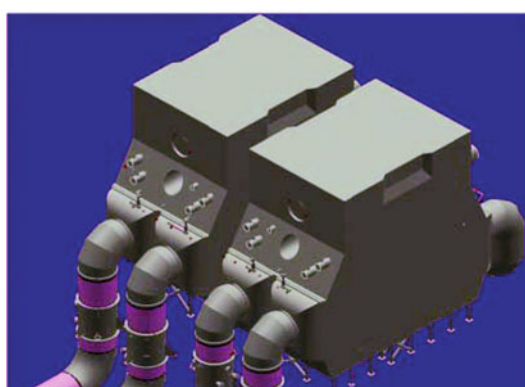
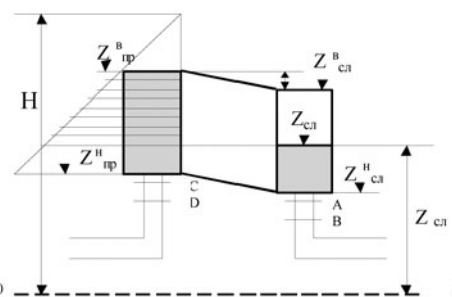


Рис. 2. Блочная система технического водоснабжения с градирней



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид (а) и расчётная гидравлическая схема (б) конденсатора паровой турбины

попадает в область использования насосов диагонального типа. Диагональные насосы могут быть поворотно-лопастными или пропеллерными с предротацией, позволяющей изменять положение лопаток направляющего аппарата на входе в рабочее колесо насоса. Особенностью характеристик диагональных насосов являются высокие значения напора и мощности при нулевой подаче.

Вторая особенность — наличие зоны неустойчивых (помпажных) режимов в диапазоне расходов 30 – 60 % от номинального [1, 10, 11]. Попадание режимной точки в область помпажа может вызвать колебательный процесс, сопровождаемый значительными колебаниями расхода и напора, а также существенными пульсациями ударного характера. Поэтому регулирующие затворы на диагональных насосах, как правило, не устанавливаются. Пример характеристик в относительных координатах приведен на рис. 4. За единицу приняты расход и напор номинального режима.

Существующие конструкции насосных станций по условиям протекания переходных процессов можно разделить на две группы. Первая (рис. 1) —

разомкнутая, с водосливом на выходе потока и с последующим сбросом воды в большую акваторию, вторая (рис. 2) — замкнутая, с градирнями.

В разомкнутой схеме (см. рис. 1) конденсатор имеет самое высокое расположение по трассе. В установившихся режимах сливная камера работает с вакуумом 6 – 7 м в верхней точке. Пуски проходят на частично заполненную водой систему водоводов и заполненный воздухом конденсатор. Пример пуска показан на рис. 5. Процесс пуска имеет следующие особенности:

- выпуск большого объема воздуха из конденсатора;
- длительная работа насоса на пониженных напорах;
- отжатие уровня в сливном трубопроводе при увеличении давления воздуха;
- колебания свободной поверхности в сливной камере конденсатора;
- длительность пуска до 200 – 400 с.

В системах ТВС с градирнями и без затвора за насосом подъемный столб градирни выводится выше конденсатора, который в установившемся ре-

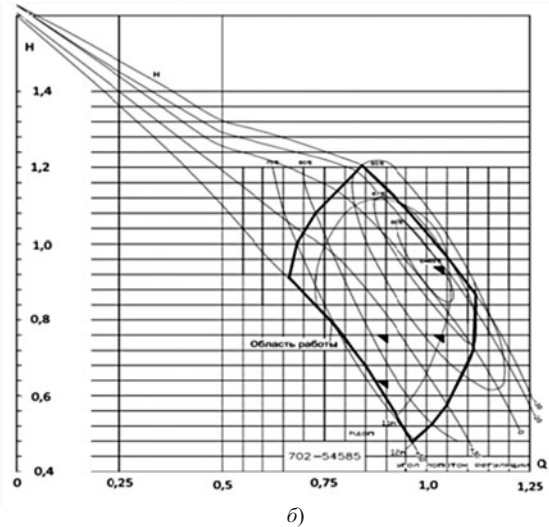
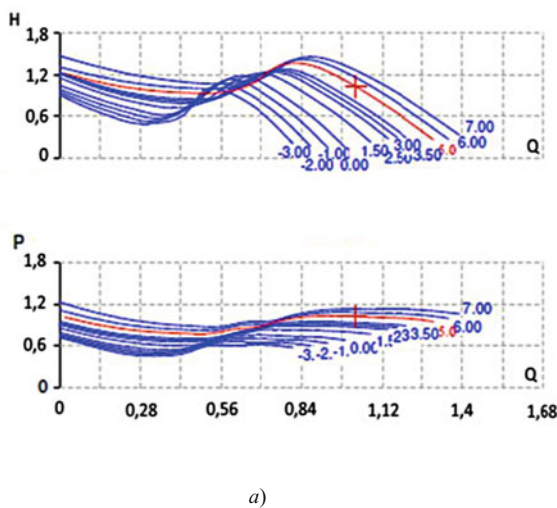


Рис. 4. Пример характеристик насосов в относительных координатах: диагонального поворотного-лопастного (а) и пропеллерного с предтопацией (б)

жиме работает под избыточным давлением. Пример пуска в такой системе показан на рис. 6. К перечисленным особенностям добавляется всплеск давления при переходе камер конденсатора в напорный режим, что требует ограничения расхода выпускаемого воздуха.

Анализ результатов специальной серии расчётов показал, что на максимально допустимый расход воздуха через каждый клапан влияют постоян-

ная инерция напорного отводящего водовода и развиваемый напор насоса (рис. 7).

С их ростом максимально допустимый расход выпускаемого воздуха должен снижаться, чтобы не допустить высокого всплеска давления при переходе конденсатора в напорный режим.

В системах ТВС с градирнями и насосами, оборудованными затворами, возможно полное вытеснение воздуха из конденсатора при заполнении во-

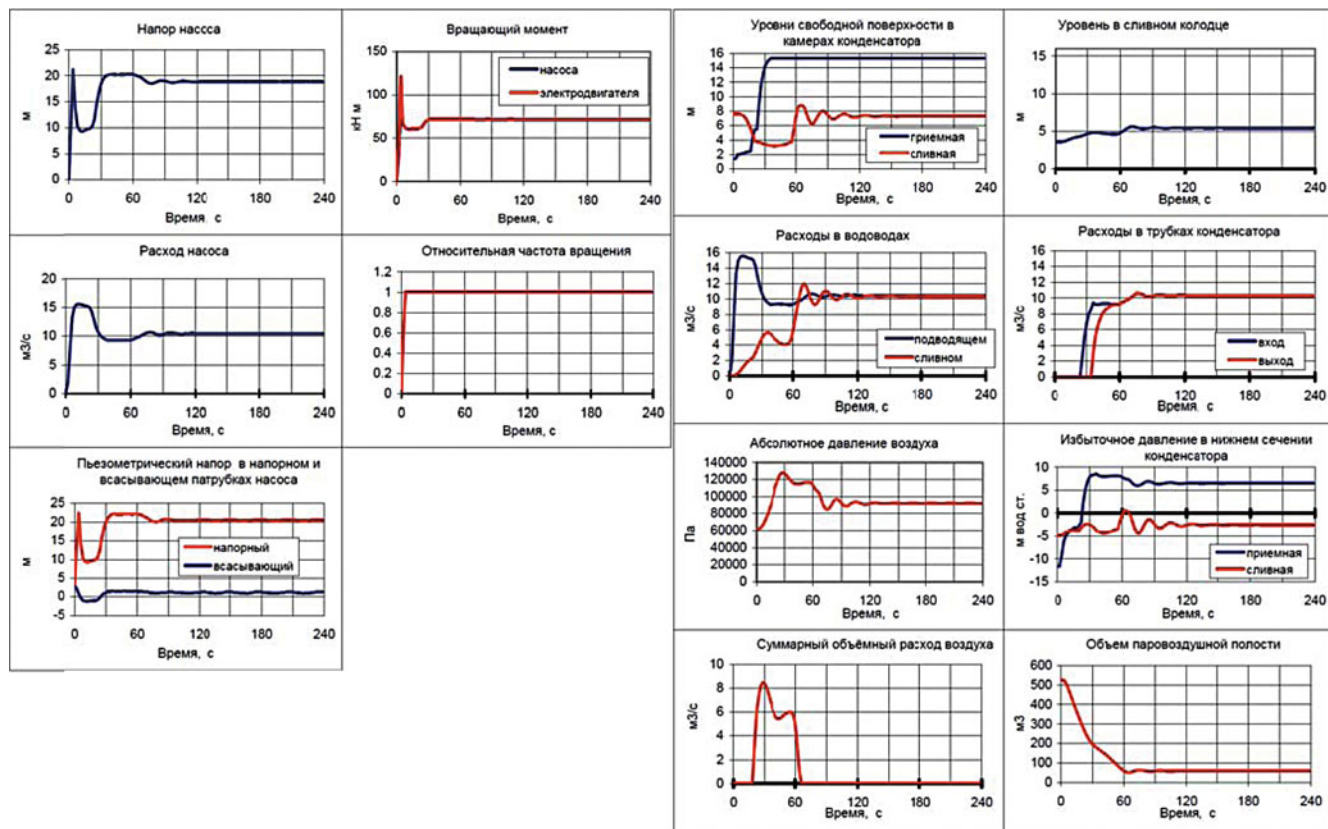


Рис. 5. Пример пуска насосного агрегата на частично заполненные водоводы и заполненный воздухом конденсатор в системе ТВС с сифонным колодцем в верхнем бьефе



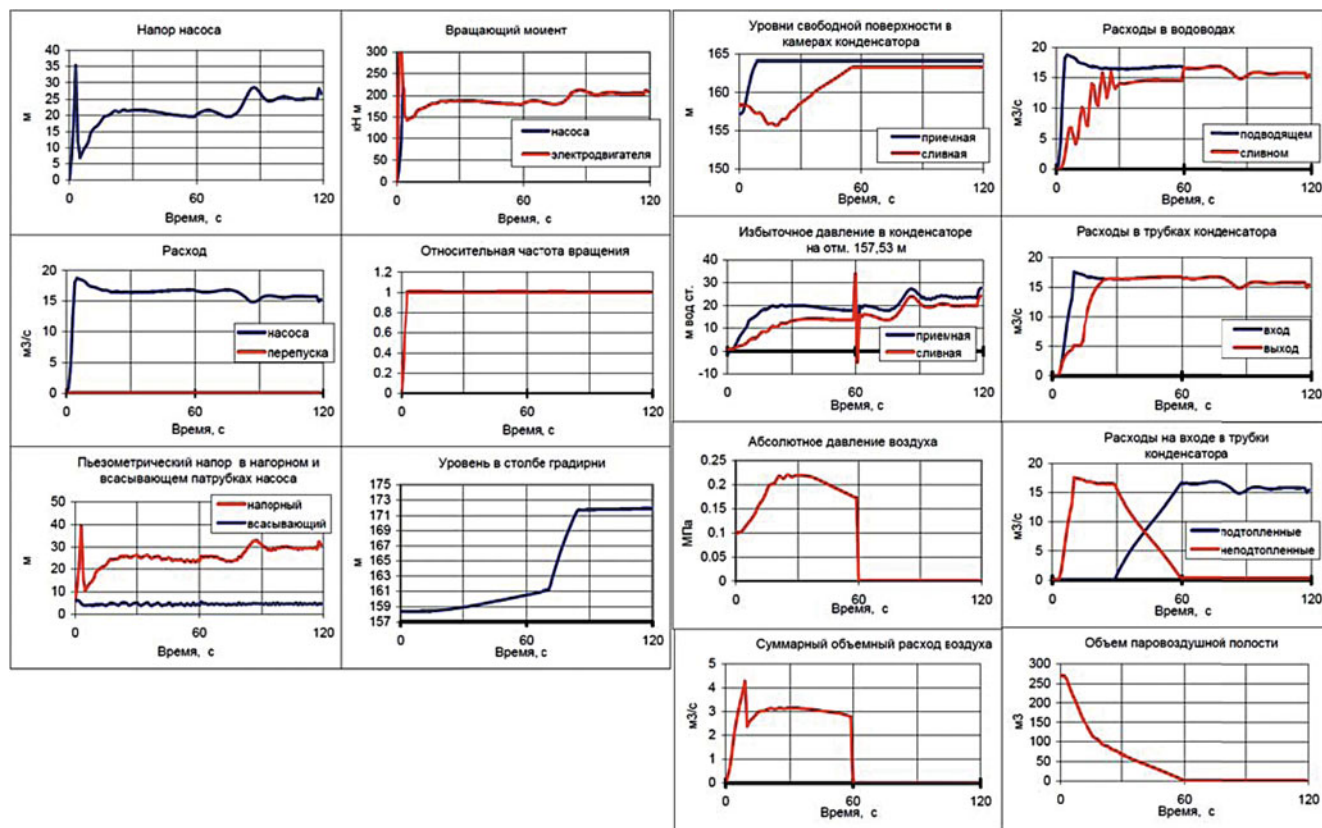


Рис. 6. Пример пуска на частично заполненные водоводы и заполненный воздухом конденсатор в системе ТВС с градирней

дой системы перед пуском. Картина пуска (рис. 8) такова:

- выход насоса на номинальную частоту вращения при нулевом расходе, максимальном напоре и высокой мощности;
- повышенные нагрузки на систему привода обратного затвора при открытии;
- проход насосом через зону помпажа в процессе открытия затвора;
- выход на установившийся режим за 30 – 40 с.

Общими для всех схем являются при пусках высокие знакопеременные нагрузки от гидравлического момента на лопастях. Их учёт особенно важен для диагональных поворотных лопастных насосов, имевших поломки механизма разворота на лопастях и трещины на них.

Анализ экстремумов параметров при пусках позволил сформулировать систему ограничений успешного и безопасного протекания исследуемых процессов. Среди основных ограничений можно выделить следующие:

- длительность выхода агрегата на номинальную частоту вращения, по которой определяется требуемая пусковая характеристика электродвигателя;
- работа насоса на пониженных и повышенных напорах, в том числе проход зоны помпажа при пуске;

- отжатие уровня в отводящем водоводе, предотвращение проскока пузыря в отводящий водовод, всплеск давления при переходе конденсатора в напорный режим.

Варьируемыми параметрами являются:

- типы применяемых насосов (наиболее надёжные решения дают насосные агрегаты с жёстко закреплёнными лопастями и с предротацией, позволяющей регулировать подачу);
- угол установки лопастей или лопаток предротации, позволяющий получать минимальные расходы при пуске;

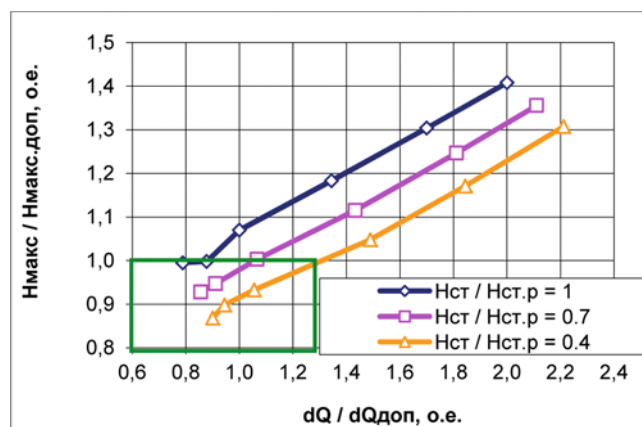


Рис. 7. Влияние расхода выдавливаемого воздуха и напора насоса на максимальное повышение давления

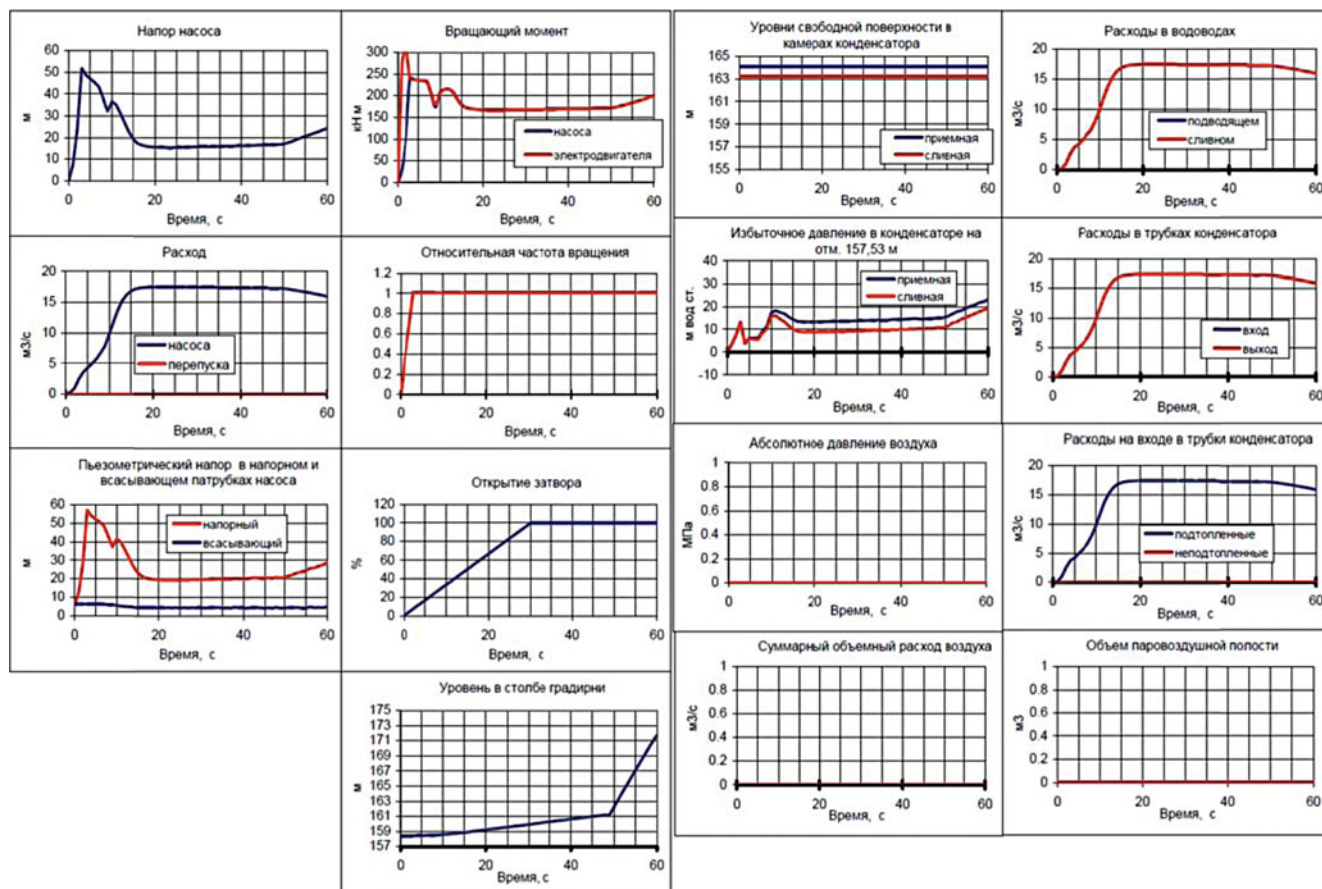


Рис. 8. Пример пуска на заполненную водой систему технического водоснабжения с градирней и регулирующим затвором

- количество и параметры клапанов выпуска воздуха из конденсатора;
- заполнение системы водой путём создания вакуума;
- холостой сброс части расхода насоса в нижний бьеф;
- устройство байпаса в обход конденсатора.

## Выводы

1. Предложенная классификация систем технического водоснабжения позволила выделить две основные группы компоновок по условиям протекания процессов пуска.
2. Сформулированы требования к расчётным моделям для получения адекватных результатов расчётов процессов пуска насосных агрегатов.
3. Показано, что к основным экстремумам параметров переходных процессов, влияющих на успешность и безопасность протекания пусков, относятся продолжительность выхода агрегата на номинальную частоту вращения, максимальный и минимальный напоры насоса, а также длительность работы на этих напорах, отжатие уровня в сливном трубопроводе при увеличении давления воздуха, амплитуда колебаний уровня в сливной камере кон-

денсатора, максимальное повышение давления при переходе конденсатора в напорный режим.

4. Математическое моделирование переходных процессов позволило решить вопрос обеспечения допустимых ограничений по указанным экстремумам путём подбора следующих параметров: угла установки лопастей рабочего колеса или лопаток системы предротации, мощности и момента инерции приводного электродвигателя, величины создаваемого предварительного вакуума, количества и характеристик воздушных клапанов, расходных характеристик линии холостого сброса и байпасной линии в обход конденсатора.

## Список литературы

1. Аршеневский Н. Н., Поспелов Б. Б. Переходные процессы крупных насосных станций. — М.: Энергия, 1980. — 110 с.
2. Берлин В. В., Муравьев О. А. Особенности пуска насосных агрегатов систем ТЭС ТЭС и АЭС при длинных водоводах и больших колебаниях нижнего бьефа // Гидротехническое строительство. 2000. № 11. С. 18 – 22.
3. 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.
4. Виссарионов В. И., Белыев С. Г. Управление переходными процессами в насосных станциях с целью снижения динамических нагрузок // Электрические станции. 1985. № 10. С. 12 – 16.

5. Вишневецкий К. П. Применение ЭВМ для расчета нестационарных процессов движения воды в напорных трубопроводах // Математика и ЭВМ в мелиорации. — М., 1971. С. 100 – 110.
6. Вишневецкий К. П. Использование ЭВМ для расчета переходных процессов // Гидротехника и мелиорация. 1978. № 9. С. 69 – 70.
7. Вишневецкий К. П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. — М.: Агропромиздат, 1986. — 136 с.
8. Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках / Под ред. Г. И. Кривченко. — М.: Энергия, 1975. — 368 с.
9. Смирнов Д. Н., Зубов Л. Б. Гидравлический удар в напорных водоводах. — М.: Стройиздат, 1975. — 125 с.
10. Карелин В. Я., Новодережкин Р. А. Насосные станции гидротехнических систем с осевыми и диагональными насосами. — М.: Энергия, 1979. — 238 с.
11. Карелин В. Я., Новодережкин Р. А. Насосные станции с центробежными насосами. — М.: Стройиздат, 1983. — 224 с.
12. Лямаев Б. Ф., Небольсин Г. П., Нелобов В. А. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. — Л.: Машиностроение, 1978. — 192 с.
13. Новодережкин Р. А. Насосные станции систем технического водоснабжения ТЭС и АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 265 с.
14. Фокс Д. А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах: Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1981. — 248 с.
15. Fox J. A. Hydraulic analysis of unsteady flow in pipe networks. — The macmillan press Ltd, 1977. — 216 sec.
16. Berlin V., Myrav'ev O., Golubev A. Startup of Pumping Units in Process Water Supplies with Cooling Towers at Thermal and Nuclear Power Plants // Power Technology and Engineering. 2017, march. Vol. 50. No 6. С. 593 – 599.

Журнал включен в перечень ВАК.  
Свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ № ФС77-37646 от 1 октября 2009 г.  
Рег. орган – Роскомнадзор  
При перепечатке ссылка на журнал  
«Гидротехническое строительство» обязательна.

---

Сдано в набор 10.02.2023. Подписано в печать 13.03.2023. Дата выхода в свет 24.03.2023

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Печ. л. 6,75. Цена свободная

---

Оригинал-макет выполнен в издательстве “Фолиум”  
127411, Москва, Дмитровское ш. 157, тел/факс 8(499) 258-08-28

**Internet:** <http://www.folium.ru>, **E-mail:** [info@folium.ru](mailto:info@folium.ru)

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”