

На правах рукописи

Казанцев Родион Петрович

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ
НАСОСОВ АЭС

Специальность 05.04.13 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Климович Виталий Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Елистратов Виктор Васильевич

кандидат технических наук, доцент Захаров Александр Викторович

Ведущая организация: ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится **«13» декабря 2011 г. в 16 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, ауд. 225 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан «__» ноября 2011г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.09

доктор технических наук, профессор

Хрусталеv Б.С.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В соответствии с Федеральной целевой программой «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007-2010гг. и на перспективу до 2015 г.», развитие атомной энергетики является одной из приоритетных задач. Если в настоящий момент на долю атомной энергетики приходится около 16% выработки электроэнергии, то к 2030 году, согласно Федеральной целевой программе, должно быть построено 40 новых энергоблоков. Доля выработки электроэнергии на АЭС России должна к этому времени достичь 25%.

Кроме увеличения количества новых энергоблоков АЭС, данная программа ставит задачу создания нового проекта блока АЭС с увеличенной мощностью. На данный момент из находящихся в эксплуатации в России самыми мощными являются АЭС с блоками ВВЭР-1000 (АЭС с водо-водяным энергетическим реактором и электрической мощностью 1000 МВт). Новый проект АЭС, получивший название «АЭС-2006», должен иметь электрическую мощность ~ 1150 МВт, при этом в связи со сжатыми сроками, отпущенными на разработку, новый проект блока АЭС должен быть основан на существующем проекте ВВЭР-1000 с минимальными изменениями.

Для обеспечения циркуляции теплоносителя и отвода тепла от реактора на АЭС используются главные циркуляционные насосы (ГЦН). С увеличением мощности реактора увеличивается и объем воды, который необходимо через него прокачать, и как следствие, требуется изменение проточной части ГЦН. Однако, как уже упоминалось, в связи со сжатыми сроками разработки нового проекта «АЭС-2006» было принято решение о необходимости модификации проточной части ГЦН для обеспечения требуемых параметров по расходу и напору без внесения значительных изменений в ее конструкцию. Дополнительным условием было сохранение комбинированного отвода ГЦН, состоящего из сферического корпуса и направляющего аппарата.

В данной работе рассматривается задача совершенствования проточной части ГЦН за счет модернизации только рабочего колеса с целью получения более высоких энергетических характеристик без потери к.п.д.

Цель работы. Повышение энергетических показателей проточной части Главного Циркуляционного Насосного Агрегата (ГЦНА) только за счет модернизации его рабочего колеса при сохранении комбинированного отвода, состоящего из сферического корпуса и направляющего аппарата, и выдача рекомендаций по проектированию проточных частей ГЦНА с центробежным рабочим колесом высокой быстроходности ($n_s \sim 300 \dots 350$) и с направляющим аппаратом.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложена упрощенная методика, позволяющая оценивать возможность меридионального отрыва потока в цилиндрическом направляющем аппарате ГЦНА при известном распределении закрутки потока на выходе из рабочего колеса.
- На основе проведенных расчетно-экспериментальных исследований дано обоснование необходимости снижения градиента закрутки потока на входе в направляющий аппарат для достижения высоких энергетических показателей ГЦНА с высокой быстроходностью ($n_s = 330$). Даны и апробированы предложения по модернизации выходной кромки рабочего колеса ГЦНА.
- Показано, что при использовании комбинированного отвода, состоящего из сферического корпуса и направляющего аппарата цилиндрической формы, колесо с цилиндрической формой лопасти на выходе (при быстроходности $n_s=330$) показывает лучшие энергетические показатели, нежели колесо с пространственной формой лопасти, спроектированное на основе метода задания равноскоростного меридионального потока;

Практическое значение работы.

- Даны апробированные экспериментально рекомендации по проектированию проточных частей ГЦНА с центробежным рабочим колесом высокой быстроходности с направляющим аппаратом.
- Полученные в результате выполнения настоящей диссертации результаты используются в настоящее время при производстве ГЦНА для современных блоков АЭС с реакторами типа ВВЭР- 1000 и «АЭС-2006».

Внедрение работы. Результаты работы используются при проектировании новых проточных частей ГЦНА в ОАО «ЦКБМ».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 4-ой и 6-ой Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», Санкт-Петербург, 2006г., 2010г.

Публикации. Содержание работы отражено в 7 печатных работах, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы (65 наименований), содержит 142 страницы машинописного текста, 99 иллюстраций, 18 таблиц.

Основное содержание работы.

Введение. Обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы ее основная цель и задачи исследований.

Глава 1. Проводится обзор и анализ существующих конструкций проточных частей ГЦНА, как зарубежных, так и отечественных производителей. Отмечается, что проточная часть ГЦНА, как правило, отличается от классических проточных частей насосов на подобную быстроходность. Это обусловлено условиями работы насоса: давление в контуре около 18 МПа, температура перекачиваемой среды до 300⁰С, радиоактивность перекачиваемой среды, необходимостью проведения дезактивации внутренних поверхностей кислотными или щелочными растворами. Однако наряду со специфическими требованиями, проточная часть ГЦНА должна обеспечивать высокий КПД насоса, так как затраты электроэнергии на привод ГЦНА весьма значительны. Так, например, для АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 они составляют до 25 МВт (на 4 ГЦНА).

В конструкции проточной части ГЦНА используются рабочие колеса всех типов: осевые, центробежные и диагонального типа. В качестве отвода могут использоваться как комбинированные отводы состоящие из корпуса сферического, цилиндрического, яйцеобразного типа и направляющего аппарата, так и отводы улиточного типа (спиральные).

С технологической точки зрения наиболее предпочтительными являются отводы комбинированного типа. В отечественной практике конструирования ГЦНА нашел применение комбинированный отвод, состоящий из сферического корпуса и цилиндрического направляющего аппарата (НА).

Основной целью данной работы было повышение энергетических показателей проточной части ГЦНА только за счет модернизации его рабочего колеса (РК) при сохранении комбинированного отвода и выдача рекомендаций по проектированию центробежных проточных частей высокой быстроходности ($n_s \sim 300 \dots 350$) с НА.

Для достижения поставленной цели нужно было решить следующие задачи:

- исследовать (экспериментальным и расчетным путем) особенности течения на выходе из РК высокой быстроходности ($n_s=330$), спроектированного на основе метода задания равноростного меридионального потока, с определением влияния формы выходной кромки на энергетические характеристики проточной части ГЦНА;

- исследовать (экспериментальным и расчетным путем) особенности течения на выходе из РК высокой быстроходности ($n_s=330$), спроектированного на основе условия согласования углов выходной кромки РК и входной кромки НА (т.е. РК с цилиндрической формой лопасти в области выходной кромки), с определением влияния формы выходной кромки на энергетические показатели проточной части;

- разработать рекомендации для проектирования рабочих колес ГЦНА высокой быстроходности и выбора формы выходной кромки РК;

- экспериментально подтвердить основные положения разработанных рекомендаций.

Глава 2 посвящена исследованию характеристик течения на выходе из РК высокой быстроходности ($n_s=330$), спроектированного на основе метода задания равноскоростного меридионального потока.

Экспериментальные исследования проводились на натурном стенде ОАО «ЦКБМ» в г. Сосновый Бор. Данный стенд предназначен для проведения приемочных и приемо-сдаточных испытаний ГЦНА на натуральных параметрах: давлении в контуре до 20 МПа и температуре перекачиваемой среды до 300⁰С. Стенд состоит из замкнутой петли с внутренним диаметром трубы 850 мм. Для поддержания заданного давления и температуры перекачиваемой среды имеются дополнительные вспомогательные системы.

Для определения механических потерь энергии в двигателе и в насосе проводились испытания двигателя отдельно от насоса - снималась характеристика холостого хода. Так же проводились испытания двигателя, соединенного с валом насоса без РК - определялось значение механических потерь энергии в подшипниках насоса и в блоке торцовых уплотнений. Значение объемных и дисковых потерь энергии определялась расчетным путем.

Испытания проводились на «холодной» (температура до 120⁰С) и «горячей» (температура 300⁰С) воде с четырьмя различными формами выходной кромки:

1. Исходное РК с выходной кромкой на постоянном диаметре – 1035мм.
2. Вариант с выходной кромкой РК подрезанной до диаметра 985мм по основному диску, по покрывающему диску сохранен диаметр – 1035мм.
3. Вариант с выходной кромкой РК подрезанной до диаметра 938мм по основному диску, по покрывающему диску диаметр – 1025мм. Так же была выполнена затыловка.
4. Вариант с выходной кромкой РК подрезанной до диаметра 938мм по основному диску, по покрывающему диску диаметр – 1000мм, с выполнением «обратной» затыловки.

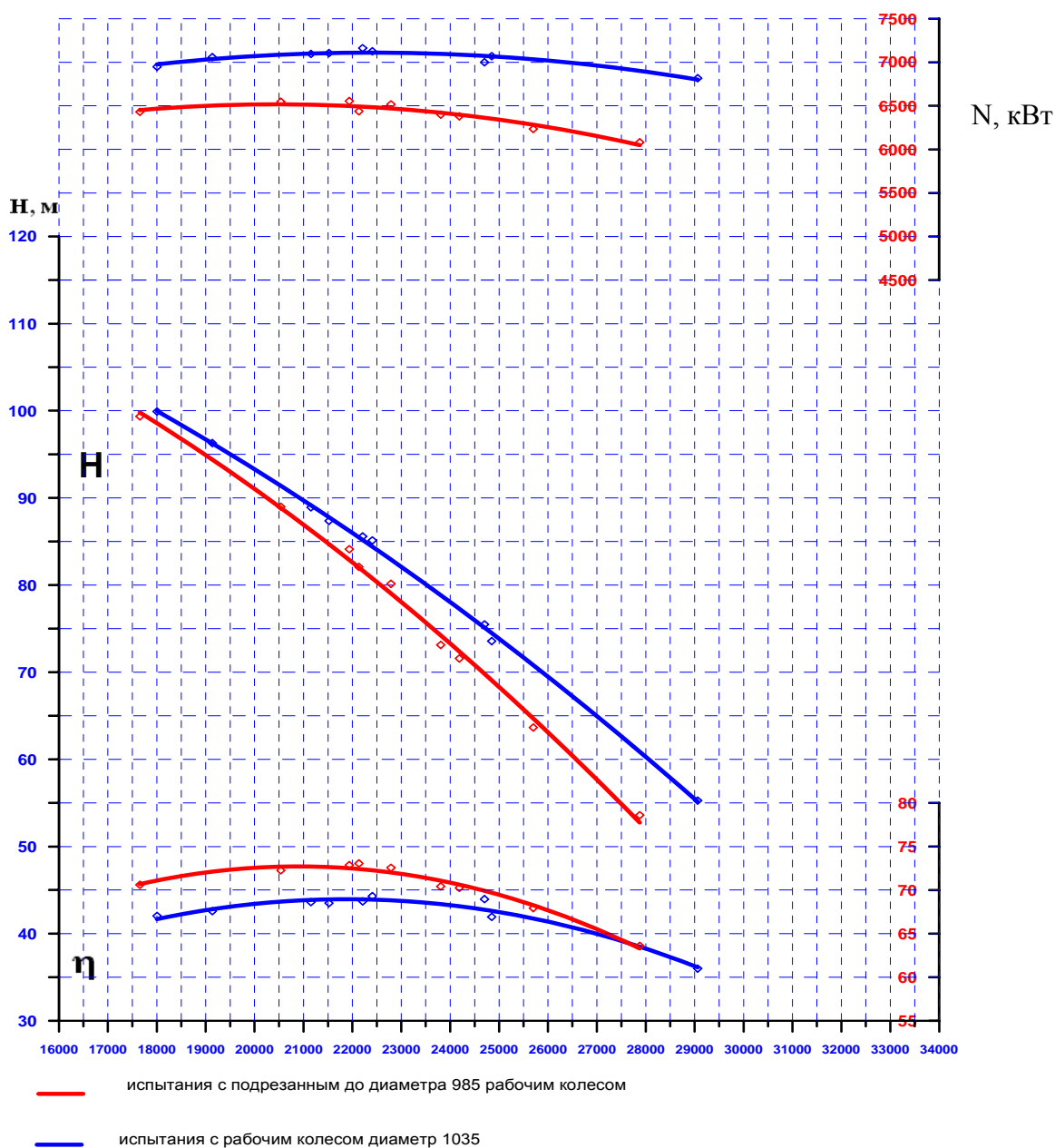


Рис. 1. Характеристика ГЦНА полученная при испытаниях (холодный режим)

Анализ результатов серии экспериментов, проведенных на РК с различной формой выходной кромки, показал, что:

- Выполнение косой подрезки выходной кромки рабочего колеса приводит к увеличению КПД до 4%.
- Для компенсации падения напора при косой подрезке целесообразно использовать затыловку лопасти РК на выходе.

На рис.1 в качестве примера показаны сравнительные характеристики испытаний исходного РК с выходной кромкой на постоянном диаметре – 1035мм и варианта с выходной кромкой подрезанной до диаметра 985мм по основному диску.

Были проведены также расчетные исследования гидродинамики проточной части ГЦНА с данным колесом. Применялся программный пакет, использующий квазитрехмерную модель течения жидкости в проточных частях гидроагрегатов. В качестве примера на рис. 2...4 и таблице 1 приведены результаты расчетов исходного варианта рабочего колеса с диаметром 1035мм.

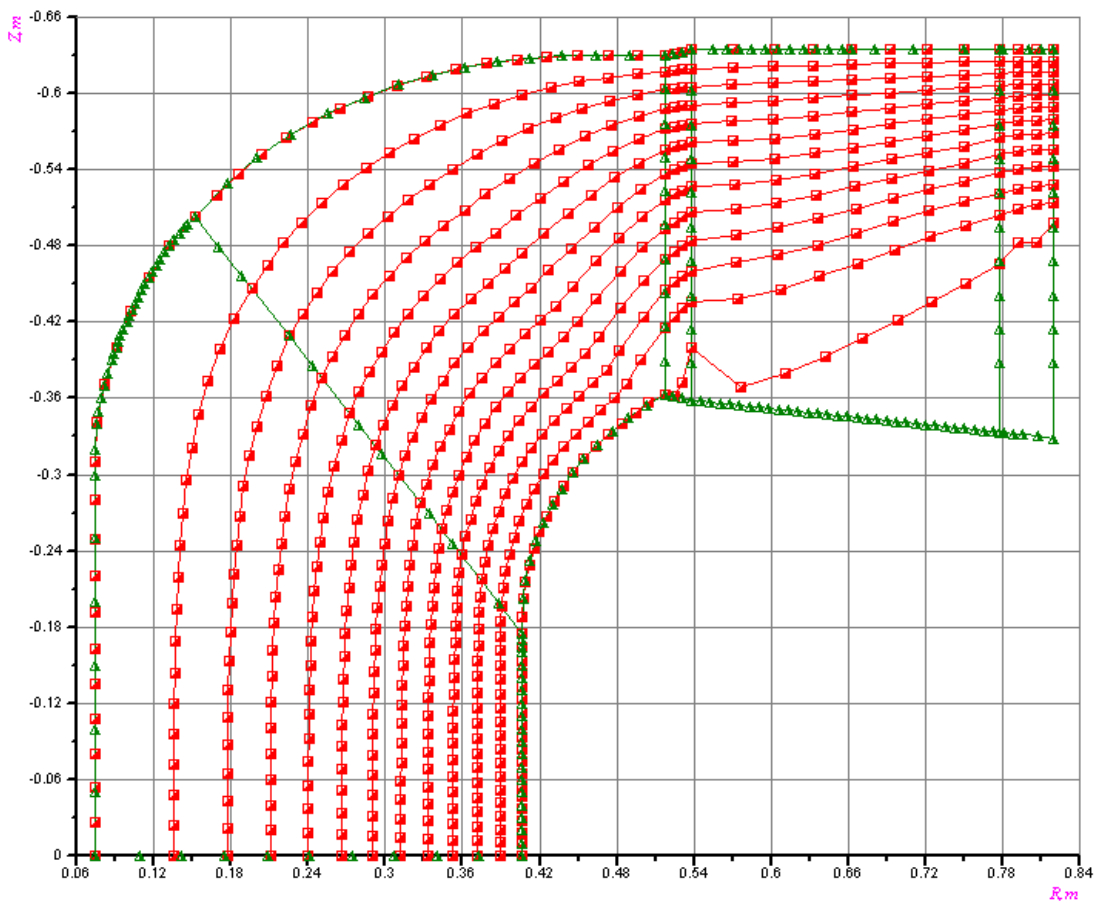


Рис.2. Распределение меридиональных линий тока в проточной части (диаметр РК 1035мм) при подаче $Q=22266\text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q=6.185\text{ м}^3/\text{с}$)

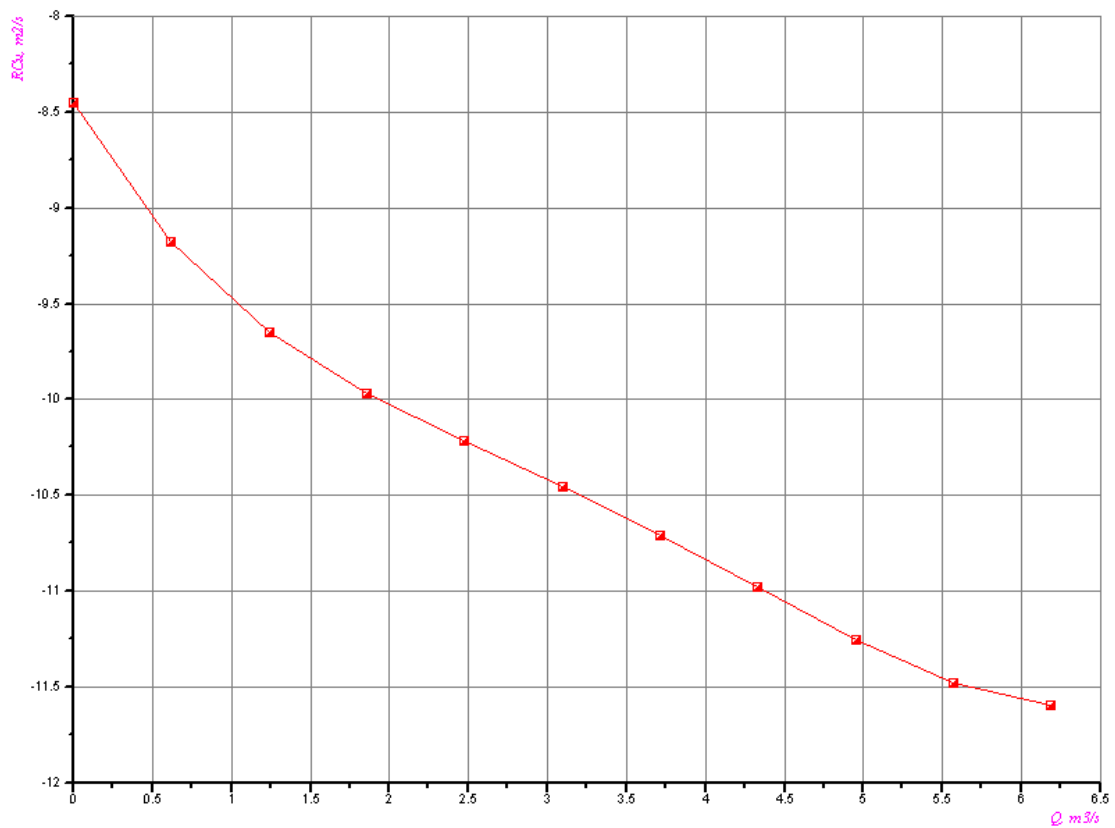


Рис.3. Распределение момента окружной скорости на выходе из РК (диаметр РК 1035мм) при подаче $Q=22266\text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q=6.185\text{ м}^3/\text{с}$)

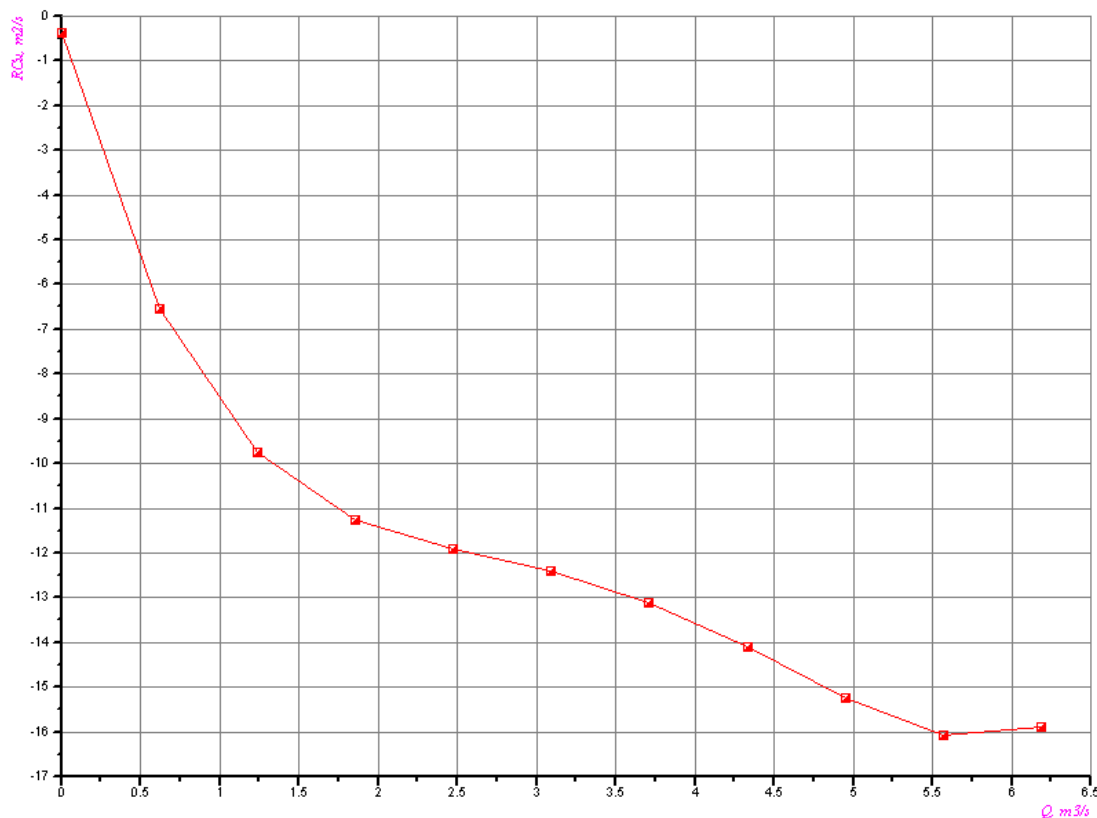


Рис.4. Распределение момента окружной скорости на выходе из НА для (диаметр РК 1035мм) при подаче $Q=22266\text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q=6.185\text{ м}^3/\text{с}$).

Таблица 1. Энергетические характеристики ГЦНА с РК диаметром 1035мм.

Подача, $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	Ударн. и профил. потери энергии в РК, м	Ударн. и профил. потери энергии в НА, м	Циркул. потери энергии, м	Потери в сферич. отводе, м	Объем. потери для холодного режима, м	Теор. Напор (H_m), м	Действ. напор, м	Потребл. мощн. для холодного режима (N), кВт
18000	1,9	2,5	11,5	2,8	4,0	132,8	110,1	6700
22266	2,1	0,64	12,45	4,3	3,3	110,9	87,8	6920
28000	2,8	0,75	11,5	6,8	2,4	82,0	57,6	6440

На рис.5...6 показано сопоставление экспериментальных и расчетных данных по значениям действительных создаваемых насосом напоров и потребляемой насосом мощности в зависимости от подачи. В целом надо отметить, что согласование расчетных и экспериментальных данных по интегральным характеристикам насоса ГЦНА является достаточно хорошим. Отличие расчетных и экспериментальных данных по создаваемому насосом напору в области подач 20000-24000 $\text{ м}^3/\text{ч}$ не превышает 2...3%. Таким образом можно констатировать, что применение квазитрехмерной модели течения для данного типа насоса в области практически интересных расходов является правомерным.

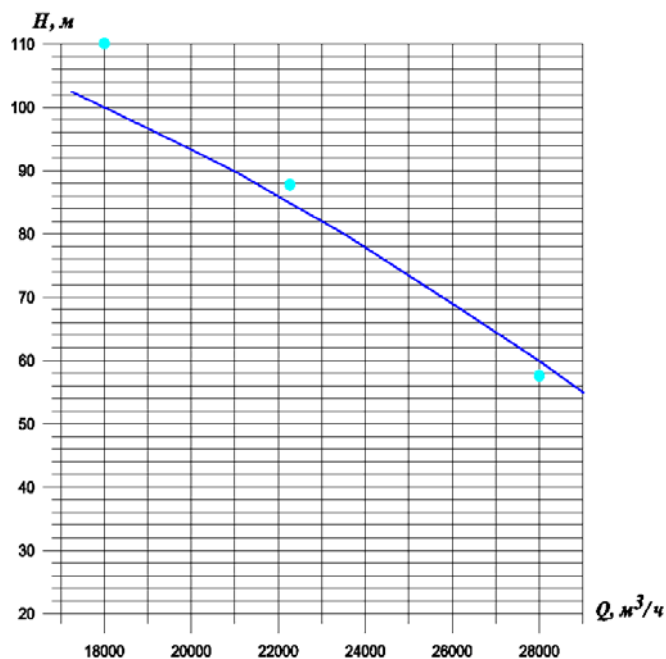


Рис.5. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений действительных напоров создаваемых ГЦНА

(— эксперимент, • - расчет)

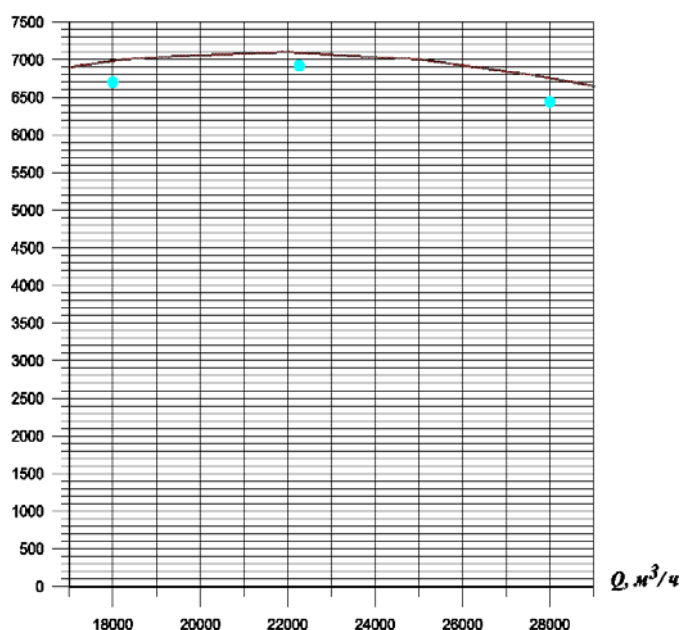


Рис.6. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений потребляемой мощности насосом ГЦНА

(— эксперимент, • - расчет)

Анализируя результаты проведенных расчетов, можно отметить, что размер отрывной зоны потока в НА связан с величиной градиента закрутки потока на выходе из рабочего колеса.

В предположении, что геометрия НА не изменяется по высоте (цилиндрический НА), а линии тока в нем близки к прямым $Z=\text{const}$ в диссертации показано, что распределение меридиональной проекции скорости c_R в сечении $R=\text{const}$ определяется соотношениями:

$$\frac{dc_R}{dZ} = R \omega \tau \frac{dRc_{u, \text{вых РК}}}{d\psi} \frac{1}{1 + \text{ctg}^2 \beta} \quad (1)$$

$$\int_{Z_n}^{Z_6} 2\pi R \tau c_R dZ = Q, \quad d\psi = R c_R \tau dZ \quad (2)$$

Соотношения (1),(2) позволяют определить распределение c_R и вертикальный размер зоны отрыва потока на выходе из направляющего аппарата.

Так предполагая, что на границе зоны отрыва (линии $\psi=0$) $c_R(\psi=0)=0$ для рассматриваемого рабочего колеса с диаметром 1035 мм на подаче 22266 м³/час с помощью (1),(2) было получено ($\text{ctg}\beta \approx 1,7$; $R=0,7775$; $\tau \approx 1$), что течение на выходе направляющего аппарата возможно лишь в сечении с линейным размером по высоте $\Delta Z=0,19$ м. Отметим, что по полному расчету (рис.2) получилось $\Delta Z=0,18$ м.

Таким образом, расчеты показали, что для всех рассмотренных в данной главе вариантов РК в зоне НА имеется зона отрыва потока вблизи периферийного обода. Данная зона имеет тенденцию к уменьшению при подрезке выходной кромки колеса, что обусловлено уменьшением величины градиента закрутки потока на выходе из РК.

Глава 3 посвящена исследованию особенности течения на выходе из РК высокой быстроходности ($n_s \sim 330$), спроектированного исходя из принципов согласования углов выходной кромки РК и входной кромки НА.

Геометрия лопасти данного РК строилась исходя из обеспечения безударного натекания потока на входе в РК и согласования угла выхода лопасти колеса с углом входа лопатки НА. С учетом того, что НА имеет цилиндрическую форму, т.е. угол входа постоянный по ширине лопасти, то и выходная кромка РК выполнена с постоянным углом наклона β_2 , т.е. в новом РК лопасть имеет пространственную форму на входе и цилиндрическую на выходе.

Испытания проводились для двух вариантов исполнения выходной кромки РК. Исходный вариант выходной кромки имел диаметр – 1025мм. После проведения испытаний исходного варианта рабочее колесо было доработано путем подрезки выходной кромки до диаметра 989 мм для обеспечения требуемого напора.

По результатам испытаний данное колесо показало более высокие энергетические характеристики, чем предыдущее колесо.

Проведенные расчеты подтвердили экспериментальные данные и показали, что энергетические характеристики ГЦНА с новым РК лучше. Обусловлено это прежде всего тем, что у нового РК, распределение момента окружной скорости на выходе из рабочего колеса, имеет меньший градиент.

В качестве примера на рис. 8...10 и таблице 2 приведены результаты расчетов варианта рабочего колеса с диаметром 989мм.

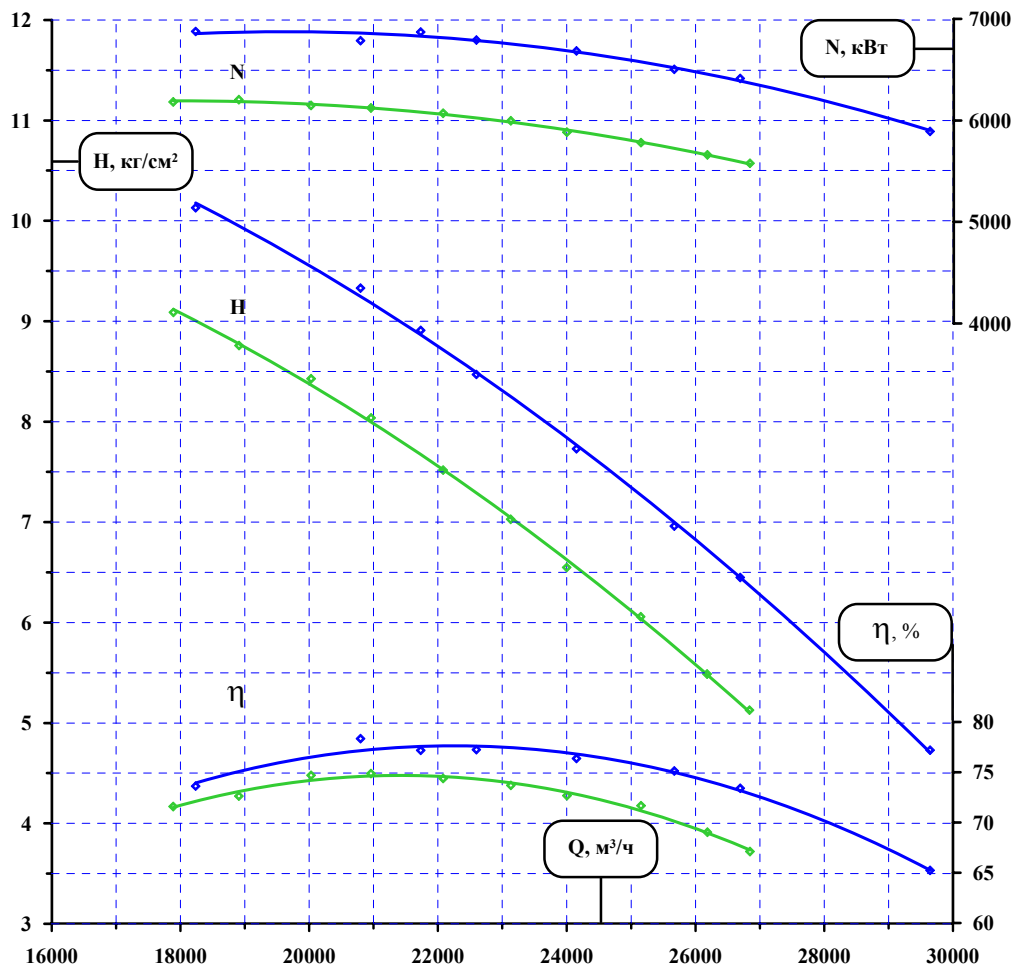


Рис. 7. Характеристика ГЦНА полученная при испытаниях (холодный режим)

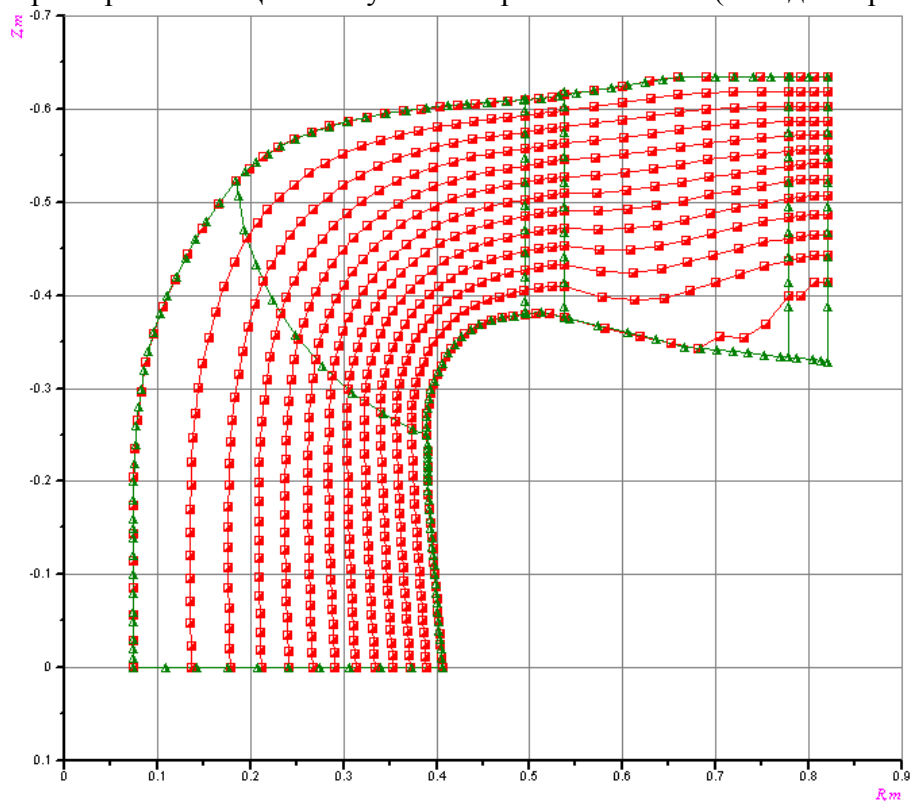


Рис.8. Распределение меридиональных линий тока в проточной части (диаметр РК 989мм) при подаче $Q=22040\text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q=6.1\text{ м}^3/\text{с}$)

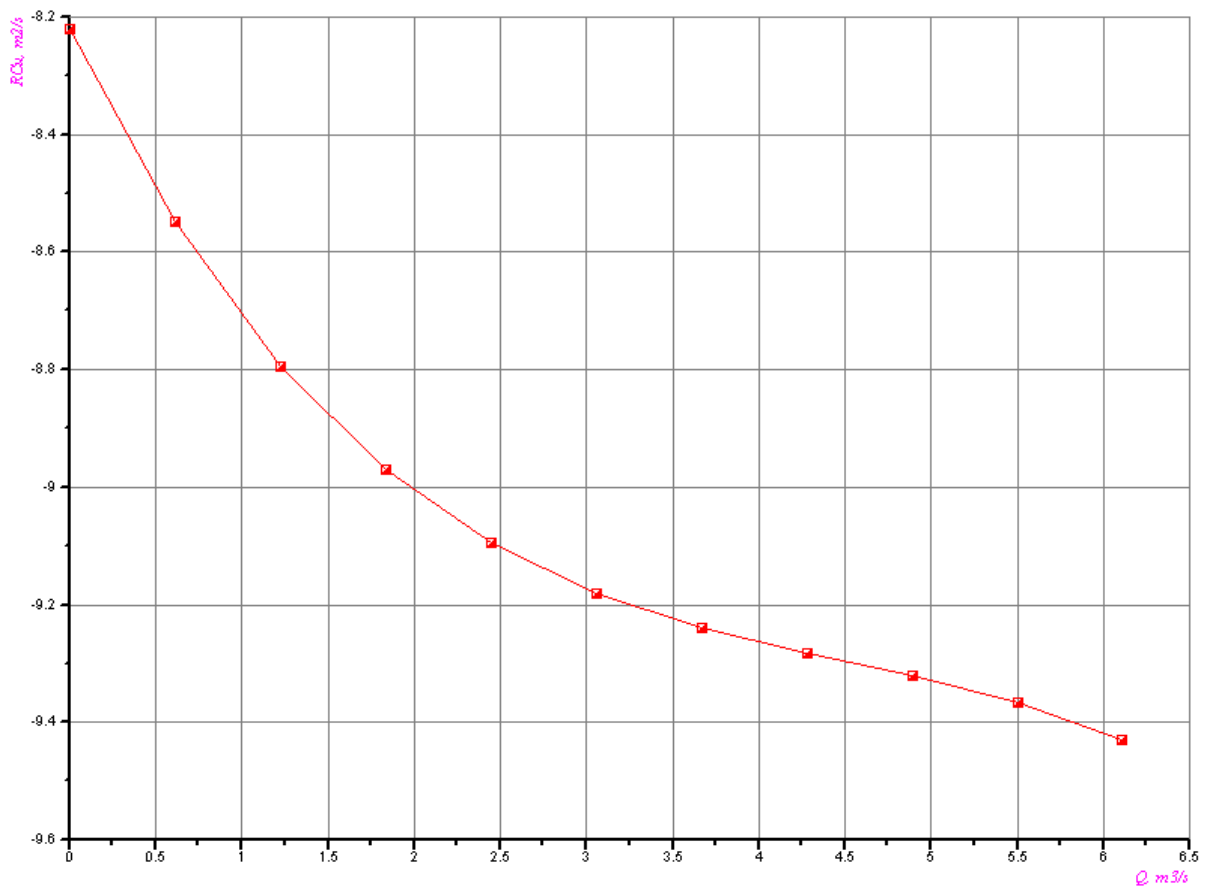


Рис.9. Распределение момента окружной скорости на выходе из РК (диаметр РК 989мм) при подаче $Q=22040\text{м}^3/\text{ч}$ ($Q=6.1\text{м}^3/\text{с}$)

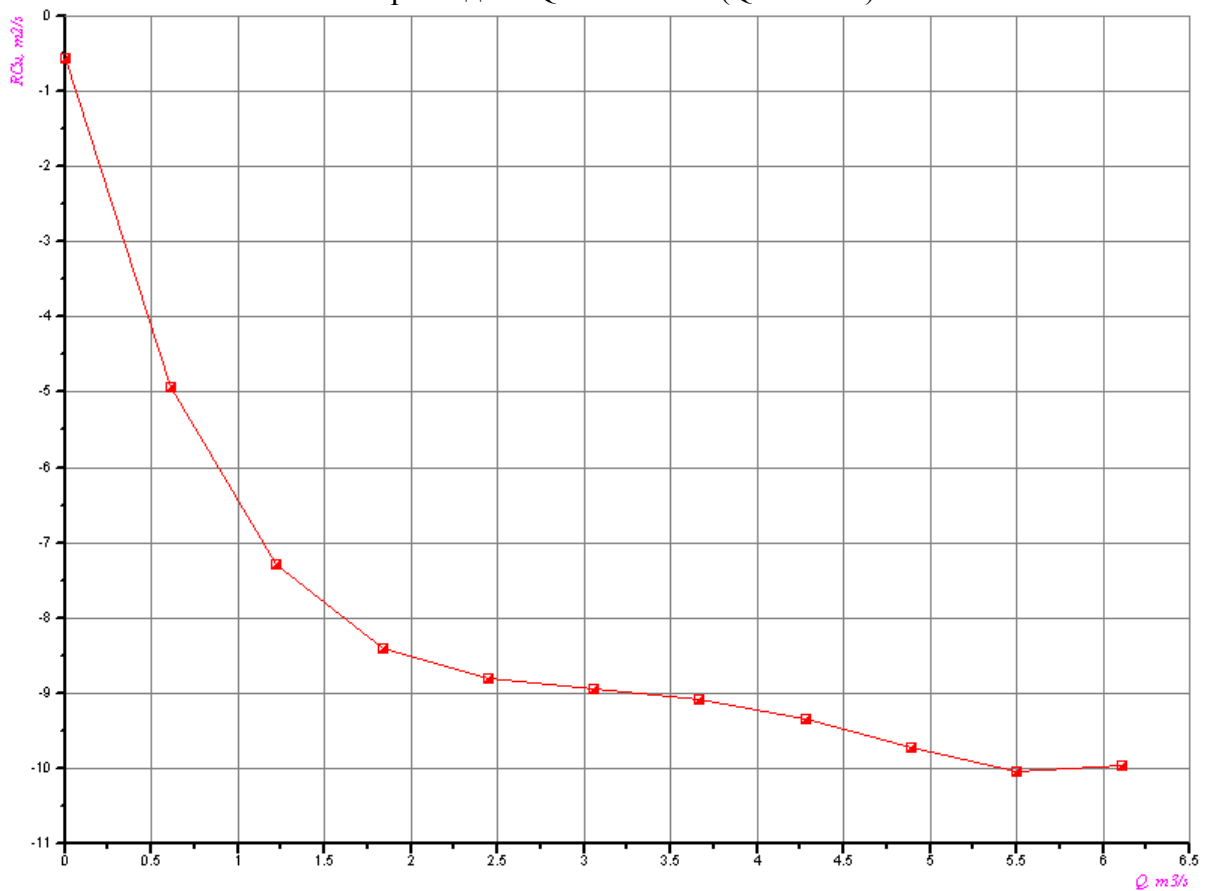


Рис.10. Распределение момента окружной скорости на выходе из НА (диаметр РК 989мм) при подаче $Q=22040\text{м}^3/\text{ч}$ ($Q=6.1\text{м}^3/\text{с}$)

Таблица 2. Энергетические характеристики ГЦНА с РК диаметром 989мм.

Подача, $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	Ударн. и профил. потери энергии в РК, м	Ударн. и профил. потери энергии в НА, м	Циркул. потери энергии, м	Потери в сферич. отводе, м	Объем. потери для холодного режима, м	Теор. Напор (H_m), м	Действ. напор, м	Потребл. мощн. для холодного режима (N), кВт
19950	4,4	0,3	5,2	3,5	3,2	106,4	89,8	6040
22040	3,1	0,4	5,6	4,2	2,9	96,7	80,5	6054
26910	1,9	0,6	7,8	6,2	2,2	73,9	55,2	5670

На рис.10 показано сопоставление экспериментальных и расчетных данных по значениям действительных создаваемых насосом напоров в зависимости от подачи. В целом надо отметить, что согласование расчетных и экспериментальных данных по интегральным характеристикам насоса ГЦНА в данном случае является достаточно хорошим.

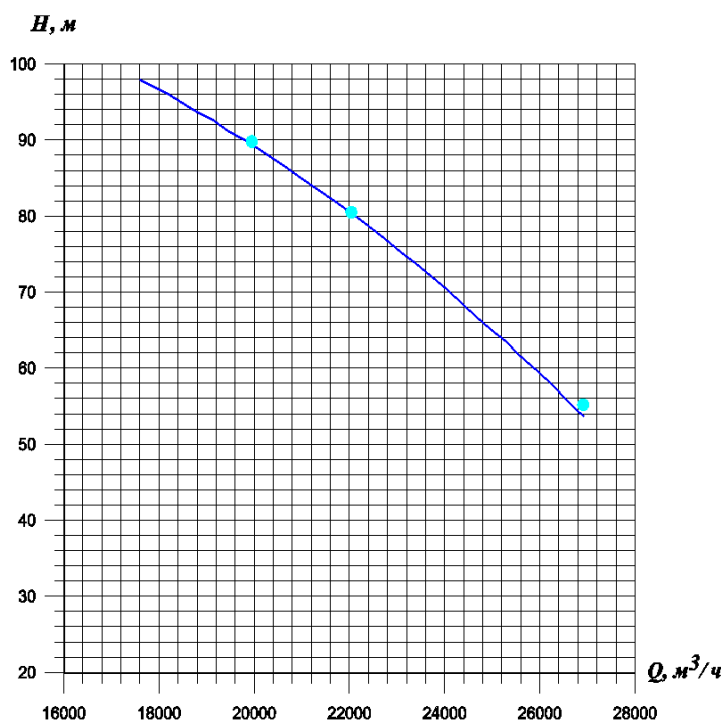


Рис.11. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений действительных напоров создаваемых ГЦНА с РК с диаметром - 989мм
(— эксперимент, • - расчет)

Как показали расчеты, изменение формы выходной кромки РК позволяет добиться более равномерного распределения момента окружной скорости на выходе из колеса. То есть изменение выходной кромки с постоянного диаметра на переменный (с уменьшением диаметра по основному диску) в данном случае позволяет уменьшить зону инерционного отрыва потока в НА. Следовательно, существует еще резерв для улучшения энергетических характеристик ГЦНА с новым РК за счет изменения формы его выходной кромки.

В Главе 4 представлены рекомендации по модернизации колеса с целью повышения КПД проточной части ГЦНА.

На основании проведенного расчетного анализа можно сделать вывод, что закрутка потока на выходе из РК имеет достаточно большой градиент вблизи нижнего обода насоса, что приводит к отрыву потока и, как следствие, к повышению циркуляционных потерь энергии. В соответствии с расчетами, изменение наклона выходной кромки (подрезка) ведет к изменению градиента закрутки. То есть при выходной кромке, расположенной на постоянном диаметре, наблюдается бóльший градиент распределения момента окружной скорости вдоль выходной кромки и, как следствие, бóльшая зона отрыва потока в НА. При подрезке выходной кромки РК с переменным диаметром градиент распределения момента окружной скорости уменьшается и, как следствие, зона отрыва потока в НА так же уменьшается.

Согласно предложенной методике оценки влияния градиента распределения закрутки потока по ширине РК на характеристики течения в НА определялось требуемое уменьшение градиента закрутки потока на выходе РК и на основании этого приблизительно определялась требуемая “косая” подрезка выходной кромки лопасти РК.

Для подтверждения возможности улучшения энергетических характеристик проточной части за счет изменения наклона выходной кромки (подрезки) РК были проведены расчетные исследования и модельные испытания. В таблице 3 приведены данные расчетов для варианта рабочего колеса с косой подрезкой.

Таблица 3. Энергетические характеристики ГЦНА с РК с косой подрезкой выходной кромки ($\varnothing 1025-925\text{мм}$).

Подача, Q , $\text{м}^3/\text{ч}$	Ударн. и профил. потери энергии в РК, м	Ударн. и профил. потери энергии в НА, м	Циркул. потери энергии, м	Потери в сферич. отводе, м	Объем. потери для холодного режима, м	Теор. Напор (H_m), м	Действ. напор, м	Потребл. мощн. для холодного режима (N), кВт
19950	4,4	0,3	3,8	3,5	3,1	104,6	89,5	5940
22040	3,1	0,4	4,5	4,2	2,9	95,4	80,3	5970
26910	2,0	0,5	6,6	6,2	2,2	73,0	55,5	5600

Согласно полученным результатам расчетов проточной части в насосе с колесом с “косой” подрезкой отрывная зона потока существенно уменьшилась по сравнению с вариантом колеса с выходной кромкой на постоянном диаметре. При фактически сохраненной $H-Q$ характеристике потребляемая насосом мощность при этом уменьшилась на 70...100 кВт в зависимости от подачи (см. таблицу 2 и таблицу 3). Это означает, что общий КПД насоса для варианта с “косой” подрезкой РК увеличился на 1,3...1,5%.

Таким образом, расчетные исследования показали возможность повышения КПД проточной части путем незначительной доработки имеющегося РК. Для подтверждения данных выводов были проведены модельные испытания двух вариантов РК – с выходной кромкой на постоянном диаметре и с выходной кромкой, подрезанной по покрывающему диску. Модельные испытания проводились на замкнутом энергокавитационном стенде ОУ-350 Санкт-Петербургского Политехнического Университета. Результаты испытаний подтвердили расчетные исследования в части прироста к.п.д. на 1...1,5 %.

Заключение.

1. Проведен анализ существующих, как зарубежных, так и отечественных конструкций проточных частей Главных Циркуляционных насосных агрегатов для АЭС с блоками типа ВВЭР. Показано, что проточная часть ГЦНА отличается от проточной части обычного насоса аналогичной быстроходности. Показано, что для ГЦНА, используемых на АЭС с реакторами типа ВВЭР, актуальной является задача повышения КПД агрегата за счет модификации только лопастной системы рабочего колеса.
2. Проведены экспериментальные исследования двух вариантов проточной части ГЦНА на полномасштабном стенде. Один вариант РК был спроектирован в соответствии с методом построения геометрии лопасти в равноскоростном потоке. Второй вариант РК был спроектирован из условия обеспечения безударного натекания потока на входную кромку лопасти и сопряжения выходной кромки колеса с входной кромкой НА. В связи с тем, что НА имел цилиндрическую форму, выходная кромка, второго варианта РК, так же имела цилиндрическую форму. Проведенные исследования показали, что:
 - увеличение диаметра рабочего колеса приводит к увеличению напора, однако его КПД заметно снижается при увеличении диаметра;
 - путем выполнения затыловки РК можно добиться увеличения напора с лучшими энергетическими показателями проточной части;
 - при использовании комбинированного отвода, состоящего из сферического корпуса и НА цилиндрической формы, колесо с цилиндрической формой лопасти на выходе (при быстроходности $n_s=330$) показывает лучшие энергетические показатели, нежели колесо с пространственной формой лопасти, спроектированное на основе метода задания равноскоростного меридионального потока;
 - с помощью косой подрезки выходной кромки рабочего колеса можно добиться существенного повышения КПД ГЦНА.
3. Предложена упрощенная методика, позволяющая оценивать возможность меридионального отрыва потока в цилиндрическом направляющем аппарате ГЦНА при известном распределении закрутки потока на выходе из рабочего колеса.
4. Проведен расчетный анализ характеристик потока в проточной части ГЦНА с цилиндрическим направляющим аппаратом. Выполнен расчет энергетических показателей ГЦНА с быстроходностью $n_s=330$: определены отдельные виды потерь энергии – механические, объемные и гидравлические (профильные, ударные, циркуляционные и потери в сферическом отводе). Показано, что:
 - применение квазитрехмерной модели для расчета гидродинамики проточной части ГЦНА с различными типами РК является оправданным и дает хорошее согласование с экспериментальными данными;
 - численное исследование гидродинамики проточной части ГЦНА с различными вариантами РК показало, что в НА могут образовываться области отрыва потока. Наличие указанных зон отрыва потока приводит к снижению гидравлического КПД проточной части насоса, так как НА в этом случае не полностью выполняет свои функции преобразования кинетической энергии потока в потенциальную, и, как следствие, возникают повышенные циркуляционные потери энергии;
 - главной причиной повышения КПД проточной части при использовании колеса с цилиндрической формой лопасти на выходе, является лучшее согласование потоков на выходе из рабочего колеса и на входе в НА (значительное снижение градиента закрутки потока на выходе из РК);
 - при использовании колеса с пространственной формой лопасти на выходе, целесообразно проектировать НА с пространственной формой лопатки.

- изменением формы выходной кромки РК (подрезка и затыловка) можно добиться уменьшения или ликвидации зоны отрыва потока в НА и, как следствие, увеличения гидравлического КПД проточной части.

5. На основании проведенного расчетного анализа был сделан вывод о необходимости снижения градиента закрутки потока на входе в НА для достижения высоких энергетических показателей ГЦНА с высокой быстроходностью ($n_s = 330$). На основе этого вывода было сделано предложение по модернизации выходной кромки РК с цилиндрической формой лопасти на выходе. Были проведены расчетные исследования предложенного варианта модернизации РК, которые показали, что при фактически сохраненной Н-Q характеристике потребляемая насосом мощность уменьшается на 70-100 кВт в зависимости от подачи, то есть КПД насоса для данного варианта рабочего колеса увеличивается на 1,3...5%. Проведенные экспериментальные исследования на стенде Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета подтвердили результаты расчетов и показали увеличение КПД на 1% в рабочей точке.

Публикации по теме диссертации.

1. Грянко Л.П., Казанцев Р.П., Климович В.И., Щуцкий С.Ю. Проработка опорных вариантов проточной части Главного Циркуляционного Насоса атомного энергоблока ВВЭР-1000// Сборник трудов международной конференции «Гидравлические машины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика», СПбГПУ, 2005г. с.95-105.
2. Казанцев Р.П. Конструкции проточных частей Главных Циркуляционных Насосов (ГЦН) для энергетических блоков АЭС// Сборник трудов IV Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», СПбГПУ, 2006г, с.108-115.
3. Казанцев Р.П., Топаж Г.И. Расчетные исследования энергетических показателей главного циркуляционного насоса ГЦНА-1391 для АЭС// Сборник трудов IV Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», СПбГПУ, 2006г., с.38-41.
4. Казанцев Р.П., Климович В.И. Опыт применения квазитрехмерной модели течения для исследования параметров потока в проточной части главного циркуляционного насоса// Сборник трудов 6-ой Международной научно-технической конференции «Гидравлические машины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», СПбГПУ, 2010г., с.89.
5. Казанцев Р.П., Климович В.И. Анализ вариантов проточной части на примере главного циркуляционного насоса атомного энергоблока ВВЭР-1000// Научно технические ведомости СПбГПУ, 2010г., с. 148-155. (журнал включен в список ВАК)
6. Климович В.И., Казанцев Р.П. Расчетные исследования параметров потока в проточной части главного циркуляционного насоса ГЦНА-1391 для АЭС с блоками ВВЭР-1000// Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, том 252, С-Пб, 2008г.с.127-134. (журнал включен в список ВАК)
7. Климович В.И., Казанцев Р.П. Расчет энергетических характеристик главного циркуляционного насоса для энергоблоков ВВЭР-1000// Научно технические ведомости СПбГПУ, 2010г., с. 138-143. (журнал включен в список ВАК)