

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН
(ОИВТ РАН)

УДК 621.43.03.3

№ государственной регистрации 01.2.00.951601

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

ОИВТ РАН, д.т.н.

_____ В.А.Зейгарник

« _____ » _____ 2009 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме: **РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО ВЫСОКОДИСПЕРСНОМУ ВПРЫСКУ ВОДЫ В ТРАКТЫ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Шифр: «2008-6-1.6-19-01-006»

Государственный контракт с Федеральным агентством по науке
и инновациям от 29 августа 2008 г. № 02.516.11.6155

**Этап 3: Испытание систем впрыска перегретой воды в
компрессор полномасштабной ГТУ. Разработка
технического задания на ОКР по впрыску перегретой воды
в ПГУ мощностью 60 МВт**

(итоговый)

Заместитель директора

ОИВТ РАН, чл.- корр. РАН

_____ В.М. Батенин

Руководитель темы

Заведующий отделом

ОИВТ РАН, д.т.н.

_____ Ю.А. Зейгарник

Москва 2009

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. отделом, д.т.н.	_____	Ю.А.Зейгарник	Руководитель (Введение, разд. 2, 3, 4 Заключение)
Ст.н.с. к.ф-м.н.	_____	В.Л.Низовский	Отв. Исполнитель (разд. 1,2, Заключение) Исполнители
Вед.н.с., к.т.н.	_____	В.И.Залкинд	(разд. 1)
Ст.н.с. к.ф-м.н.	_____	К.А.Ходаков	(разд. 1)
Ст.н.с. к.т.н.	_____	Ю.Л.Шехтер	(разд. 1)
Зав. лаб., к.т.н.	_____	В.Б.Алексеев	(разд. 1)
Зав. лаб., к.т.н.	_____	П.П.Иванов	(разд. 1)
Инженер	_____	Н.Г.Семерак	(разд. 1)
Вед. Инженер	_____	Н.Н.Силина	(разд. 1)
Вед. Инженер	_____	Л.В.Низовский	(разд. 1)
Аспирант	_____	Д.В.Мариничев	(разд. 1)
Аспирант	_____	А.М.Лапин	(разд. 1)
Стаж.-исслед.	_____	А.Н.Вавилов	(разд. 1)
Сл. мех.-сб. раб.	_____	Ю.Х.Мустафанов	(разд. 1)
Сл. мех.-сб. раб.	_____	Д.Г.Корнеев	(разд. 1)
Студент	_____	А.М.Агальцов	(разд. 1)
Студент	_____	А.В.Жатухин	(разд. 1)
Соисполнители:			
ФГУП ММП «Салют»			
Вед. инженер	_____	С.О.Беляева	(разд. 1, 3)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 42 стр., 12 рис., 1 таблицу, 3 приложения, 5 частей (с заключением), 13 использованных источников.

КОМПРЕССОРЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК, «ВЛАЖНОЕ» СЖАТИЕ, ВЫСОКОДИСПЕРСНЫЙ РАСПЫЛ, ПЕРЕГРЕТАЯ ВОДА, ФОРСУНКИ, ФАКЕЛ РАСПЫЛА.

Объектом исследований и разработок являются энергетические газотурбинные установки (ГТУ), работающие по перспективным газопаровым циклам.

Цель работы – разработка методов высокодисперсного распыла воды для ее впрыска в компрессоры энергетических ГТУ для осуществления эффективного «влажного» сжатия в ГТУ, работающих по перспективным газопаровым циклам с целью повышения их удельной мощности и КПД.

В соответствии с основной целью и календарным планом НИОКР по Контракту № 02.516.11.6155 выполнены следующие работы:

В рамках работ по I этапу:

- Уточнена базовая концепция высокодисперсного распыла воды при впрыске в компрессор, использующая тонкую фрагментацию жидкости при взрывном вскипании перегретой воды на выходе из форсунок.
- Изготовлены узлы и модернизирована экспериментальная установка по исследованию параметров двухфазной воздушно-капельной среды после распыла, изготовлены лабораторные образцы форсунок.
- Проведены экспериментальные исследования при распыле перегретой воды через центробежную форсунку, выявившие ряд особенностей процесса, в частности бимодальный характер дисперсионного размера капель по размерам.

На II этапе работ:

- Завершены исследования на опытной установке, осуществлено сравнение факелов распыла центробежных и струйных форсунок, определено влияние

ориентации форсунок на форму факела распыла и степень его шнуrowания, проведены расчетно-теоретические исследования дробления, коагуляции и испарения капель.

- Разработаны конструкторские решения по системам впрыска перегретой воды, изготовлен демонстрационный образец форсунки, смонтирована система впрыска в полномасштабный компрессор газовой турбины ТВ-3-117 производства завода им. В.Я. Климова (г. Санкт-Петербург).

На III (заключительном) этапе работ:

- Проведены испытания системы впрыска перегретой воды в компрессор полномасштабной ПГУ (ГТД ТВ-4-117). Испытания проводились при параметрах перегретой воды (240 °С, 8 МПа), определенных на основе предшествующих измерений на экспериментальном стенде. Выбор струйных форсунок и их расположение по нормали к потоку также следовали из результатов экспериментов. При нагрузке ГТД 800 кВт, температуре наружного воздуха 4,9 °С и влажности 60 % полезная мощность ГТД увеличилась на 5,9 % при неизменной температуре за камерой сгорания, что соответствует росту полезной мощности на 11 % (при параметрах ISO).

- На базе полученных опытных данных, выполненных расчетов и испытаний системы впрыска перегретой воды на промышленной турбине ТВ-4-117 разработан технологический регламент на производство конструкторских работ и эксплуатацию предложенного научно-технического решения.

- Разработано техническое задание на ОКР по впрыску перегретой воды в компрессор промышленной ГТУ мощностью 60 МВт. Оно учитывает базовые положения Регламента и предусматривает установку системы впрыска как во входном устройстве, так и в 3–5 ступенях компрессора.

- Выполнена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов и прогнозный план коммерциализации разработанных научно-технических решений.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ВПРЫСКА ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В ТРАКТ ПОЛНОМАСШТАБНОЙ ПГУ	13
1.1 Газотурбинная установка	13
1.2 Система впрыска воды во входную камеру компрессора ГТД	18
1.3 Схема измерений	20
1.4 Испытание системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТД ТВ3-117.....	22
1.4.1 Программа испытаний.....	22
1.4.2 Порядок проведения испытаний.....	22
1.4.3 Результаты испытаний системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТД ТВ-4-117.....	23
2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА ПРОЦЕССА	27
2.1 Результаты НИР, положенные в основу Регламента	28
2.2 Технологическая схема системы впрыска	30
2.3 Исходные данные и рекомендации для проектирования системы впрыска перегретой воды	31
2.4 Эксплуатационные вопросы	32
2.5 Литература к разделу 2	33
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В И ПРОГНОЗНЫЙ ПЛАН КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	34
3.1 Технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов	34
3.1.1 Оценка суммарной мощности ГТУ, в которых может быть использован впрыск воды в компрессор	34
3.1.2 Технико-экономические показатели разработанной технологии впрыска перегретой воды	35
3.1.3 Оценка коммерческой эффективности разработанных научно-технических решений	35
3.2 Прогнозный план коммерциализации разработанных научно-технических решений	36
4 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА ОКР ПО ВПРЫСКУ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В КОМПРЕССОР ПРОМЫШЛЕННОЙ ПГУ МОЩНОСТЬЮ 60 МВт	37
4.1 Основание для разработки ТЗ на ОКР	37
4.2 Цель ОКР	37
4.3 Состав установки по впрыску перегретой воды	37
4.4 Основные технические характеристики	37

4.5	Состав разрабатываемой научно-технической продукции	38
4.6	Требования к патентной чистоте и патентоспособности	38
4.7	Технико-экономические показатели	38
5	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	42
	ПРИЛОЖЕНИЯ	
1	Протокол испытаний системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТУ ТВ-3-117	
2	Технический регламент на проектирование и эксплуатацию систем впрыска в промышленной ПГУ	
3	Техническое задание на ОКР по впрыску перегретой воды в компрессор промышленной ПГУ мощностью 60 МВт	

ВВЕДЕНИЕ

Осуществление «влажного» сжатия путем впрыска воды в компрессоры энергетических газотурбинных установок (ГТУ) является одним из наиболее эффективных способов существенного увеличения их мощности (до 10-12 %) и заметного увеличения КПД до 2-3 % абсолютных [1]. При совместном же осуществлении влажного сжатия и влажной регенерации по схеме, разработанной в ОИВТ РАН, КПД ГТУ с максимально форсированными параметрами увеличивается с 35 до 50 % и выше, а $N_{уд}$ возрастает более чем в 1,5 раза [2].

Метод «влажного» сжатия проверен и эксплуатируется на более чем 40 мощных ГТУ (по данным Siemens-Westinghouse, май 2006 г.), испытания компрессоров ГТУ с впрыском воды проведены в «Машпроекте» (на ГТ-17000) и в ММПП «Салют» [3, 4]. Указанные работы подтвердили перспективность «влажного» сжатия в компрессорах ГТУ, однако, одновременно показали, что при его осуществлении имеются существенные ограничения по повышению внутреннего КПД компрессоров и ГТУ в целом, особенно для высокооборотных компактных конверсионных машин. Расчетно-теоретический анализ газо-гидродинамических и теплофизических процессов при «влажном» сжатии и опыты на реальных энергетических машинах [3,4,5] показали, что основной причиной этого являются особенности поведения жидкой фазы, в частности, ее сепарация на поверхности лопаток направляющих (НА) и рабочих (РА) аппаратов компрессора (и далее на его корпусе) и связанные с этим потери энергии, впервые отмеченные в [6].

Как показали расчеты [5, 6, 7] и эксперименты [3, 4], в высокооборотных машинах такая сепарация весьма интенсивна в силу чрезвычайно больших центробежных сил, действующих на пленки воды на поверхностях лопаток. Неполное испарение воды в тракте компрессора, дополнительные потери энергии на ускорение капель при их многократном осаждении и срыве с поверхностей направляющего (НА) и рабочего (РА) аппаратов, а также на трение жидких пленок о поверхности лопаток и корпуса снижают внутренний КПД компрессора. Это может свести к нулю положительный эффект от ввода в него воды и уменьшения теоретической работы сжатия.

Главным и наиболее кардинальным путем предотвращения выпадения капель на поверхности лопаток является достижение такого высокодисперсного распыла воды, при котором капли имеют настолько малую инерционность, что практически следуют за потоком воздуха и обтекают лопатки. Для этого, как показали расчетные оценки, их диаметр не должен превышать 3–4 мкм. Современные механические пневматические или другие форсунки обеспечивают получение среднего заутеровского размера капель воды 15 мкм и более [8]. Поэтому поиск технологий, дающих необходимый высокодисперсный распыл, их совершенствование и адаптация для эффективного впрыска в компрессоры ГТУ являются актуальной и новой проблемой. В настоящее время перспективной представляется технология распыла воды, перегретой относительно температуры насыщения. Эта технология, предложенная фирмой «Кема» [8], основана на резком вскипании жидкости при быстром сбросе давления при прохождении каналов форсунок и «взрывном» делении фрагментов воды на мелкие капли размером не более 2,0–3,0 мкм. Хотя технология «Кема» была опробована на газовой турбине малой мощности, многие ключевые вопросы, касающиеся её применения в различных условиях впрыска в компрессор, остаются открытыми. Не определена зависимость дисперсионных характеристик получаемых факелов и формы последних от параметров перегретой воды, от типа, характеристик и ориентации форсунок. Вместе с тем, от знания указанных вопросов зависит эффективность применения впрыска перегретой воды в ГТУ и успех внедрения «влажного» сжатия в энергетические ГТУ.

Целью данной работы являлась разработка и оптимизация технических решений по высокодисперсному распылу воды при её впрыске в компрессор энергетических газотурбинных установок для осуществления эффективного «влажного» сжатия в ГТУ, работающих по перспективным газопаровым циклам, для повышения их КПД и удельной мощности.

Основными задачами и этапами работы являлись:

- экспериментальные исследования влияния параметров впрыскиваемой воды (температуры и давления воды перед форсункой) и воздушно-капельной среды (температуры и влагосодержания воздушного потока, типов и ориентации форсунок) на дисперсионные характеристики факела распыла для обоснования научно-технических решений по высокодисперсному распылу воды;

- расчетно-теоретические исследования дробления, коагуляции и испарения капель размером 0,8–10 мкм в турбулентном потоке для получения дополнительных

данных, которые нельзя определить экспериментально;

- разработка инженерно-конструкторских решений по вводу тонко диспергированной воды в компрессор;
- испытания систем впрыска перегретой воды в компрессор полномасштабной ГТУ мощностью 1,2 МВт;
- разработка технического задания на ОКР по впрыску перегретой воды в компрессор промышленной ПГУ мощностью 60 МВт.

Проведению запланированных НИР предшествовал ряд предварительных работ в их обеспечение. Отработан усовершенствованный метод ММУ определения дисперсных характеристик среды по индикатрисе рассеяния монохроматического излучения в широком диапазоне углов видения. В дополнение к оптической диагностике капельной среды был реализован комплекс теплофизических измерений двухфазного воздушно-капельного потока; осуществлена наладка основного оборудования установки, обеспечена высокая степень автоматизации эксперимента и компьютеризации обработки результатов измерений, разработана и оттестирована программа расчетов «влажного» сжатия, пригодная для анализа опытных данных, полученных на экспериментальной установке.

Основные задачи и содержание I-го этапа проведенной работы состояли в следующем:

- уточнение базовой концепции высокодисперсного распыла воды при впрыске в компрессор (расчетные исследования, анализ литературных источников);
- модернизация экспериментальной установки по исследованию параметров двухфазной воздушно-капельной среды после распыла, изготовление и монтаж узлов установки;
- проведение I-го этапа экспериментальных исследований на установке (изучение влияния начальной температуры воды и влажности несущего потока) при распыле через центробежную форсунку.

На этом этапе настоящей работы в соответствии с календарным планом и указанными основными задачами были выполнены следующие НИР:

- Расчетно-теоретические исследования, которые уточнили концепцию высокодисперсного впрыска и показали, что прирост внутреннего КПД компрессора (при ожидаемой дисперсности капель ($d_{(32)} \approx 3 \dots 4$ мкм) может быть в несколько раз выше, чем при инъекции крупных капель. При этом оказалось возможным

увеличить впрыск воды до 3 % весовых по отношению к расходу воздуха, против 1,5...2,0 %, типичных для обычных технологий впрыска.

- Проведена модернизация контура и системы измерений экспериментальной установки «Распыл» для обеспечения возможности одновременного измерения теплофизических и дисперсионных характеристик воздушно-капельного потока, а также видеорегистрации факелов распыла при различных вариантах впрыска перегретой воды, изменении ее параметров (температура вводимой воды — от 20 до 250 °С, давление перед форсунками — до 10,0 МПа, расходы воды в диапазоне от 0,5 до 10 г/с) и начальной температуры воздушного потока — до 90 °С).

- Изготовлены лабораторные образцы центробежных форсунок, отличающиеся малыми габаритами, что необходимо для максимально возможного снижения расхода воды через единичную форсунку (до уровня 5...7 г/с), и исследованы их характеристики.

- Проведен I этап экспериментальных исследований распыла перегретой воды на установке «Распыл» ОИВТ РАН, показавший, что высокодисперсный распыл воды в условиях опытов достигается, начиная со 170 °С и становится достаточно эффективным при 220...240 °С, когда до 70 % (по массе) капель имеют диаметр менее 2 мкм, При этом впервые был обнаружен особый — бимодальный — характер дисперсионного распределения капель при высокодисперсном распыле воды (рис. В1), что важно для корректного анализа процессов «влажного» сжатия и конструирования систем впрыска.

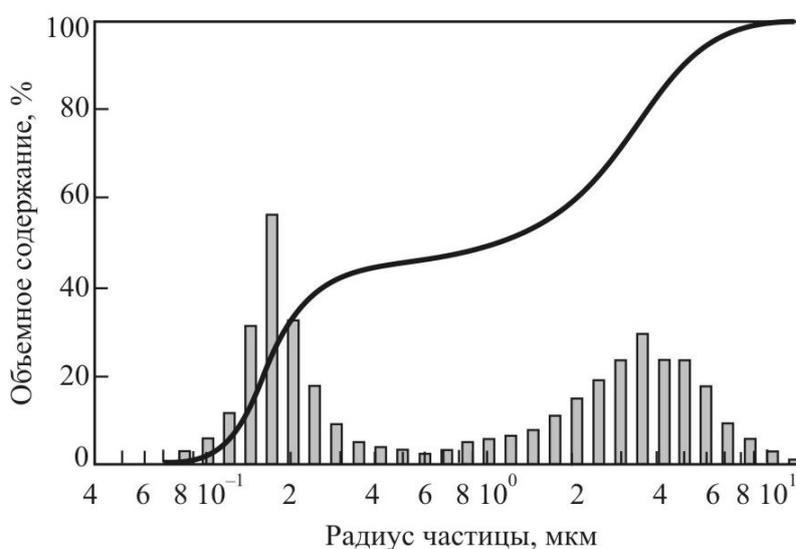


Рис. В1. Бимодальное распределение

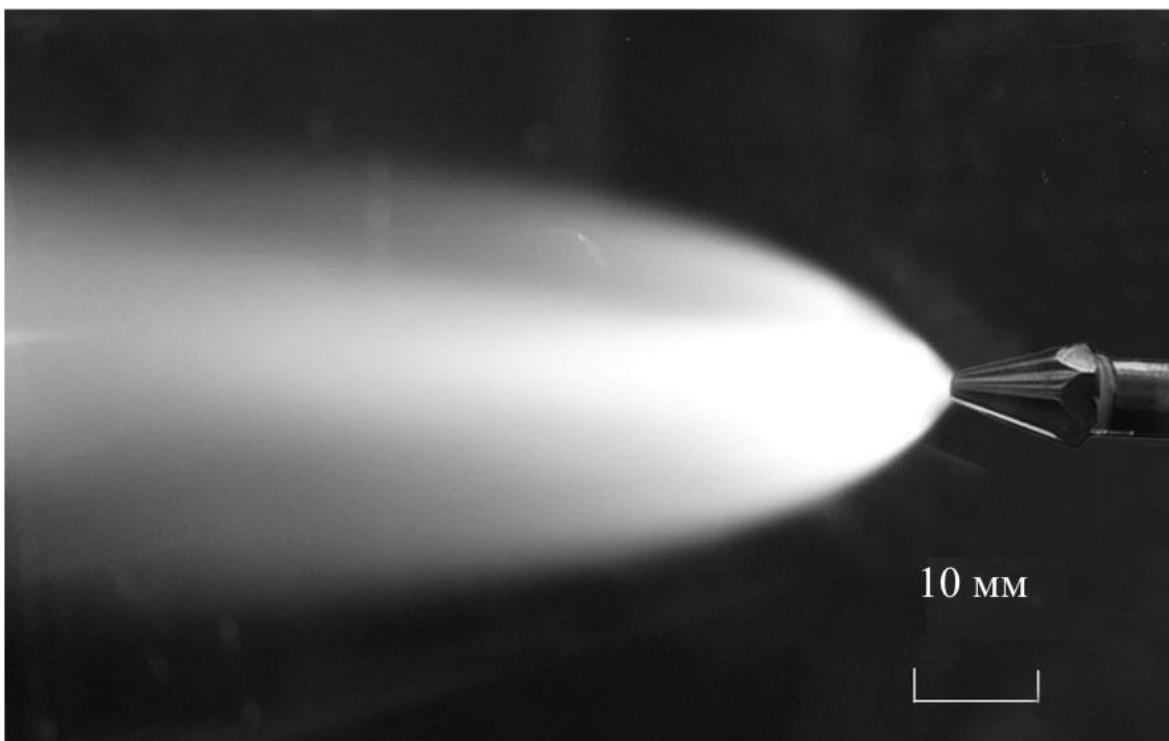


Рис. В2. Шнурованный факел

Следует особо отметить, что под действием потока воздуха получаемые мелкие — микронные и субмикронные — капли образуют пространственно локализованный факел, т.е. в отличие от впрыска «холодной» (не перегретой) воды наблюдается существенное «шнурование» факела распыла (рис. В2), что в дальнейшем было учтено при конструировании системы впрыска, определении размеров форсунок их производительности и ориентации.

Основными задачами II этапа работ были: продолжение исследований характеристик распыла перегретой воды на стенде «Распыл» и разработка конструкторских решений по системам впрыска полномасштабной ГТУ.

Основные работы, выполненные по II этапу согласно календарному плану, следующие.

1. Проведен II этап экспериментальных исследований на установке «Распыл» с целью оптимизации типа распыливающих форсунок, основных параметров их работы, расположения и ориентации их в воздушном потоке. В проведенных опытах на двух типах распыливающих форсунок — центробежных и струйных — определены дисперсионные характеристики факелов высокодисперсного распыла перегретой воды в двух характерных сечениях воздушного потока (на расстоянии 6 и 12 см от среза форсунок) при разной

ориентации струйных форсунок по отношению к потоку воздуха. Были осуществлены термопарные измерения в факеле распыла соосных с потоком форсунок на различном расстоянии от среза их сопл. В результате проведенных опытов выбран вариант впрыска перегретой воды, позволяющий не только иметь распыл воды с необходимым размером капель не более 3–4 мкм, в количестве до 75 % по массе, но и одновременно осуществить максимально равномерное распределение капель по объему сжимаемого воздуха. Последнее является весьма важным дополнительным условием достижения эффективного впрыска перегретой воды при «шнуровании» факела распыла.

2. Разработана программа расчетно-теоретических исследований и проведены расчетные оценки процессов определяющих поведение капель в факеле распыла, в первую очередь, интенсивности их испарения, а также коагуляции и дробления. Выполненные расчеты подтвердили экспериментальные данные о существенном уменьшении размеров субмикронных капель в результате их интенсивного испарения во входном канале компрессора, снижении таким образом входной температуры воздушно-паровой среды. Капли микронных размеров сравнительно мало уменьшаются в диаметре.

3. Разработаны конструкторские решения по системе впрыска перегретой воды, оптимизированной с учетом результатов проведенных экспериментальных работ и расчетно-теоретических исследований факелов распыла различных типов форсунок, изготовлены и опробованы образцы таких форсунок для модельного блока и полномасштабной системы впрыска перегретой воды в компрессор ТВ-3-117 (ГТЭ-1500) Демоцентра ОИВТ РАН (серийное изделие ФГУП «Завод им. В.Я.Климова», г. Санкт-Петербург).

С целью опробования работы модельного блока выбранных форсунок и полномасштабной системы впрыска перегретой воды в компрессор ТВ-3-117 в дополнение к календарному плану работ выполнены следующие работы:

➤ разработана, спроектирована, изготовлена и прошла успешные испытания система подготовки перегретой воды для ее впрыска в компрессор ТВ-3-117 Демоцентра ОИВТ РАН, укомплектованная необходимым оборудованием и агрегатами, а также системой КиП и А;

➤ разработан, изготовлен и смонтирован стенд для внеконтурных испытаний в потоке воздуха полномасштабных систем распыла перегретой воды, питающихся от указанной системы подготовки;

➤ на стенде наружных испытаний систем распыла проведены исследования впрыска перегретой воды с различной степенью перегрева через модуль из 8 струйных или центробежных форсунок при их различной взаимной ориентации, а также полномасштабной системы впрыска в компрессор ТВ-3-117 с демонстрационными образцами струйных форсунок (32 форсунки).

Эти испытания проводились с видеосъемкой формы факелов распыла индивидуальных форсунок и образующегося общего двухфазного потока. Дополнительно анализировалось рассеяние факелом излучения диагностических плоских лазерных пучков, проводились термодинамические измерения. Эти испытания были необходимы для подтверждения высокодисперсного распыла перегретой воды в натуральных системах впрыска компрессора ТВ-3-117, оптимизации пространственной конфигурации блока форсунок в системах впрыска, изучения степени равномерности заполнения факелами распыла воздушного потока перед компрессором, а также визуальных оценок отсутствия интенсивной сепарации жидкой фазы на натуральных образцах лопаток компрессора ТВ-3-117.

Проведенные наружные испытания систем распыла перегретой воды дали необходимые ответы на ключевые вопросы и позволили осуществить оптимизацию выбранной системы распыла.

Проведен монтаж системы распыла перегретой воды в компрессор ТВ-3-117 Демоцентра ОИВТ РАН.

На III (заключительном) этапе работы проведены испытания систем впрыска перегретой воды в компрессор полномасштабной ГТУ. Испытания проводились на газотурбинной установке ТВ-3-117 (ГТЭ-1500) Демоцентра ОИВТ РАН, специально оснащенной дополнительными системами КИПиА и обработки опытных данных, необходимыми для проведения запланированных экспериментов.

Результаты экспериментов на компрессоре ТВ-3-117, проведенных при впрыске перегретой воды, показали заметное улучшение показателей ГТУ в целом и находятся в удовлетворительном соответствии с расчетными оценками.

Разработаны технический регламент процесса впрыска перегретой воды и техническое задание на ОКР по впрыску перегретой воды в компрессор промышленной ПГУ мощностью 60 МВт.

Проведены технико-экономические оценки рыночного потенциала полученных результатов.

1. ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ВПРЫСКА ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В ТРАКТ ПОЛНОМАСШТАБНОЙ ГТУ

1.1. Газотурбинная установка

Испытание систем впрыска перегретой воды было осуществлено на газовой турбине ГТД ТВ3-117 мощностью 1,25 МВт производства ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» (Санкт-Петербург).

На рис. 1.1 представлен поперечный разрез газовой турбины. Она состоит из 13-ступенчатого осевого компрессора с регулируемым входным направляющим аппаратом, трубчато-кольцевой камеры сгорания, двухступенчатой турбины высокого давления – привода компрессора и двухступенчатой силовой турбины, приводящей через редуктор во вращение генератор ГС-1500-4. Турбина выполнена по схеме с разрезным валом. Забор наружного воздуха осуществляется через комплексное воздухоочистительное устройство, после которого воздух поступает во входную камеру компрессора, в которой устанавливается система впрыска воды. Номинальные характеристики при параметрах ISO: электрическая мощность — 1,25 МВт, расход воздуха на всасе компрессора — 7,71 кг/с, степень сжатия в компрессоре — 7,65, температура продуктов сгорания на входе в турбину — 700 °С.

Общий вид турбогенератора ГТД ТВ3-117 показан на фото (рис. 1.2).

Испытание проводилось на стенде Демоцентра ОИВТ РАН. Общий вид стенда показан на фото (рис. 1.3).

На рис. 1.4 приведена схема стенда.

Основные элементы технологической схемы следующие:
комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ);
газотурбинный двигатель ГТД ТВ3-117;
редуктор;
электрический генератор ГС-1500-4;
теплообменник-утилизатор для подогрева сетевой воды;
дожимной компрессор природного газа ГВ 3,5/4-18 УХЗЛ;
система контроля и управления.

Генератор выдает мощность через трансформатор ТМ-1Ю 6,3/10 кВт на шины КРУ ТЭЦ-21 Мосэнерго.



Рис. 1.2. Общий вид турбины ГТД ТВ3-117



Рис. 1.3. Общий вид экспериментального ГТД стенда Демоцентра ОИВТ РАН

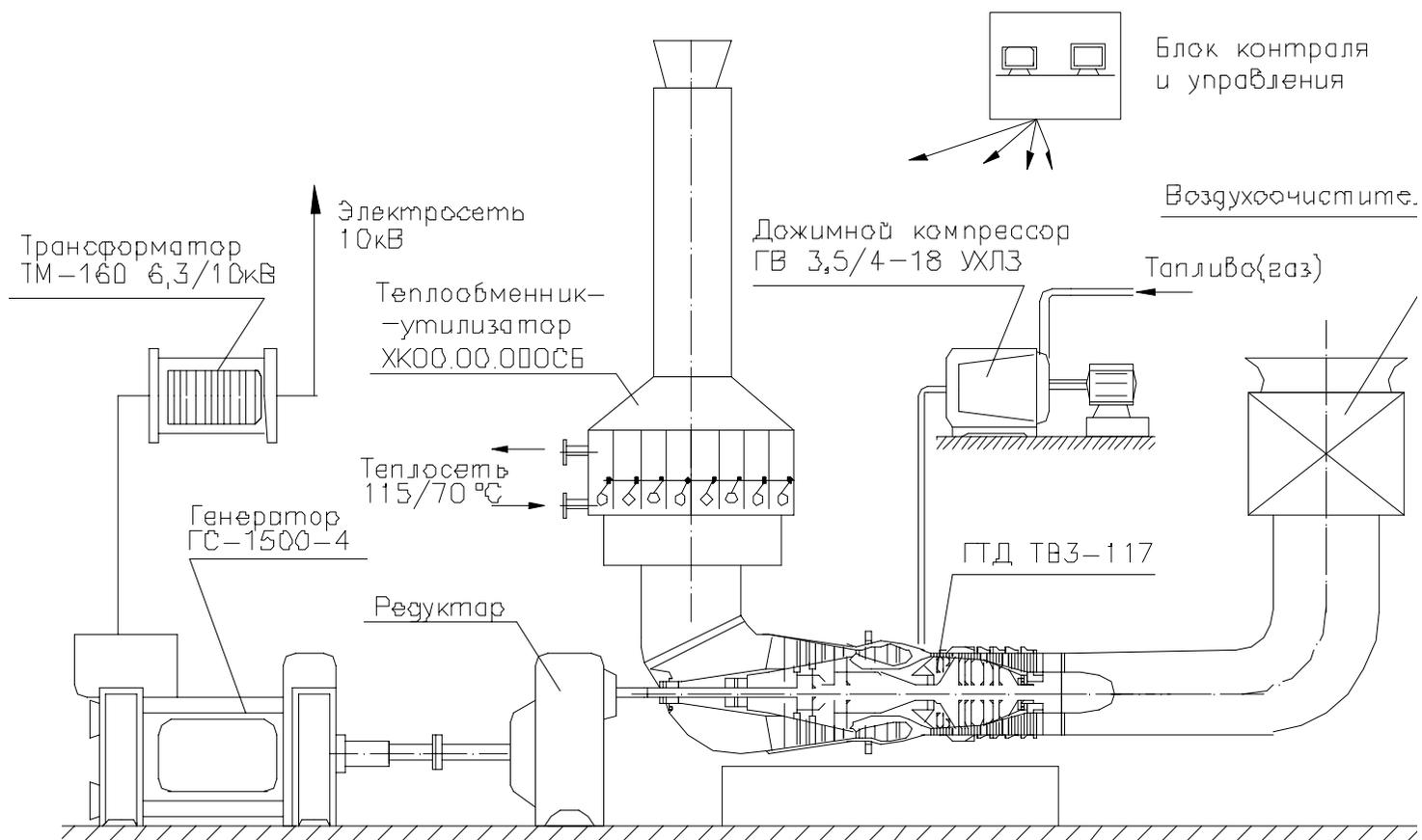


Рис. 1.4. Схема экспериментального ГТД стенда Демоцентра ОИВТ РАН

1.2. Система впрыска воды во входную камеру компрессора ГТД

На фото рис. 1.5 показана система впрыска перегретой воды во входную камеру компрессора ГТД в сборе. Система состояла из 32 струйных (прямоточных) форсунок, установленных перпендикулярно потоку воздуха на 8 радиальных коллекторах. Раздача воды по коллекторам осуществлялась от центра к периферии. Максимальный расход воды на впрыск 200 г/с.

Схема размещения системы впрыска во входной камере компрессора ГТД показана на рис. 1.6.



Рис. 1.5. Компоновка струйных форсунок системы впрыска перегретой воды во входную камеру ГТД

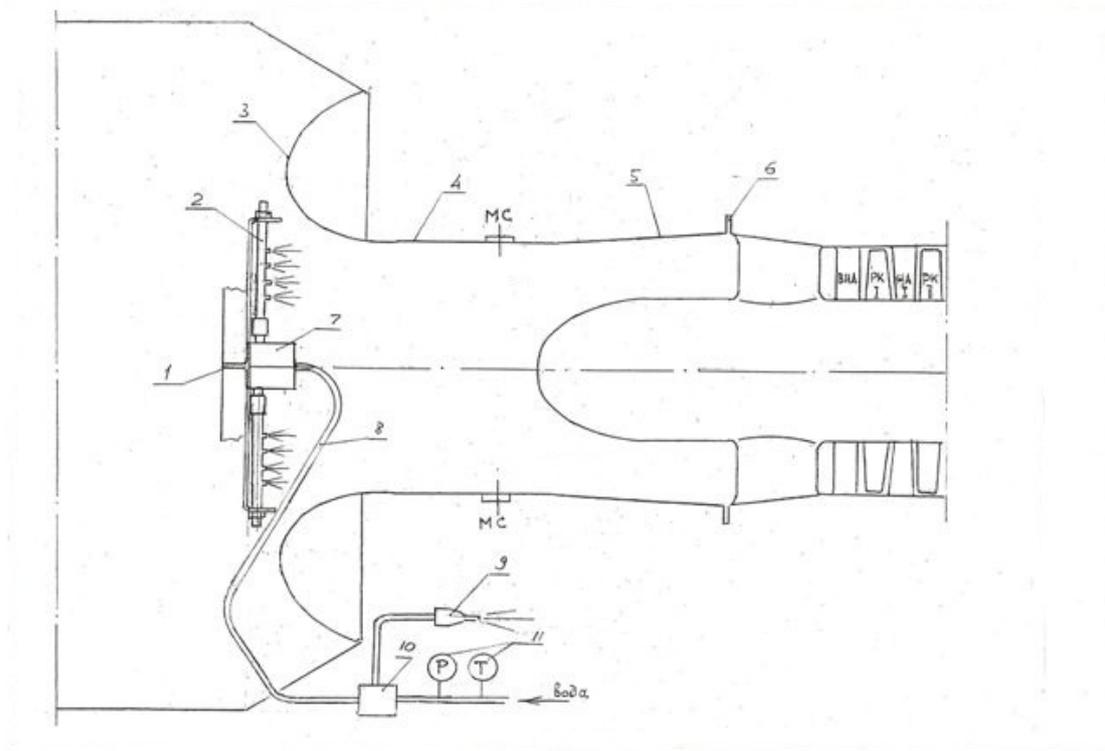


Рис. 1.6. Размещение системы впрыска перегретой воды во входной камере ГТД

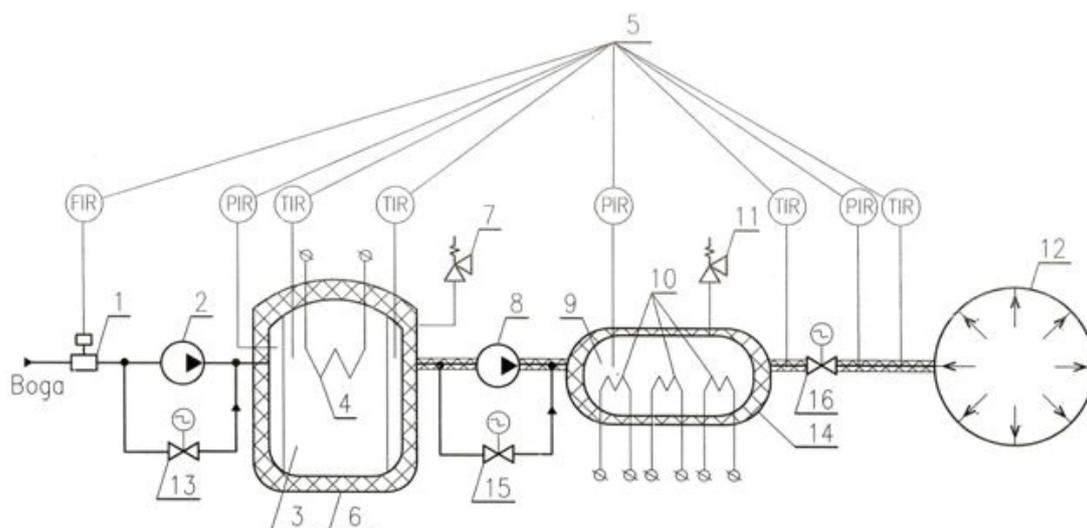


Рис. 1.7. Система подогрева воды на впрыск

На рис. 1.7 представлена схема системы подогрева воды, подаваемой на впрыск. Она включает в себя резервную емкость 4, насос 8, теплообменник 9 для подогрева воды, снабженный электрическими нагревателями (ТЭН) 10, фильтр тонкой очистки 12. При испытаниях использовалась химически обессоленная вода. Параметры воды, подаваемой на впрыск: давление — 3,5–4,0 МПа, температура — 220–230 °С.

1.3. Схема измерений

Схема измерений приведена на рис. 1.8.

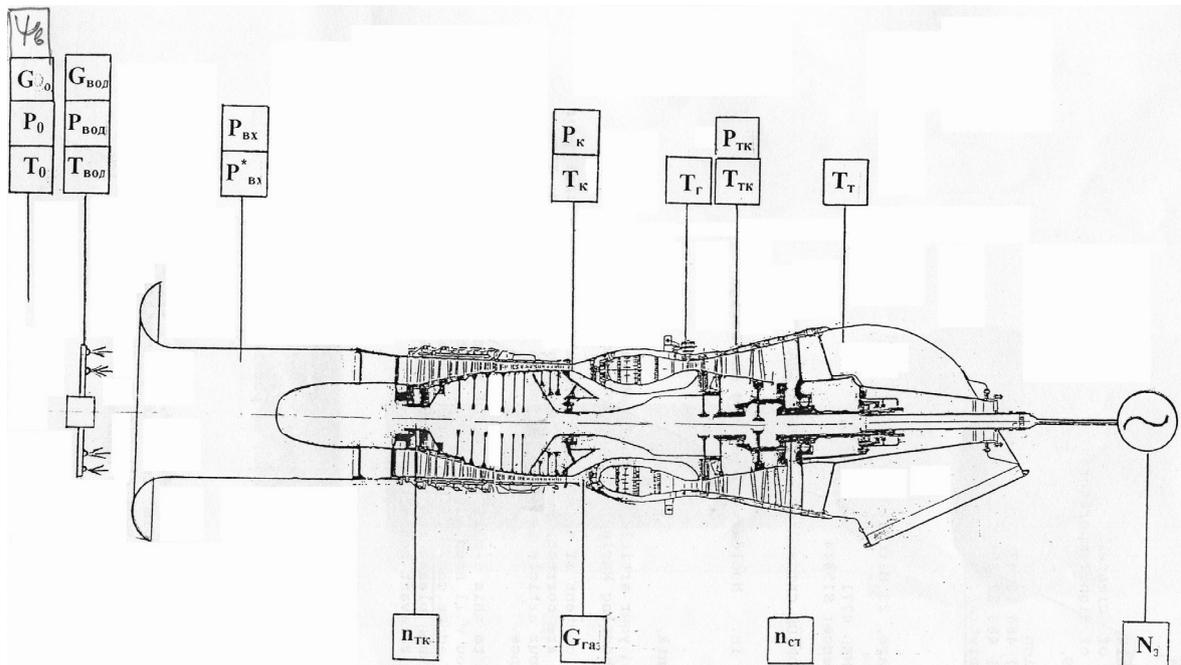


Рис. 1.8. Схема измерений

Измерялись следующие параметры:

- температура воздуха, поступающего в двигатель T_0 ;
- атмосферное давление P_0 ;
- относительная влажность атмосферного воздуха ψ ;
- статическое давление в мерном сечении входного канала $P_{вх}$;
- полное давление в мерном сечении входного канала $P^*_{вх}$;
- давление за компрессором $P^*_к$;
- температура за компрессором $T^*_к$;
- температура перед турбиной (за камерой сгорания) $T^*_г$;
- давление за турбиной компрессора $P^*_{тк}$;

- температура за турбиной компрессора $T_{\text{тк}}^*$;
- температура за силовой турбиной $T_{\text{т}}^*$;
- частота вращения турбокомпрессора $n_{\text{тк}}$;
- частота вращения силовой турбины $n_{\text{ст}}$;
- расход топливного газа $G_{\text{газ}}$;
- активная электрическая мощность N_3 ;
- параметры впрыскиваемой воды: температура $T_{\text{вод}}$, давление $P_{\text{вод}}$, расход $G_{\text{вод}}$.

В качестве первичных преобразователей при измерении давлений используются датчики АИР-20, при измерении температур датчики ТСМУ, ТСПУ, ТХАУ с унифицированным выходным сигналом.

Относительная влажность атмосферного воздуха, поступающего в установку, определяется психометром РОСА-3.

Частота вращения ротора турбокомпрессора измеряется с помощью датчика ДЧВ-2500.

Частота вращения силовой турбины определяется с использованием датчика ДТА-10.

Расход топливного газа определяется с использованием расходомера-счетчика вихревого «Ирга-РВ».

Электрическая мощность определяется по показаниям многофункционального прибора UPM 350.

Обработка сигналов от первичных преобразователей системы измерений производится с использованием информационно-управляющего программно-технического комплекса (ПТК) ГТУ «Демоцентра». В аппаратный состав ПТК входят: многофункциональный контроллер (МФК); два персональных компьютера, образующие инженерный и операторский пульта; система кабельных информационных и управляющих линий; комплект измерительных преобразователей и исполнительные механизмы. ПТК позволяет по отображениям на мониторах пультов управления проводить оперативный контроль за состоянием объекта и параметрами его работы, дистанционно управлять исполнительными механизмами, проводить архивирование измеряемых параметров, расчетные действия с целью получения характеристик основных элементов газотурбинного привода и установки в целом с последующим выводом их, при необходимости, в виде таблиц или трендов.

1.4. Испытание системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТД ТВЗ-117

1.4.1. Программа испытаний

1. Цель: определение влияния впрыска перегретой воды на газодинамические параметры, экономичность, мощностные и экологические показатели ГТУ.
2. Режим работы ГТУ, $n_{\text{тк пр}} = 92\text{--}93\%$.
3. Расход впрыскиваемой воды — 1,1 % расхода воздуха через двигатель.
4. Параметры воды: давление 35–40 кг/см², температура 220–230 °С.
5. Последовательность проведения испытаний:
 - номинальный «сухой» режим (без впрыска);
 - впрыск холодной воды;
 - номинальный «сухой» режим;
 - подготовка перегретой воды в режиме работы на имитатор;
 - впрыск перегретой воды;
 - восстановление режима по частоте вращения турбокомпрессора;
 - восстановление режима по температуре газов перед турбиной.

1.4.2. Порядок проведения испытаний

1. Подготовительные работы перед проведением испытаний включают следующие операции:
 - подготовка системы топливоснабжения ГТУ;
 - подготовка системы теплосъема теплообменника-утилизатора;
 - подготовка и проверка систем управления, контроля и измерения параметров;
 - подготовка электросистемы;
 - подготовка системы впрыска воды.
2. Запуск ГТУ и настройка режимов испытаний.
 - Управление ГТУ производится в полуавтоматическом режиме: автоматически от нажатия кнопки «ПУСК» до выхода на «малый газ» и, далее, — ручное управление процессами возбуждения генератора, выхода в сеть, настройки режимов испытаний.
 - Настройка режимов испытаний и замер параметров.

Требуемый режим испытаний устанавливается изменением возбуждения генератора и, соответственно, величины активной электрической мощности, отдаваемой во внешнюю сеть. Режим испытаний определяется приведенной частотой вращения турбокомпрессора. Частичные (дрессельные) режимы задаются в долях от номинального, равного $n_{\text{тк пр}} = 93,8 \%$ по указателю на пульте управления ГТУ.

- На выбранном режиме испытаний установка выдерживается 5–10 минут для установления стационарного режима.

Измерение, обработка и архивирование параметров ведется ПТК в непрерывном режиме.

- Подготовка системы впрыска включает предварительный подогрев воды в безрасходном режиме до температуры, исключающей кипение при давлении, создаваемом циркуляционным насосом системы теплосъема теплообменника-утилизатора (100–110 °С). По достижении указанной температуры открывается кран подачи воды на имитатор и дальнейший нагрев воды до требуемой степени перегрева идет в режиме распыла через сопло имитатора. Далее магистраль имитатора перекрывается и открывается подача перегретой воды в коллектор устройства распыла.

1.4.3. Результаты испытаний системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТД ТВ-4-117

Результаты испытаний представлены в таблице 1.1. Приведены параметры работы ГТД без впрыска и с впрыском перегретой воды в компрессор.

В соответствии с методикой проведения опытов первый режим (I) – «сухой» режим, т.е. без подачи перегретой воды на коллектор впрыска. Второй режим (II) – установившийся режим подачи перегретой воды при начальных параметрах «сухого» режима, естественно, с измененными параметрами работы контура, в частности, с пониженной в результате впрыска воды температурной в камере сгорания (КС) перед турбиной компрессора. III режим устанавливается при температуре в КС такой же, как и в I режиме (без впрыска воды), путем увеличения расхода природного газа, который, в свою очередь, регулируется внутренней системой автоматики ГТД ТВ-3-117 в соответствии с заложенной заводской программой по изменению мощности на валу свободной турбины.

Таблица 1.1

№ режима	τ	$\Delta P_{вх}$	$\Delta P_{вх}^*$	$P_{к1}$	$P_{к2}$	$P_{к3}$	$P_{тк}$	T_t	T_0	$T_{г}$	$T_{тк}$	$T_{к}$	$F_{г}$	$N_{э}$	$P_{газ}$	$n_{тк}$	$G_{вод}$	$T_{вод}$
		кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	°С	°С	°С	°С	°С	Нм ³	кВт	кПа	%	г/с	°С
I	11 ²¹	-4,16	-1,39	613	612	600	106	384	5,9	794	503	274	421	858	759	92,3		
	11 ²²	Подача воды на впрыск																
	11 ²³	-4,21	-1,35	621	623	611	108	386	5,9	794	511	275	435	885	776	92,1	67	240
	11 ²⁴	-4,20	-1,33	618	618	607	106	387	5,9	794	511	275	434	879	771	92,1	67	240
	11 ²⁶	-4,24	-1,48	618	619	609	106	379	4,9	783	470	270	429	871	772	92,1	67	240
II	11 ²⁸	-4,18	-1,37	616	618	605	106	380	4,9	783	470	270	423	866	772	92,1	67	240
		Восстановление T _г																
	11 ³¹	-4,22	-1,45	625	626	615	108	386	4,9	794	479	273	442	901	788	92,6	67	240
III	11 ³²	-4,31	-1,48	629	629	618	108	388	4,9	794	487	274	447	909	794	92,6	67	240

Атмосферные условия $t_0 = 5$ °С, $P_0 = 98$ кПа, $\psi = 60$ %. T_0 – температура воздуха, поступающего в двигатель; $T_{тк}^*$ – температура за турбиной компрессора; P_0 – атмосферное давление; $T_{т}^*$ – температура за силовой турбиной, ψ – относительная влажность атмосферного воздуха, %; $n_{тк}$ – приведенная частота вращения турбокомпрессора; $\Delta P_{вх}$ – статическое давление в мерном сечении входного канала; $F_{газ}$ – расход топливного газа; $\Delta P_{вх}^*$ – полное давление в мерном сечении входного канала; $N_{э}$ – активная электрическая мощность, $P_{к}^*$ – избыточное давление за компрессором; параметры впрыскиваемой воды: $T_{вод}$ – температура, $P_{вод}$ – давление, $G_{вод}$ – расход; $T_{к}^*$ – температура за компрессором; $T_{г}^*$ – температура перед турбиной (за камерой сгорания); $P_{тк}^*$ – избыточное давление за турбиной компрессора.

Расход перегретой воды при ее впрыске в компрессор ГТД ТВ-3-117 составил 67 г/с, т.е. $x_v = G_v/G_{\text{возд}} \sim 1 \%$, температура и давление воды перед системой форсунок равнялись 240 °С и 5,0 МПа, соответственно.

Как следует из табл. 1.1, при впрыске перегретой воды температуры за компрессором и в камере сгорания перед турбиной компрессора снизились (соответственно на 5 и 11 °С) только по прошествии приблизительно 2 мин. Это вызвано прогревом коммуникаций подачи перегретой воды от запорных вентилей с байпасной линии до места впрыска в компрессор. Подача в первые 1,0–2,0 минуты, недостаточно нагретой для перегретого состояния и «взрывного» деления капель воды может приводить к сепарации образующихся сравнительно крупных капель на лопатках направляющего аппарата компрессора, рабочих лопатках, а также на корпусе компрессора, что приводит к запаздыванию снижения температур по газовому тракту ГТД.

В режиме II с впрыском перегретой воды температуры воздуха после компрессора T_k и рабочего тела в камере сгорания перед турбиной T_r и после турбины компрессора $T_{\text{тк}}$ понизились: T_k — на 4 °С, T_r — на 11 °С, и $T_{\text{тк}}$ — на 33 °С. Снижение температур после компрессора и перед турбиной компрессора оказалось меньше, чем в расчетных оценках. Основная причина такого различия — меньшая по сравнению с расчетами температура входящего в компрессор воздуха, в опытах T_0 составляла всего лишь 5,9 °С по сравнению с 25 °С, принятыми в расчетах.

Выше расчетной была также влажность воздуха (60 %). В условиях испытаний изменение КПД и выходной мощности с переходом с режима I на режим II составило $\overline{\Delta\eta} \sim 0,5 \%$ (относительных) и $\overline{\Delta N_s} \sim 0,9 \%$.

Также наблюдалось заметное повышение давления за компрессором P_k (примерно на 1,5 %).

Показательным для оценки влияния впрыска перегретой воды на характеристики компрессора и газотурбинной установки в целом является сравнение режимов I и III. Следует отметить, что с переходом от режима II к режиму III при восстановлении температуры в камере сгорания перед турбиной компрессора в силу повышения мощности турбины компрессора [если сравнить перепад температур на ней ($T_r - T_{\text{тк}}$) в I и III режимах], имеет место заметное повышение числа оборотов (с 92,1 на 92,6 %), что сказывается на повышении степени сжатия π_k (с 7,2 до 7,38) и приводит к росту расхода воздуха, что в свою очередь, влияет на повышение

выходной мощности $N_э$ (до 909 кВт), причем как в сравнении с режимом I (858 кВт), так и с режимом II (866 кВт). В результате, как видно из таблицы 1.1, полезная мощность $N_э$ установки увеличивается на 5,9 %. При этом, внутренний КПД компрессора несколько возрос (приблизительно на 1 %), общий КПД установки остался практически тем же.

Таким образом, несмотря на существенно меньшую, чем в условиях ISO температуру входного воздуха (и его повышенную влажность), налицо положительное влияние впрыска перегретой воды на полезную мощность установки, степень сжатия в компрессоре и запас до помпажа. Пересчет результатов испытаний на параметры ISO дает увеличение полезной мощности установки $N_э$ на 11 %.

Следует отметить, что проведенные ранее на ГТД ТВ-4-117 опыты с впрыском в компрессор неперегретой (холодной) воды при аналогичных режимах работы не дали сколь-либо заметного улучшения показателей ГТУ.

1.5. Выводы из испытаний ГТД ТВ-4-117

1. Проведены испытания системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТД ТВ-4-117 Демоцентра ОИВТ РАН, определено влияние впрыска на характеристики компрессора и ГТУ в целом.

2. Испытания показали положительное влияние впрыска перегретой воды на характеристики компрессора и ГТУ в целом. При впрыске перегретой воды в количестве около 1 % от расхода воздуха и сохранении температуры продуктов сгорания перед турбиной компрессора выходная мощность энергоустановки возросла на 5,9 % при сохранении КПД установки (при температуре наружного воздуха 4,9 °С). Это соответствует увеличению полезной мощности при параметрах ISO на 11 %.

3. Анализ экспериментальных данных и сопутствующих расчетных оценок показывает существенную зависимость эффекта впрыска перегретой воды на характеристики ПГУ от температуры входного воздуха. С ростом температуры наружного воздуха полезная удельная мощность и КПД энергоустановки увеличиваются.

Протокол испытаний системы впрыска перегретой воды в компрессор ГТУ ТВ-3-117 приведен в Приложении 1.

2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА ПРОЦЕССА

В настоящее время наращивание мощностей стационарной энергетики осуществляется путем ввода парогазовых установок (ПГУ), у которых КПД лучших образцов достигает 60 % и более. В свою очередь, технико-экономические показатели ПГУ в значительной мере определяются совершенством газотурбинной части комбинированного цикла, т.е. технико-экономическими характеристиками газовой турбины (ГТУ). Одним из путей повышения характеристик ГТУ является переход к сложному циклу, т.е. использованию промежуточного охлаждения (в общем случае, приближение к изотермическому сжатию) и промежуточного подогрева рабочего тела. В первом случае снижается работа сжатия в компрессоре ГТУ, на которую затрачивается от 40 до 60 % мощности, вырабатываемой ГТУ, во втором — повышается удельная мощность установки, увеличивается температура газов на входе в котел-утилизатор ПГУ, появляется возможность без потери мощности снизить температуру газов на входе в газовую турбину.

Промежуточное охлаждение воздуха в компрессоре обычно осуществляется в поверхностном охладителе, устанавливаемом в рассечку между ступенями компрессора. Другим вариантом промежуточного охлаждения сжимаемого рабочего тела (воздуха) является впрыск воды в виде капель на вход в тракт компрессора и/или его промежуточные ступени, когда испаряющиеся капли воды забирают тепло от воздушного потока, охлаждая его. Чтобы обеспечить полное испарение капель за время их пребывания в тракте компрессора (оно исчисляется миллисекундами), необходимо интенсифицировать их испарение. Эффективность процесса испарения зависит от удельной поверхности капель, т.е. поверхности, приходящейся на единицу объема (массы) вводимой жидкости, которая обратно пропорциональна их диаметру. Чем меньше капли, т.е. чем тоньше распыл влаги форсунками, тем интенсивней испарение и теплообмен капель с охлаждаемым горячим воздухом.

Существует и второе важное обстоятельство, влияющее на интенсивность испарения. Крупные капли (диаметром 4–5 мкм и выше) достаточно инерционны, они осаждаются на лопаточном аппарате компрессора и отбрасываются на его корпус. Поверхность образующихся пленок значительно меньше поверхности

капель, ниже и коэффициенты теплоотдачи, что уменьшает количество тепла, отводимого от охлаждаемого воздуха. В результате, вводимая (впрыскиваемая) в тракт компрессора охлаждающая вода охлаждается лишь частично и значительная часть введенной воды (до 50 %) следует транзитом в камеру сгорания ГТУ. На ее испарение затрачивается тепло топлива, ухудшая показатели ГТУ.

Тем самым, обеспечение тонкого распыла капель (до диаметра 2–3 мкм и ниже) является важной инженерной задачей.

Столь тонкий распыл недостижим в традиционно применяемых механических и пневматических форсунках любой конфигурации, в которых капли дробятся до 15 мкм и больше. Поэтому требуются принципиально новые технологические приемы. Одним из таких методов является использование метастабильной, сильно перегретой относительно температуры насыщения жидкости. В процессе истечения такой жидкости через сопло распыляющего устройства происходит ее взрывное вскипание, в результате которого жидкость дробится на тонкие фрагменты. В процессе научно-исследовательских работ, выполненных по Государственному контракту № 02.516.11.6155, были определены условия взрывного вскипания перегретой воды, изучено влияние режимных факторов и конструктивных параметров форсунок на дисперсные характеристики факела распыла воды, его форму и интенсивность испарения. Это позволило сформулировать требования к конструкции системы впрыска и режимам ее эксплуатации, что составляет предмет настоящего Регламента.

2.1. Результаты НИР, положенные в основу Регламента

Выполненные по Государственному контракту № 02.516.11.6155 НИР преследовали следующие цели:

- получение количественных данных по дисперсному составу капель, образующихся при истечении перегретой воды из форсунки;
- определение влияния перегрева на характеристики спектра капель;
- изучение формы и размеров факела распыла капель;
- изучение влияния ориентации форсунок в потоке воздуха на форму факела распыла;
- исследование динамики испарения капель и температурных полей в воздушно-капельном потоке.

Эксперименты проводились с дистиллированной водой, давление которой на входе в форсунку составляло 4 и 8 МПа, а температура изменялась от 20 до 270 °С. Опыты проводились в сносящем потоке воздуха, скорость которого достигала 40 м/с, а температура составляла 10–80 °С. В опытах использовались центробежные и прямоточные (струйные) форсунки с различной ориентацией относительно потока воздуха.

Распределение капель по размерам находилось на основании данных измерений индикатрисы рассеяния лазерного излучения в широком диапазоне углов видения, средний размер капель определялся по ослаблению интенсивности проходящего света. Осуществлялись кино- и фотосъемки факела распыла и термометрирование воздушно-капельного потока.

Эксперименты показали следующее [1, 2]:

- При распыле перегретой воды могут быть получены капли существенно более мелкого размера, чем при распыле холодной жидкости.
- Тонкий распыл наблюдается при температуре воды, превышающей 170 °С (при впрыске в среду с давлением, близким к атмосферному). При увеличении температуры воды до 240 °С тонкость распыла непрерывно возрастает.
- При температуре воды 240 °С обеспечивается получение до 65 % (по массе) капель диаметром менее 2 мкм.
- Распределение капель распыленной перегретой воды ($t = 210\text{--}240$ °С) носит бимодальный характер. Большая часть капель (65–70 % по массе) имеет размер менее 3 мкм, размер остальных капель лежит в пределах 5–12 мкм.
- Дисперсионные характеристики факелов капель при распыле перегретой воды центробежными и струйными форсунками близки, что говорит об определяющем влиянии взрывного вскипания при распыле перегретой воды.
- Образующиеся в результате взрывного вскипания капли малого размера вследствие их малой инерционности следуют за линиями тока сносящего воздуха. Это приводит к пространственной локализации факела распыла, который принимает вытянутую форму («шнурование» капельного потока) с полууглом раскрытия 11–12°. Чем выше температура распыливаемой воды, т.е. чем мельче капли, тем сильнее «шнурование» потока капель.
- Сечение канала, занятое «шнурованным» факелом распыла, несколько возрастает при расположении оси форсунки по нормали к потоку воздуха.

Рис. 2.1. соответствует варианту впрыска перегретой воды в компрессор (К) ГТУ, входящей в состав парогазовой установки (ПГУ). В этом варианте впрыскиваемая горячая вода с температурой 200–220 °С отбирается из входного коллектора экономайзера котла-утилизатора (КУ) ПГУ. На рисунке показано, что имеется возможность ввода воды как во входное устройство (ВУ) компрессора, так и в промежуточные ступени компрессора.

На рис. 2.2 показана схема, когда впрыск осуществляется в ГТУ простого цикла. В данном случае подогрев впрыскиваемой воды до нужной температуры осуществляется в специальном трубчатом подогревателе (П), обогреваемом отработанными продуктами сгорания газовой турбины (ГТ). Подогреватель устанавливается в выходном канале ГТ.

В обоих вариантах должна быть предусмотрена установка фильтров тонкой очистки (Ф).

2.3. Исходные данные и рекомендации для проектирования системы впрыска перегретой воды

При проектировании системы впрыска и разработке конструкций форсунок целесообразно исходить из следующих положений.

➤ Целесообразно использовать прямоточные (струйные) форсунки как более простые в изготовлении и имеющие меньшие габариты, что позволяет их размещать в промежуточных ступенях компрессора, на стенках корпуса или в теле спрямляющих лопаток.

➤ Диаметр сопла форсунки должен быть в пределах 0,25–0,3 мм, что при давлении на входе 6–8 МПа обеспечивает расход впрыскиваемой воды через форсунку 5–7 г/с.

➤ Рекомендуемая длина цилиндрического сопла форсунки 1 мм.

➤ Давление воды на входе в форсунку 6–8 МПа.

➤ Температура воды на входе в форсунку 220–240 °С. Снижение температуры воды ниже 200 °С не рекомендуется.

➤ На входе в коллектор, распределяющий воду между форсунками, должен устанавливаться фильтр тонкой очистки. Впрыскиваемая вода не должна содержать солей жесткости.

➤ Оси сопел форсунок должны быть направлены примерно под 90° к направлению воздушного потока.

➤ Полуугол распыла капельного потока составляет $\sim 12^\circ$.

➤ Испаряющиеся капли охлаждают воздушную струю в пределах поперечного сечения факела распыла. Тем самым для эффективного охлаждения всего воздушного потока необходимо предусмотреть достаточное число форсунок с тем, чтобы обеспечить взаимное перекрытие смежных факелов в поперечном сечении проточной части компрессора. При этом следует учитывать возможность установки форсунок в нескольких соседних ступенях компрессора.

➤ При газодинамических расчетах воздушно-капельного потока и испарения капель в проточной части компрессора следует исходить из бимодального распределения капель распыленной воды по размерам. При этом можно условно принять, что 65 % капель имеют средний диаметр 1,5 мкм, а 35 % капель имеют средний диаметр 10 мкм.

➤ Система впрыска перегретой воды должна быть снабжена должным количеством дренажей большого диаметра, последний по ходу среды дренаж устанавливается перед фильтром тонкой очистки. Дренажи предназначены для прогрева установки и сдувки продуктов коррозии экономайзера КУ (подогревателя) и тракта подвода воды на впрыск. Регулируемые дренажи должны также иметься на корпусе компрессора.

➤ Специальному анализу и проработке с учетом специфики переменных режимов конкретной ГТУ (ПГУ) и количества потребной воды на впрыск должна подвергнуться система автоматического отключения/включения отдельных форсунок при изменении мощности турбины.

2.4. Эксплуатационные вопросы

Чрезвычайно важными для реализации впрыска перегретой воды являются химочистка впрыскиваемой воды от солей жесткости и ее тонкая фильтрация. В схеме с ПГУ (см. рис. 2.1), где вода на впрыск берется на выходе из экономайзера котла-утилизатора, чистота впрыскиваемой воды достигается естественным образом, поскольку питательная вода имеет химсостав, соответствующий нормам ПТЭ для барабанных котлов. В схеме с подогревателем (см. рис. 2.2) потребуется установка дополнительного оборудования химводоочистки.

В обоих случаях газотурбинная установка должна быть снабжена устройствами для периодической промывки тракта компрессора на ходу. Технология такой отмывки отработана для газотурбинных двигателей морского назначения.

При пуске и прогреве системы впрыска перегретой воды необходимо осуществлять интенсивное дренирование тракта подачи воды от исходного коллектора экономайзера КУ (подогревателя) до корпуса ГТУ. Особенно тщательным должно быть дренирование после длительных простоев и ремонтов, чтобы избежать заноса системы форсунок продуктами коррозии тракта.

На корпусе компрессора также должно быть достаточное количество регулируемых дренажей необходимого диаметра.

Технический регламент систем впрыска в промышленной ПГУ приведен в Приложении 2.

2.5. Литература к разделу 2

1. Домбровский Л.А., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А. и др. Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 12–20.

2. Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А. и др. Развитие факела распыла перегретой воды в воздушном потоке // Теплоэнергетика. 2010 № 3. (в печати).

3. The TopHAT Turbine Cycle // Modern power systems. Gas Turbine Technologies. Apr. 2001, P. 35–37.

4. Sher E., Bar-Kohany T., Rashkovan A. Flash-boiling atomization // Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Vol. 34. P. 417–439.

3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В И ПРОГНОЗНЫЙ ПЛАН КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

3.1. Технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов

3.1.1. Оценка суммарной мощности ГТУ, в которых может быть использован впрыск воды в компрессор

Износ основного оборудования тепловых электростанций страны чрезвычайно высок. Более половины паровых турбин исчерпало назначенный ресурс и работает в условиях продления срока службы на индивидуальной основе, что чревато чрезвычайно серьезными последствиями. В ближайшие 10-15 лет 80 % турбинного оборудования ТЭС должно быть заменено или кардинально модернизировано (см. «О целевом видении стратегии развития электроэнергетики России на период до 2030 г.» М.:ОИВТРАН, 2007.). Основу теплоэнергетики на ближайшие десятилетия составят парогазовые установки (ПГУ), опирающиеся на современные газовые турбины (ГТУ).

Мощности ГТУ, которые должны быть введены в процессе замены и реконструкции оборудования действующих ТЭС, а также наращивания их мощностей до 2020 г., составляют 45-50 ГВт. Современные генерирующие компании (ОГК и ТГК) целенаправленно проводят курс на преимущественное использование импортного оборудования, модернизация которого возможна только заводом-изготовителем. Это резко ограничивает потенциал внедрения разработанных научно-технических решений. В связи с этим и с учетом стагнации отечественного энергетического машиностроения этот потенциал можно оценить как максимальный ежегодный ввод отечественных ГТУ в составе ПГУ суммарной мощностью 1000 МВт до 2015 г. с некоторым увеличением к 2020 г.

Таким образом, общая мощность энергетических ГТУ, где могут быть реализованы разработанные технические решения, может составить 5000 МВт в 2015 г. и 15 000 МВт в 2020 г.

Разработанные решения могут быть эффективно применены в ГТУ малой мощности, особенно в конверсионных машинах. Однако, их суммарная мощность вряд ли превысит 1000 МВт в 2015 г. и 2000 МВт в 2020 г.

В итоге, с учетом того, что из-за индивидуальных особенностей конкретных станций разработанные научно-технические предложения не могут быть реализованы повсеместно, общая мощность газовых турбин, пригодных для реализации предложений, составит 3000 МВт в 2015 г. и 8500 МВт в 2020 г.

3.1.2. Технико-экономические показатели разработанной технологии впрыска перегретой воды

Согласно опытам на промышленной ГТУ ТВ-3-117 мощностью 1,25 МВт и опытам с впрыском холодной воды в компрессор АЛ-21 ГТУ мощностью 20 МВт, выполненным ММПП «Салют» совместно с ОИВТ РАН, подтвержденным расчетными оценками, впрыск перегретой воды в компрессор ГТУ с достижением тонкого распыла обеспечивает повышение КПД установки на 2,0 % и рост мощности 5 % за счет снижения мощности, потребляемой компрессором, и увеличения расхода прокачиваемого воздуха. Указанные показатели взяты по нижней границе диапазона достигнутых параметров.

3.1.3. Оценка коммерческой эффективности разработанных научно-технических решений

Увеличение выработки электроэнергии:

Суммарная мощность ГТУ с впрыском воды в компрессор:

$$N_0 = 3000 \text{ МВт (2015 г.)}$$

$$N_0 = 8500 \text{ МВт (2020 г.)}$$

Число часов использования впрыска воды в компрессор с учетом сезонных графиков нагрузки и сезонных изменений температуры наружного воздуха $\tau = 4500$.

Фактическое увеличение мощности ГТУ в результате впрыска в компрессор перегретой воды, обеспечивающей тонкий распыл ($\delta N_0 = 5 \%$):

$$\Delta N_0 = 150 \text{ МВт (2015 г.)}$$

$$\Delta N_0 = 425 \text{ МВт (2020 г.)}$$

Дополнительная годовая выработка электроэнергии ГТУ в результате впрыска в компрессор перегретой воды, обеспечивающей тонкий распыл, $\Delta \mathcal{E} = \Delta N_0 \cdot \tau$:

$$\Delta \mathcal{E} = 675 \text{ млн кВт}\cdot\text{ч (2015 г.)}$$

$$\Delta \mathcal{E} = 1910 \text{ млн кВт}\cdot\text{ч (2020 г.)}$$

Стоимость дополнительной выработки электроэнергии

$$\Delta C = \Delta \mathcal{E} \cdot C_3,$$

где C_3 — оптовая цена отпуска электроэнергии с шин электростанций ($C_3 = 60$ коп/(кВт·ч) — 2009 г.)

$$\Delta C = 405 \text{ млн руб/год (2015 г.)}$$

$$\Delta C = 1150 \text{ млн руб/год (2020 г.)}$$

Обе цифры даны в ценах 2009 г.

Сегодня из-за неопределенности темпов инфляции и ежегодных плановых (но количественно неизвестных) увеличений тарифов на электроэнергию достоверная оценка в ценах 2015 и 2020 г. невозможна.

Снижение стоимости выработки электроэнергии

Изменение КПД выработки электроэнергии ПГУ — 2 % (с 52 до 54 %).

Уменьшение расхода удельного топлива:

$$\Delta b = \frac{0,123}{\eta_1} - \frac{0,123}{\eta_2} \quad (\eta_1 = 0,52; \eta_2 = 0,54)$$

$$\Delta b = 8,72 \text{ г у.т./кВт}\cdot\text{ч}$$

Годовая экономия топлива $B = \Delta b N \tau$:

$$\Delta B = 5650 \text{ т у.т. (2015 г.)}$$

$$\Delta B = 16\,000 \text{ т у.т. (2020 г.)}$$

3.2. Прогнозный план коммерциализации разработанных научно-технических решений

Год	Введенная мощность газовых турбин с впрыском воды в компрессор, МВт	Стоимость дополнительной выработки электроэнергии, млн руб/год (в ценах 2009 г.)
2011	600	80
2015	3000	405
2020	8500	1150

Оценка рынка разработанных изделий

Количество форсунок на 1 МВт установленной мощности ГТУ — 50 шт.
Ежегодный объем продукции (количество форсунок) по годам с учетом ремонтного резерва, штук

2011	—	7500
2015	—	40 000
2020	—	110 000

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА ОКР ПО ВПРЫСКУ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В КОМПРЕССОР ПРОМЫШЛЕННОЙ ПГУ МОЩНОСТЬЮ 60 МВт

4.1. Основание для разработки ТЗ на ОКР по отработке технологии впрыска перегретой воды в компрессор промышленной ПГУ мощностью 60 МВт — календарный план работ по Государственному контракту № 02.516.11.6155.

4.2. Цель ОКР: отработка технологии впрыска перегретой воды в условиях промышленной эксплуатации крупной установки (ПГУ).

4.3. Состав установки по впрыску перегретой воды:

4.3.1. Подогреватель воды с давлением на выходе до 10 МПа и температурой до 270 °С, установленный в выходном контуре ПГУ. Расход воды до 3 кг/с (10,8 т/ч).

4.3.2. Тракт транспортировки воды к газовой турбине ПГУ с изоляцией и системой дренажей, сменными фильтрами грубой и тонкой очистки. Снижение температуры воды по тракту не более 15 °С.

4.3.3. Совокупность (система) форсунок во входной камере компрессора ГТУ.

4.3.4. Совокупность (система) форсунок в 3–5 ступенях компрессора ГТУ, размещаемых в корпусе и лопатках спрямляющих аппаратов.

4.3.5. Система контроля параметров впрыска.

4.3.6. Система автоматического управления впрыском.

4.4. Основные технические характеристики

4.4.1. Параметры впрыскиваемой воды: давление 8 МПа, температура 220–240 °С.

4.4.2. Расход впрыскиваемой воды на установку до 3 кг/с.

4.4.3. Расход воды на одну форсунку 3–6 г/с.

4.4.4. Тип форсунок — прямоточные.

4.4.5. Местоположение точек впрыска: входное устройство компрессора ГТУ и 3–5 ступени компрессора.

4.4.6. Система КИПиА должна обеспечивать измерение, первичную обработку, регистрацию и архивирование параметров с помощью ЭВМ.

4.5. Состав разрабатываемой научно-технической продукции

4.5.1. Результаты комплексных испытаний технологической схемы в составе ПГУ и ее доводки до проектных показателей при работе ПГУ в диапазоне 50–100 % номинальной мощности в зимних и летних условиях.

4.5.2. Регламент на проектирование и эксплуатацию систем впрыска в серийные промышленные установки.

4.5.3. Головной образец системы впрыска перегретой воды в промышленную установку.

4.6. Требования к патентной чистоте и патентоспособности

4.6.1. Должны быть проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р15.011-96.

4.7. Техничко-экономические показатели

4.7.1. Впрыск перегретой воды в тракт компрессора ПГУ должен обеспечить повышение КПД ПГУ в размере 1,5–2 % (относительных).

Техническое задание на ОКР по впрыску перегретой воды в компрессор промышленной GUE мощностью 60 МВт приведено в Приложении 3.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ по I этапу:

Показано, что впрыск воды в компрессор ГТУ (ПГУ) существенно улучшает технические показатели парогазовых и газотурбинных установок: растет удельная мощность, повышается КПД, улучшаются экологические характеристики. Эффективность впрыска растет с уменьшением размера капель впрыскиваемой жидкости, который согласно оценкам не должен превышать 3 мкм во избежание сепарации влаги в тракте компрессора.

На основании выполненных расчетов и с учетом проведенных патентных исследований уточнена базовая концепция высокодисперсного распыла воды при впрыске ее в компрессор ГТУ. В качестве технологии, обеспечивающей тонкий распыл, выбран впрыск воды, перегретой относительно температуры насыщения. В этом случае высокодисперсный распыл достигается благодаря взрывному вскипанию перегретой (метастабильной) жидкости.

Модернизирована экспериментальная установка «Распыл» ОИВТ РАН. Изготовлены новые узлы технологического контура и рабочий участок для проведения запланированных измерений.

Модернизирована система измерений параметров двухфазной воздушно-капельной среды после ее распыления. Диагностический комплекс включает одновременное измерение теплофизических характеристик двухфазного потока, видеосъемку факела распыла, а также определение индикатрис рассеяния лазерного луча в широком диапазоне изменения углов рассеяния и интегрального ослабления света для нахождения дисперсионных характеристик капель в микронном и субмикронном диапазоне их размеров. Установка позволяет проводить эксперименты с изменением температуры перегретой воды до 250 °С при ее расходе через форсунки от 5,0 до 10 г/с. Эксперименты проводились в сносящем потоке воздуха, движущемся со скоростью до 40 м/с.

Изготовлены лабораторные образцы центробежных и струйных форсунок с диаметром сопел 0,6 и 0,3 мм соответственно.

Экспериментально показано, что технология впрыска перегретой воды обеспечивает получение тонкодисперсного распыла капель: 70 % капель (по массе) имеет диаметр менее 3 мкм, что существенно ниже, чем размер капель, получаемых при использовании механических и пневматических форсунок. Тонкий распыл вскипанием достигается при температуре воды не ниже 170 °С; с ростом температуры воды до 240 °С размеры капель снижаются.

Обнаружен бимодальный характер дисперсионного распределения капель по размерам при распыле вскипанием: наряду с мелкими фракциями (0,4–3 мкм) существуют капли размером 6–11 мкм. Наличие бимодального распределения капель должно учитываться при расчете и проектировании систем впрыска.

В результате работ по II этапу:

Установлено, что мелкие капли, получаемые при распыле перегретой воды, под действием потока воздуха образуют пространственно локализованный факел, т.е. наблюдается «шнурование» факела распыла, что может заметно осложнить равномерное охлаждение сжимаемого воздуха и испарение капель и сильно снизить его интенсивность. Эффект шнурования должен учитываться при проектировании систем впрыска.

Выявлено, что характеристики центробежных и струйных форсунок при распыле перегретой воды достаточно близки. Поэтому использование струйных форсунок вследствие их меньших габаритов и большей технологичности в изготовлении является предпочтительным.

Проведенный расчетно-теоретический анализ показал слабую интенсивность процессов коагуляции капель, а также незначительное влияние газодинамического дробления капель при их взаимодействии с потоком воздуха на результирующую дисперсность воздушно-капельного потока (факелов распыла)..

Разработаны два варианта демонстрационных образцов форсунок струйного типа с диаметром сопла 0,3 мм, но различной длиной рабочей части сопла, которые прошли испытания на установке «Распыл» и на стенде внеконтурных испытаний систем впрыска перегретой воды в Демоцентре ОИВТ РАН.

Спроектирована, изготовлена, смонтирована и испытана система впрыска перегретой воды в полномасштабный компрессор газовой турбины ТВ-3-117 Демоцентра ОИВТ РАН. Проведены испытания системы подготовки перегретой воды, показавшие возможность достижения требуемых параметров перегретой воды — до 250 °С и 4,0...6,0 МПа при длительном расходе воды до ~2 % расхода воздуха

в турбину ТВ-3-117. Лазерная диагностика и термодинамические измерения двухфазного потока, а также видеосъемка факелов подтвердили идентичность характеристик факелов распыла с исследованными на установке «Распыл».

На основе данных экспериментов и испытаний демонстрационных образцов струйных форсунок с диаметром сопла 0,3 мм разработаны конструкторские решения по системе распыла перегретой воды в компрессоры полномасштабной ГТУ (ТВ-3-117). Модельный блок демонстрационных форсунок прошел успешные внеконтурные испытания.

Система распыла перегретой воды с демонстрационными образцами форсунок изготовлена и смонтирована во входном воздухопроводе газотурбинной установки ТВ-3-117 Демцентра ОИВТ РАН.

На III (заключительном) этапе работ:

Проведены испытания разработанной системы впрыска перегретой воды в компрессор полномасштабной ГТУ — двигателя ТВ-3-117 на 50 и 80 % его номинальной мощности. Результаты испытаний подтвердили перспективность разработанной технологии впрыска перегретой воды.

При впрыске перегретой воды в количестве 1 % от расхода воздуха и сохранении температуры продуктов сгорания перед турбиной компрессора выходная мощность энергоустановки возрастает на 11 % (при параметрах ISO).

Разработаны технический регламент процесса.

Разработано техническое задание на ОКР по впрыску перегретой воды в компрессор промышленной ПГУ мощностью 60 МВт.

Проведены технико-экономические оценки рыночного потенциала полученных результатов и прогнозный план коммерциализации разработанных научно-технических решений.

Предусмотренный ТЗ и календарным планом объем работ выполнен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович А.Л., Розеноер Е.Е. Форсировка ГТУ впрыском воды в компрессор. Обзорная информация ЦНИИТЭИтяжмаш. М.: Энергетическое машиностроение. Серия 3. 1989. С 36.
2. Фаворский О.Н., Бессмертных А.В., Григорьянц Р.Р. и др. Новые пути повышения эффективности конверсионных ГТУ газопарового цикла малой мощности // Теплоэнергетика. 2005. № 6. С. 48-55.
3. Серeda С.О., Гельмедов Ф.Ш., Мунтянов И.Г. Экспериментальное исследование влияния впрыска воды во входной канал многоступенчатого осевого компрессора на его характеристики // Теплоэнергетика. 2004. № 5. С. 66-70.
4. Беляев В.Е., Серeda С.О., Гельмедов Ф.Ш. и др. Результаты испытаний компрессора установки МЭС-60 с впрыском воды в проточную часть // Газотурбинные технологии. 2005, Май-июнь. С. 16-20.
5. Серeda С.О., Гельмедов Ф.Ш., Сачкова Н.Г. Расчетные оценки изменения характеристик многоступенчатого осевого компрессора под влиянием испарения воды в его проточной части // Теплоэнергетика. 2004. № 11. С.60-65.
6. Беркович А.Л. Исследование движения жидкой фазы в проточной части осевого компрессора // Известия ВУЗ. Энергетика. 1987. № 9. С.66-67
7. Григорьянц Р.Р., Залкинд В.И. и др. Особенности поведения жидкой фазы в высокооборотных компрессорах конверсионных газотурбинных установок и их влияние на характеристики и эффективность «влажного» сжатия // Теплоэнергетика. 2007. № 4. С.55-62.
8. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение. 1964, 522 с.
9. The TopHAT Turbine Cycle. Modern Power Systems // Gas Turbine Technologies. Apr. 2001. pp. 35-37.