

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО
ГАЗОВОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ
МЕТАНОКИСЛОРОДНОГО ТОПЛИВА¹**

© 2023 г. О. О. Мильман^{a, b}, В. С. Крылов^{a, b, *}, А. В. Птахин^{a, b}, Д. В. Брдынкевич^a, С. Н. Ленев^c,
А. Н. Вивчар^c, К. С. Никишов^c, Р. Н. Такташев^d

^aЗАО НПВП “Турбокон”, ул. Комсомольская Роцца, д. 43, г. Калуга, 248010 Россия

^bКалужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
ул. Степана Разина, д. 26, г. Калуга, 248023 Россия

^cПАО “Мосэнерго”, просп. Вернадского, д. 101, корп. 3, Москва, 119526 Россия

^dВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: krylov92@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.07.2022 г.

После доработки 23.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Описаны схемы высокотемпературных турбин с водородно-кислородным и метанокислородным топливом, конструкция экспериментального образца такой турбины мощностью 100 кВт и результаты ее испытаний. Разработана, изготовлена и испытана на лабораторном стенде камера сгорания метанокислородного топлива в среде водяного пара, спроектирован и изготовлен блок дополнительного газового перегрева рабочего тела, проведены его испытания на базе турбины Т-25-90-4ПР-1 ТЭЦ-16 филиала ПАО “Мосэнерго”. Экспериментальные исследования показали устойчивое горение метанокислородной смеси в среде водяного пара и подтвердили работоспособность технологии дополнительного газового перегрева рабочего тела в условиях реальной теплоэлектростанции. Получены термограммы состояния металла жаровой трубы и корпуса в процессе пуска и в расчетном режиме. Сопоставлены технические характеристики высокотемпературного газопаротурбинного блока и классического варианта К-300-23.5-3. Отмечено отсутствие нормативной базы для осуществления нетрадиционного проекта в условиях реальной тепловой электростанции. Получен необходимый технический задел и предложен порядок разработки опытного образца высокотемпературной газопаровой турбины мощностью 25 МВт при температуре 1000°C и головного образца энергоблока мощностью 300–500 МВт на давление 30 МПа при температуре 1250/1450°C.

Ключевые слова: камера сгорания, перегрев пара, полнота сгорания, расход, давление, температура, мощность, коэффициент полезного действия, кислород, метан, высокотемпературная газопаровая турбина, топливо, энергоблок

DOI: 10.56304/S0040363623020054

Одна из важнейших задач в области тепловой энергетики — повышение коэффициента полезного действия паровых турбин, увеличение мощности и выработки электроэнергии объектами генерации. Инновационным способом решения этой задачи является организация прямого перегрева пара, осуществляемого благодаря непосредственному сжиганию водорода и кислорода в рабочем теле. Принципиальная схема такой установки, разработанной в Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН), описана в [1]. В дальнейшем специалистами

НПВП “Турбокон” было предложено сжигать в рабочем теле метан и кислород без снижения эффективности процесса [2].

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ
ГАЗОПАРОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ**

На рис. 1 показана схема дополнительного нагрева пара, выработанного в котле. Пар поступает в камеру сгорания, в которой сжигаются метан и кислород. При этом происходит дополнительный перегрев пара до температуры 1200–1400°C. В таком режиме турбина работает на смеси продуктов сгорания и водяного пара при высоких давлении и температуре. Коэффициент полезного действия энергоустановки составляет 54–55%.

¹ Экспериментальная часть лабораторных испытаний выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00495 от 13.05.2022).

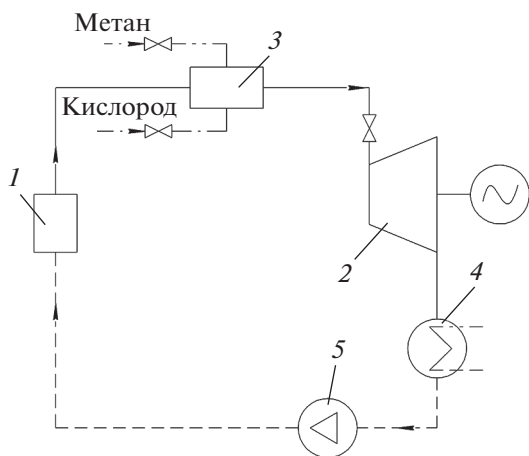


Рис. 1. Схема дополнительного перегрева пара после котла.
1 – паровой котел; 2 – турбина; 3 – камера сгорания; 4 – конденсатор; 5 – конденсатно-питательный насос

Непосредственный перегрев рабочего тела в замкнутых высокотемпературных установках осуществляется в схеме, основанной на цикле Аллама (рис. 2) [3]. Рабочим телом в установках, разработанных в ОИВТ РАН и НПВП “Турбокон”, а также использующих цикл Аллама, является смесь водяного пара и углекислого газа, которые образовались при сгорании метана и кислорода.

Кроме того, отвод тепла от рабочего тела на выхлопе происходит за счет конденсации водяного пара из парогазовой смеси.

В 2011–2015 гг. в НПВП “Турбокон” были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по реализации дополнительного газового перегрева пара при максимальной температуре 800°C на стенде с опытным образцом высокотемпературной паровой турбины ВПТУ-100 мощностью 100 кВт [2, 4, 5].

Схема опытного образца такой установки показана на рис. 3. Прямоточный паровой котел производства Специального конструкторского бюро котлостроения (СКБК, Санкт-Петербург) паропроизводительностью 350 кг/ч вырабатывает пар давлением 3.4 МПа и температурой 560°C. В электронагревателе, имитирующем камеру сгорания, пар перегревается до 760–800°C и затем поступает в высокотемпературную высокооборотную (20000 мин⁻¹, предельная частота 24000 мин⁻¹) паровую турбину мощностью 100 кВт.

Проточная часть турбины состоит из двухвечного диска Кертиса и трех ступеней давления. Поворот потока пара на 180° происходит за диском Кертиса. При этом под действием противотока подшипники турбины разгружаются и существенно снижается перепад давлений на переднем концевом уплотнении ротора турбины. Рабочие лопатки турбины выполнены заодно с дисками.

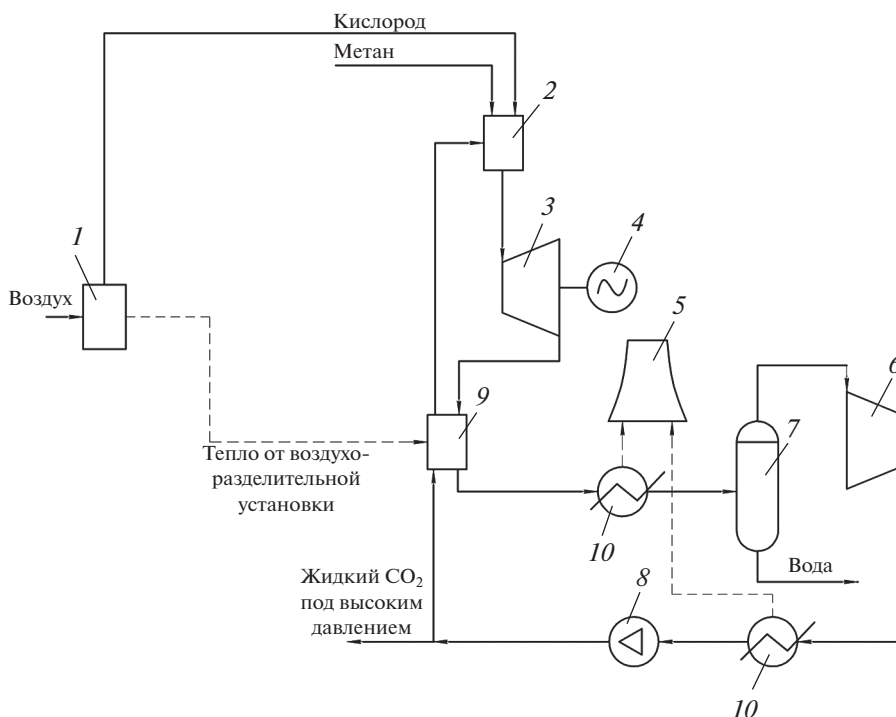


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема с циклом Аллама.
1 – воздухоразделительная установка; 2 – камера сгорания; 3 – турбина; 4 – электрогенератор; 5 – градирня; 6 – компрессор CO₂; 7 – сепаратор воды; 8 – насос; 9, 10 – теплообменник

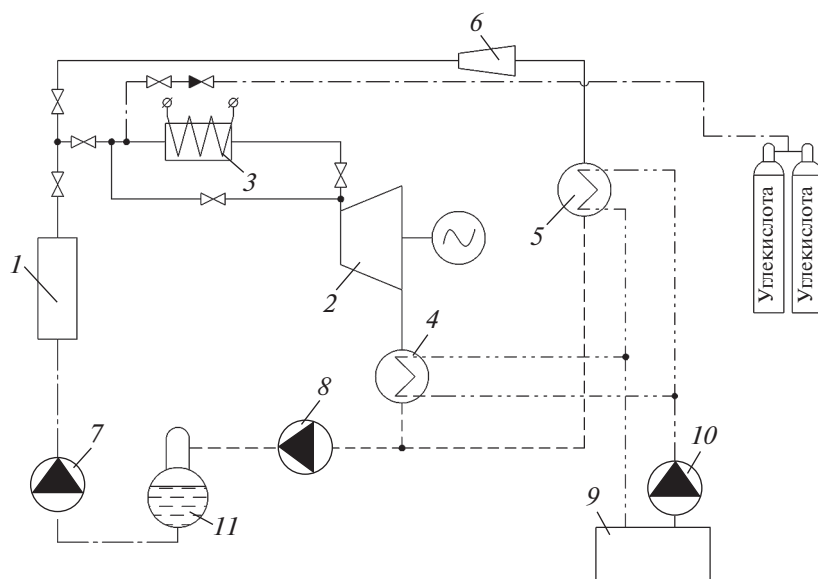


Рис. 3. Схема стенда с турбиной ВПТУ-1000.

1 – паровой котел П-035-3.4-560Г; 2 – турбина ВПТУ-100; 3 – электропароперегреватель ЭПП-60; 4 – конденсатор ВПТУ-100; 5 – вспомогательный конденсатор; 6 – редукционно-охлаждающая установка; 7, 8 – питательный и конденсатный насосы; 9 – система аппаратов воздушного охлаждения; 10 – циркуляционный насос системы охлаждения; 11 – атмосферный деаэрактор

Сопловой аппарат включает в себя сопла Лавала (ступень 1) и цельнофрезерованные вторую – пятую ступени. Проточная часть диска Кертиса имеет жаропрочное и жаростойкое покрытие.

Установка с электропароперегревателем прошла испытания при температуре пара до 762°C и мощности около 45 кВт. С участием НИУ МЭИ были разработаны проекты опытного образца установки мощностью 25 МВт при температуре смеси 1200°C и мощностью 300 МВт (с промежуточным перегревом) при температуре $1250/1450^{\circ}\text{C}$.

В высокотемпературных турбинных установках ОИВТ РАН, НПВП “Турбокон” и работающих по циклу Аллама в водяном паре, поступающем в конденсатор газопаровой турбины, присутствует углекислый газ большой концентрации. Водяной пар и углекислый газ – парниковые газы, которые могли бы образовываться в результате пароводяной конверсии природного газа. Но в рассматриваемых установках они выходят из конденсатора и могут быть утилизированы или химически связаны. Работа конденсаторов при большой концентрации неконденсирующихся газов описана в [5, 6]. Испытания лабораторного образца камеры сгорания метаноокислородной смеси были проведены в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [7].

Можно также отметить, что теплофизические свойства водяного пара при высоких давлениях и температуре, а также углекислого газа – величины одного порядка. В этом плане результаты ис-

пытаний камеры сгорания метана и кислорода в среде водяного пара представляют интерес и для циклов Аллама, и для установок ОИВТ РАН.

КОНСТРУКЦИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ БЛОКА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ГАЗОВОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

Перегрев пара в камере сгорания метаноокислородного топлива – уникальная, не имеющая аналогов в мировой энергетике технология, она была разработана в НПВП “Турбокон” при участии специалистов Всероссийского теплотехнического института и опробована на площадке ТЭЦ-16 филиала ПАО “Мосэнерго”.

Камера сгорания (рис. 4) предназначена для дополнительного газового перегрева пара (ДГПП) от 480°C до температуры примерно 700°C при сжигании в его среде метана и кислорода. Она состоит из двух блоков горения 1, установленных в распределительном корпусе 2. Блок горения включает в себя жаровую трубу 3 с горелкой 4. Внутри распределительного корпуса вмонтирован жаровой смеситель 5, с помощью которого потоки перегретого пара из каждого блока горения объединяются в общий поток. Корпус камеры сгорания, фланцы и арматура изготовлены из стали марки 12Х18Н10Т, жаровая труба и смеситель – из жаропрочной стали марки ХН38ВТ.

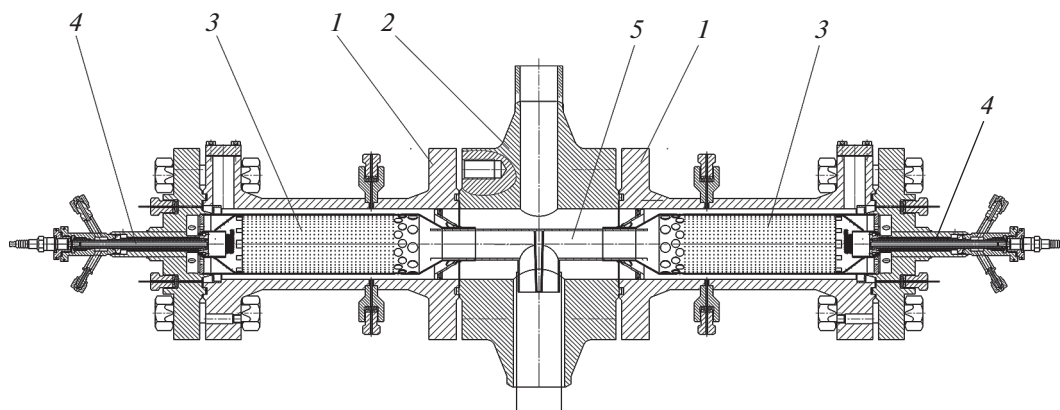


Рис. 4. Конструкция камеры сгорания.
1 – блок горения; 2 – распределительный корпус; 3 – жаровая труба; 4 – горелка; 5 – жаровой смеситель

НАЛАДОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСТАНОВКИ ДГПП

Первоначально установка ДГПП была испытана при пониженных давлениях до 0.2–0.3 МПа на стенде (рис. 5), имитирующем условия работы на действующей электростанции, в Межведомственной научно-исследовательской лаборатории им. В.А. Федорова НПВП “Турбокон”. Цель испытаний состояла в наладке установки и проверке ее работоспособности при скоростях пара, метана и кислорода, соответствующих расчетно-

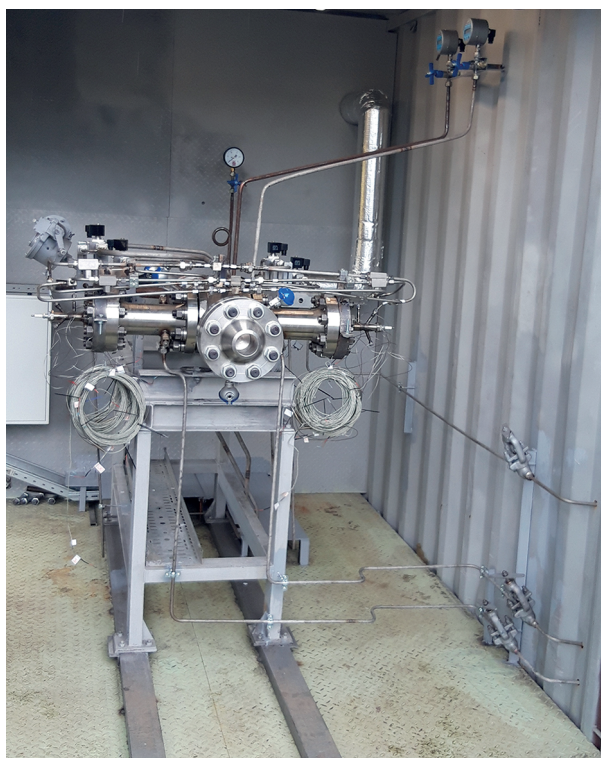


Рис. 5. Внешний вид рабочего участка ДГПП на наладочных испытаниях

му режиму перегрева пара на ТЭЦ-16 филиала ПАО “Мосэнерго”.

В ходе наладочных испытаний при ограниченном расходе пара от котла П-035-3.4-560Г был достигнут максимально возможный режим работы блоков горения при следующих параметрах:

Расход пара, кг/ч.....	320
Давление в камере сгорания, МПа.....	0.6
Температура пара, °С:	
на входе в камеру сгорания.....	420
на выходе из камеры сгорания.....	650
Расход, м ³ /ч:	
кислорода.....	11.8
метана.....	5.7

Диаграмма пусков камеры сгорания и выхода на максимальный режим показана на рис. 6.

В результате наладочных испытаний подтверждена синхронная работа двух блоков горения во всем диапазоне расходов метана, кислорода и пара, соответствующих расчетному режиму перегрева пара на ТЭЦ-16, достигнут перегрев исходного пара на 230°С, также уточнен регламент проведения экспериментальных работ на установке ДГПП для паровой турбины Т-25-90-4ПР-1. Коэффициент полноты сгорания топлива составил не менее 98%.

После успешно проведенных лабораторных испытаний установка ДГПП была смонтирована на ТЭЦ-16 филиала ПАО “Мосэнерго” (рис. 7) и подключена к существующему паропроводу (рис. 8). Следует отметить, что реализация проекта была осложнена отсутствием нормативной базы и сложностью ее разработки с учетом необходимости обеспечить безопасность действующей тепловой электростанции².

² Большой вклад в успешную реализацию проекта внесли директор ТЭЦ-16 С.В. Гушин, главный инженер А.В. Выборнов, а также Д.Г. Дмитриев и другие сотрудники.

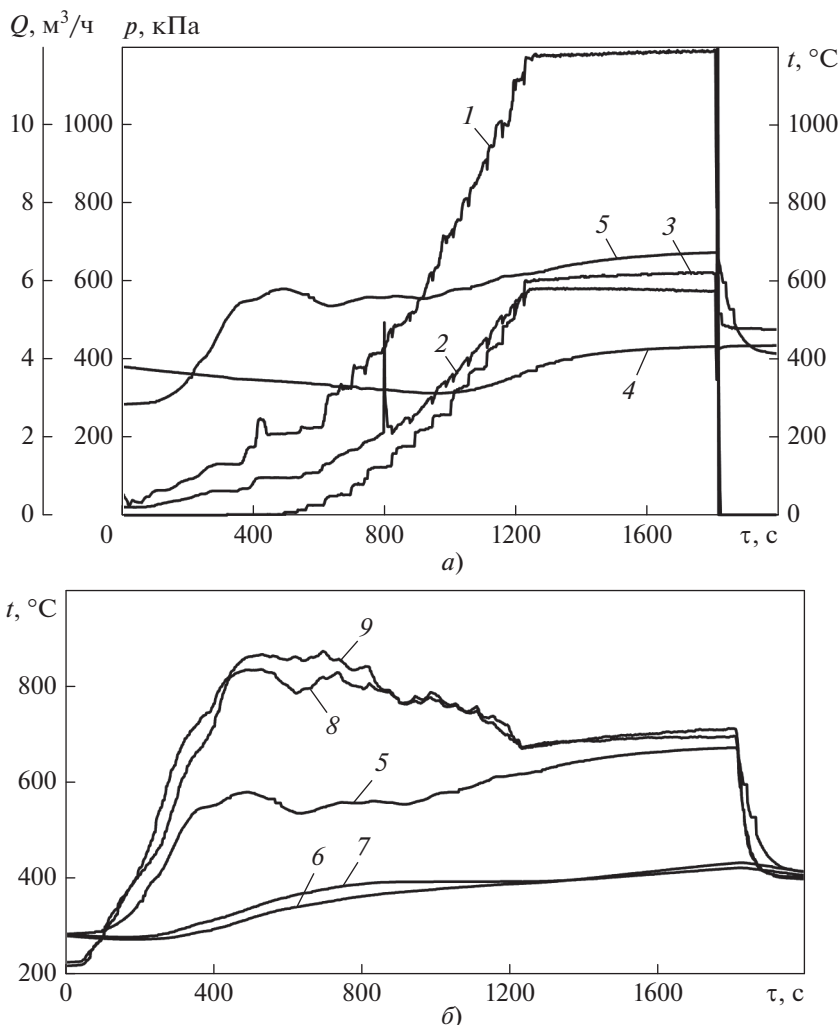


Рис. 6. Зависимость параметров процесса ДГПП (расхода Q , давления p и температуры t) при пуске и выходе на максимальный режим от времени τ при наладочных испытаниях.

a: 1, 2 – расход кислорода и метана; 3 – давление в камере сгорания, 4, 5 – температура пара на входе в камеру сгорания и выходе из нее; *б:* 6, 7 – средняя температура стенок корпуса блоков № 1, 2; 8, 9 – средняя температура стенок жаровой трубы блоков № 1, 2



Рис. 7. Внешний вид блока управления установки ДГПП на ТЭС-16 филиала ПАО «Мосэнерго»

ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ДГПП НА ТЭС-16 ПАО «МОСЭНЕРГО»

Для подтверждения работоспособности технологии ДГПП в условиях действующей ТЭС были проведены экспериментальные исследования на площадке ТЭС-16 филиала ПАО «Мосэнерго» при подаче пара на перегрев из котельного цеха. В качестве источника кислорода и метана использовали топливные рампы. Метановая рампа состояла из 18 баллонов вместимостью по 50 дм³, кислородная рампа – из 38 баллонов вместимостью по 40 дм³.

В процессе испытаний были зафиксированы устойчивый розжиг камеры сгорания и ее удовлетворительная работа при давлениях до 4 МПа. При расходе газового топлива до 32 м³/ч средняя температура перегретого пара составила 637°С,

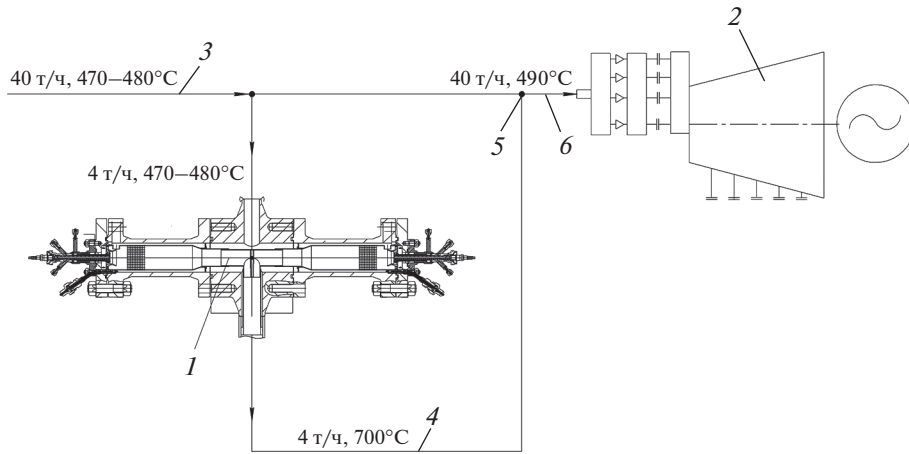


Рис. 8. Принципиальная схема установки ДГПП для турбины Т-25-90-4ПР-1.
 1 – установка ДГПП; 2 – турбина Т-25-90-4ПР-1; 3 – пар от котла; 4 – перегретый пар на выходе из установки ДГПП; 5 – узел смешения перегретого пара и основного пара; 6 – смешанный пар на входе в турбину

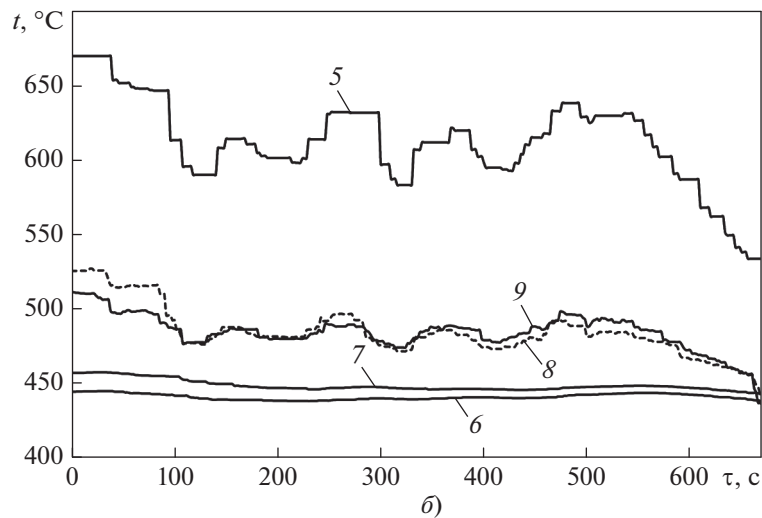
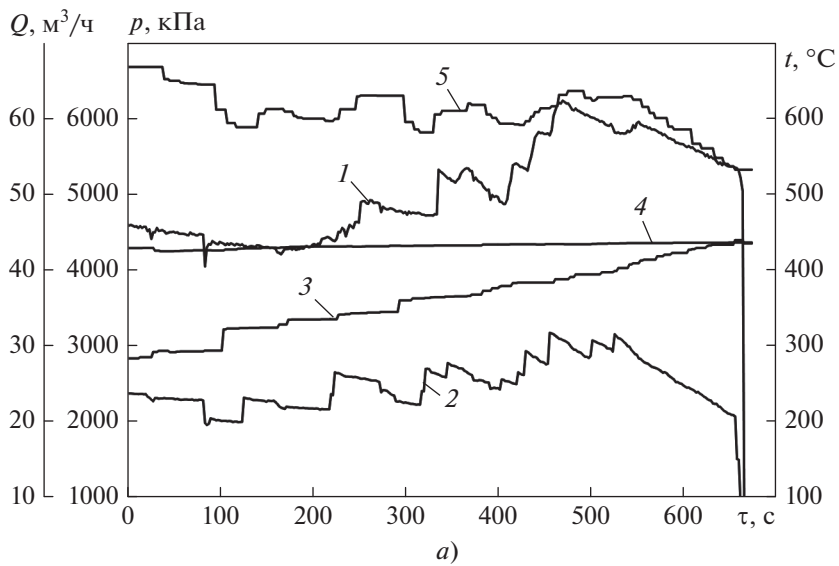


Рис. 9. Зависимость параметров процесса ДГПП при испытаниях на ТЭЦ-16 филиала ПАО “Мосэнерго”.
 Обозначения см. рис. 6

перегрев пара – 183°C (рис. 9). Было отмечено, что температуры жаровых труб и корпуса камеры сгорания относительно низкие, а это свидетельствует о значительном резерве повышения температуры перегрева пара без замены материалов на более жаростойкие и жаропрочные. Коэффициент полноты сгорания топлива превысил 90%. Производительность системы газоудаления (два стационарных эжектора) была достаточной для отвода CO₂.

Таким образом, впервые в мире была реализована уникальная технология сжигания метановодородного топлива в среде водяного пара высокого давления, которая открывает перспективы создания высокоэффективных газопаровых турбин.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАРОТУРБИНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТЬЮ 300 МВт

При участии сотрудников кафедры паровых и газовых турбин НИУ МЭИ разработан проект газопаротурбинной установки мощностью 300 МВт на давление пара 30 МПа и температуру 1250/1450°C. Коэффициент полезного действия установки по отпуску электроэнергии превышает 54%, расход пара вдвое меньше, чем в базовой турбине К-300-23.5. Создание высокотемпературной паротурбинной энергоустановки единичной мощностью 300 МВт и более является сложной научно-технической задачей, поэтому для минимизации рисков необходим основательный научно-технический задел, который должен включать в себя следующие этапы:

создание опытного образца высокотемпературной паротурбинной установки мощностью 100 кВт с котлом, камерой сгорания и высокоэффективным конденсатором. На этом образце могут быть отработаны алгоритмы управления и регулирования будущей крупной установки, получены новые данные, связанные с особенностями процессов в теплообменных аппаратах;

производство энергоблока с газовым перегревом пара (до 1200°C) мощностью 25 МВт. Такой энергоблок может быть создан с минимальными затратами, но его эксплуатация должна выявить основные особенности работы, полезные для последующих этапов;

строительство энергоблока мощностью 300–500 МВт, который должен включать в себя установки по производству кислорода, подготовке и дожатию компонентов топлива, турбину с охлаждаемыми лопатками, системы конденсации и газоудаления. На этом этапе должна быть создана

кооперация предприятий, участвующих в разработке и изготовлении энергоблока.

ВЫВОДЫ

1. На базе ТЭЦ-16 ПАО “Мосэнерго” выполнена проверка технологии дополнительного газового перегрева пара, достигнута температура пара 640°C при температурах корпуса камеры сгорания примерно 450°C, жаровой трубы 480–500°C.

2. Получен научно-технический задел для разработки и создания пилотного образца высокотемпературной паровой турбины со сжиганием метана и кислорода в среде водяного пара. Это, в сочетании с другими достоинствами, способно составить серьезную конкуренцию парогазовым установкам, в частности, благодаря возможности утилизации CO₂. В конденсате после конденсатора содержится концентрированный CO₂, что обеспечивает возможность его утилизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шпильрайн Э.Э., Мальшенко С.И., Кулешов Г.Г.** Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. **Клименко А.В., Мильман О.О., Шифрин Б.А.** Высокотемпературная газопаротурбинная установка на базе комбинированного топлива // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 43–52. <https://doi.org/10.1134/S0040363615110028>
3. **Exelon** Building Zero-emission Allam cycle plant in Texas // Nettero insider. Oct. 2014.
4. **Milman O.O.** Thermophysical problems in creation of high-temperature steam – gas turbine plants // J. Eng. Thermophys. 2016. V. 25. No. 3. P. 1–7.
5. **Высокоэффективный** конденсатор пара из парогазовой смеси / О.О. Мильман, В.С. Крылов, А.В. Птахин, А.В. Кондратьев, Г.Г. Яньков // Теплоэнергетика. 2017. № 12. С. 12–26. <https://doi.org/10.1134/S0040363617120074>
6. **Конденсация** пара из движущейся парогазовой смеси / О.О. Мильман, В.С. Крылов, А.В. Птахин, А.В. Кондратьев, Г.Г. Яньков // Теплоэнергетика. 2018. № 12. С. 71–77. <https://doi.org/10.1134/S0040363618120068>
7. **Investigation** of the process of methane-oxygen combustion in steam under the atmospheric pressure / N.A. Pribaturin, A.R. Bogomolov, S.S. Azikhanov, S.A. Shevyrev // Proc. of the Conf. “Thermophysical basis of energy technologies”. Tomsk, 13–15 Oct. 2015. P. 01062.

Experimental Study of Additional Gas Superheating of Steam in a Combustion Chamber Fired with Methane-Oxygen Fuel

O. O. Mil'man^{a, b}, V. S. Krylov^{a, b, *}, A. V. Ptakhin^{a, b}, D. V. Brdynkevich^a, S. N. Lenev^c,
A. N. Vivchar^c, K. S. Nikishov^c, and R. N. Taktashev^d

^a ZAO NPVP Turbokon, Kaluga, 248010 Russia

^b Tsiolkovskii Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia

^c PAO Mosenergo, Moscow, 119526 Russia

^d All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

*e-mail: krylov92@yandex.ru

Abstract—Schemes of high-temperature turbines operating on hydrogen-oxygen and methane-oxygen fuels, the design of an experimental prototype of such a turbine with a capacity of 100 kW, and the results of its testing are described. A combustion chamber for burning methane-oxygen fuel in steam was developed, manufactured, and tested in a laboratory test setup. A unit for additional gas superheating of the working fluid was designed, manufactured, and tested on the basis of the T-25-90-4PR-1 turbine at the cogeneration power plant TETs-16 of the branch of PAO Mosenergo. The experimental studies have demonstrated stable combustion of the methane-oxygen mixture in a steam environment and confirmed the serviceability of the technology for additional gas-fired superheating of the working fluid in a real thermal power plant. Temperature distributions in the metal of the liner and casing during start-up and under the design conditions were obtained. The technical characteristics of the high-temperature gas-steam-turbine unit and the classical K-300-23.5-3 version are compared. Unavailability of regulations required for the implementation of an unconventional project at a real thermal power plant is noted. The required technical basis was obtained, and the procedure for elaboration of a demonstration model of a high-temperature gas-steam turbine with a capacity of 25 MW at a temperature of 1000°C and a prototype of a power unit with a capacity of 300–500 MW for a pressure of 30 MPa at a temperature of 1250/1450°C was proposed.

Keywords: combustion chamber, steam superheating, combustion completion, flowrate, pressure, temperature, power, efficiency, oxygen, methane, high-temperature gas-steam turbine, fuel, power unit