

УДК 621.438

Д.Ш. АКЕРМАН, Л.А. ЗАРУБИН, В.П. РЕШИТЬКО, А.В. РОСИНСКАЯ

*Открытое акционерное общество «Турбоатом»,  
г. Харьков, Украина, e-mail: office@turboatom.com.ua*

### ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА ГТЭ-115М

У статті наведені технічні характеристики модернізованої газотурбінної установки ГТЕ-115М та її окремих систем. Розрахунок 18-и ступеневого компресора виконано у співробітництві з фахівцями Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», розрахунок системи охолодження направляючої лопатки 1 ступеня турбіни та системи охолодження ротора турбіни – у співробітництві з фахівцями Національного технічного університету «ХПІ». Опрацьована конструкція збірного ротору турбіни, валопроводу, корпусу турбіни, камери горіння, направляючої лопатки 1 ступеня турбіни та уподовженого перетину.

In the article there are given technical characteristics of the enhanced GTE-115M gas turbine unit and some of its separate systems. The design of the 18-stage axial-flow air compressor is performed in collaboration with the specialists of N.Ye. Jukovsky Aerospace National University «KhAI», design of the cooling system of the turbine 1<sup>st</sup> stage guide blade and cooling system of the turbine rotor – in collaboration with the specialists of National Technical University «KhPI». There is developed the design of an assembly turbine rotor, shaft-line, turbine casing, combustion chamber, turbine 1<sup>st</sup> stage guide blade and longitudinal section.

Газотурбинная установка ГТЭ-115М мощностью 136,4 МВт предназначена для производства электрической энергии в базовом, полупиковом и пиковом режимах.

Установка может работать автономно с использованием тепла уходящих газов для целей теплофикации, а также в составе парогазовых блоков.

При проектировании ГТУ использовался опыт ОАО «Турбоатом» по созданию газотурбинных установок ГТЭ-45 и ГТЭ-115.

ГТУ выполнена в виде единого транспортабельного блока, расположенного на раме, обеспечивающей его транспортировку и установку на фундаментные плиты. Преемственность конструкций ГТЭ-115 и ГТЭ-115М сохранена при проектировании проточных частей компрессора и турбины, системы охлаждения корпуса и ротора турбины. В результате конструкция сварного ротора компрессора, сборного ротора турбины и лопаточного аппарата компрессора и турбины максимально унифицированы. Традиционной для газотурбинных установок ОАО «Турбоатом» является кольцевая камера сгорания. Такой подход позволяет значительно уменьшить затраты на освоение головного образца.

**Таблица 1. Технические характеристики ГТЭ-115М**

Температура газа перед турбиной, °С	1220
Мощность на клеммах генератора по ISO, МВт	136,4
КПД ГТУ по ISO, %	35,27
Степень повышения давления в компрессоре	13,82
Температура воздуха за компрессором, °С	379,0
Расход топлива, кг/с ( $Q_p^H = 47313$ кДж/кг)	8,091

**Продолжение таблицы 1**

Расход газа за турбиной, кг/с	418,2
Температура газа за турбиной, °С	537,0
Выбросы NO <sub>x</sub> (при 15 % содержании O <sub>2</sub> ), ppm	25
Уровень шума, дБа	80
Масса турбогруппы, кг	183600
Габаритные размеры турбогруппы, м	
– длина	16,5
– ширина	6,1
– высота	4,5
Количество валов	1
Количество ступеней в турбине	4
Количество ступеней в компрессоре	18
Частота вращения ротора, об/мин	3000
Максимальная мощность ГТУ, МВт	169,4 <sup>*)</sup>
Тепловая нагрузка при температуре наружного воздуха –25/+15 °С, МВт	221,7/202,2
Полный КПД при работе с водогрейным котлом при температуре наружного воздуха –25/+15°С ( $t_{вх} = 100$ °С), %	84,6/87,4
Давление природного газа перед стопорным клапаном (избыточное), кгс/см <sup>2</sup>	25

<sup>\*)</sup> Достигается при температуре наружного воздуха –25 °С.

Газотурбинная установка ГТЭ-115М может работать в широком интервале температур наружного воздуха; максимальная мощность достигается при температуре наружного воздуха минус 25 °С. При работе с температурой наружного воздуха ниже минус 25 °С производится его подогрев воздухом, отбираемым из компрессора.

В качестве топлива может быть использован природный газ, жидкое дизельное топливо, продукты газификации твёрдого топлива.

#### **Турбокомпрессор**

Газотурбинная установка выполнена по простой схеме и включает в себя четырехступенчатую газовую турбину, восемнадцатиступенчатый осевой компрессор и кольцевую камеру сгорания, выполненные в общем корпусе, который устанавливается на раме. Продольный разрез ГТУ представлен на рис. 1.

Турбокомпрессор может транспортироваться единым блоком на раме без валопровода; роторы компрессора и турбины, составляющие валопровод, в сборе отправляются заказчику отдельно. Сборка турбокомпрессора производится на монтажной площадке.

Валопровод турбокомпрессора выполнен двухопорным. Конструкция без промежуточного подшипника между ротором компрессора и турбины исключает потери рабочего тела через концевые уплотнения, повышает ремонтпригодность и надежность ГТУ в целом. Окончательная сборка и балансировка валопровода производится в заводских условиях.

Корпус турбокомпрессора сварнолитой выполнен с горизонтальным и вертикальными разрезами.

Со стороны входа в компрессор корпус жестко соединяется с опорой рамы (фиксипункт корпуса). Со стороны турбины (в районе расположения направляющего аппарата 4-ой ступени) корпус опирается на раму посредством качающихся опор. Выходная часть корпуса турбины посредством вертикальных стоек опирается на опоры фундамента. Корпус центруется относительно рамы осевыми шпонками.

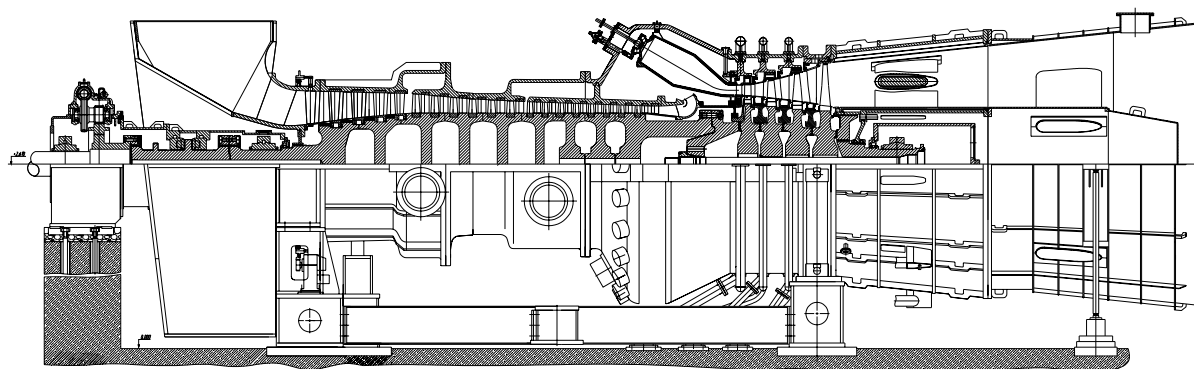


Рис. 1. Продольный разрез ГТЭ-115М

Рама устанавливается на две закрепленные на фундаменте плиты. Опора подшипника генератора устанавливается на третьей плите. На плитах турбокомпрессора и на плите опоры подшипника генератора имеются продольные и поперечные шпонки, фиксирующие раму и опору генератора относительно плит.

К плитам рама и опора генератора крепятся при помощи болтов. В каждой плите имеются комплекты парных клиньев и резьбовые отверстия для болтов, которыми плиты выставляются в нужном положении на фундаменте. К фундаменту плиты крепятся анкерными шпильками и бетонной заливкой.

**Компрессор** – 18-и ступенчатый; его проточная часть образована из 16-и ступенчатой проточной части компрессора ГТЭ-115 путём добавления на выходе двух ступеней, что при одновременном изменении углов установки ряда направляющих и рабочих лопаток позволило повысить параметры ГТУ, обеспечив при этом надёжную и экономичную работу агрегата. Для проекта ГТЭ-115М сотрудниками Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского (ХАИ) под руководством д.т.н. Л.Г. Бойко была выполнена модернизация компрессора газотурбинной установки ГТЭ-115 с целью повышения расхода и степени сжатия.

Входной патрубок обеспечивает радиально-осевой вход воздуха в компрессор.

Корпус компрессора сварнолитой, состоит из трех частей, образующих входной конфузор и проточную часть первых десяти ступеней компрессора. Во входной части корпуса расположены опорный подшипник № 2 и упорный подшипник валопровода. Входная часть корпуса опирается жёстко на раму. Проточную часть 11...18 ступеней компрессора образует обойма, которая крепится в силовом корпусе. Выходной диффузор компрессора обеспечивает поворот потока воздуха на 150°.

Входной направляющий аппарат выполнен с поворотными лопатками. Направляющие аппараты 1...4 ступеней выполнены в виде сварных диафрагм, остальные ступени – наборные, консольного типа. Компрессор имеет отборы: для сброса воздуха за 4 и 10 ступенями при запуске и останове ГТУ, за 3 ступенью – на

уплотнения подшипников, за 10, 11 ступенями, за рабочим колесом 18-й ступени и за компрессором – на систему охлаждения турбины.

На корпусе предусмотрены отверстия, закрываемые заглушками, для осмотра проточной части эндоскопом.

Ротор компрессора диско-барабанного типа, сварной. Для соединения ротора компрессора с ротором генератора предусмотрен промежуточный вал, на котором расположен гребень упорного подшипника. Тип лопаток компрессора – с 50 % реактивностью. Уплотнение вала – лабиринтовое.

**Турбина** – четырехступенчатая, выполнена с осевым входом и выходом. Корпус турбины состоит из четырех кольцевых частей, первая по ходу газа выполнена конусообразной и представляет собой силовой корпус камеры сгорания и корпус проточной части 1...3 ступеней турбины. В нём размещены обоймы направляющих аппаратов 1...3 ступеней турбины. Вторая часть образует силовой корпус 4-й ступени. Она опирается посредством качающихся опор на раму. Третья и четвёртая части корпуса турбины образуют выходной диффузор. Во внутренней части третьего корпуса расположен корпус первого подшипника валопровода и думмис для компенсации осевых усилий валопровода. Охлаждение корпуса, обойм и лопаток направляющих аппаратов 1 и 2 ступеней осуществляется воздухом, отбираемым за компрессором. Обоймы 3 и 4 ступеней, направляющий аппарат 3 ступени и выходная часть корпуса охлаждаются воздухом, отбираемым за 10 ступенью компрессора.

Ротор турбины сборной конструкции с центральным стяжным болтом. Между основными дисками установлены диски промежуточные, которые организуют тракт охлаждения ротора. Рабочие лопатки и диск 1 ступени охлаждаются воздухом, отбираемым после рабочего колеса 18 ступени компрессора, рабочие лопатки и диск 2 ступени турбины охлаждаются воздухом, отбираемым после 11 ступени компрессора. Диски третьей и четвёртой ступеней турбины охлаждаются воздухом, отбираемым за 10 ступенью компрессора. Уточнённые расчёты охлаждения элементов проточной части турбины выполнены сотрудниками НТУ «ХПИ» под руководством к.т.н. А.И. Тарасова. Роторы турбины и компрессора своими хвостовиками образуют жёсткое муфтовое соединение. Уплотнения вала – лабиринтовые. Продольный разрез турбины показан на рис. 2.

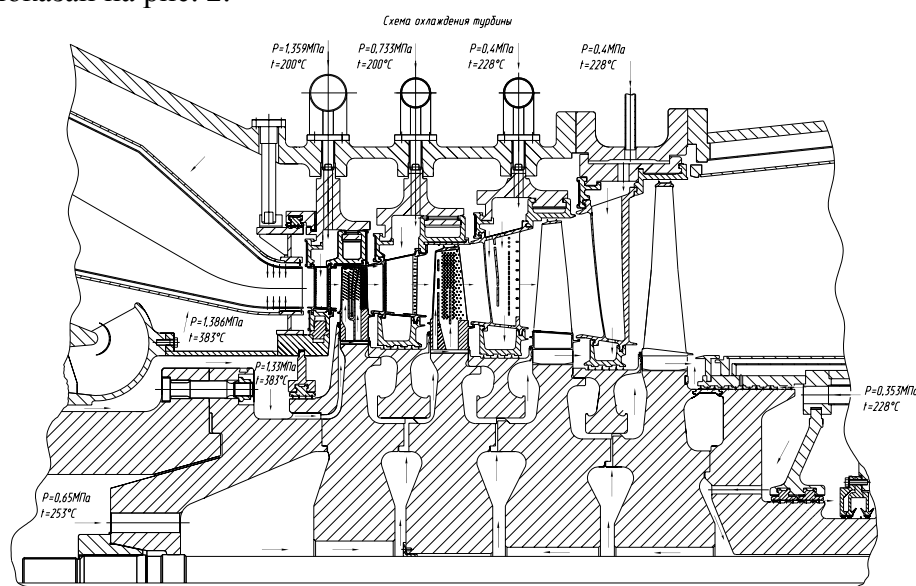


Рис. 2. Продольный разрез турбины

**Камера сгорания** – встроенная, кольцевого типа, противоточная, расположена вокруг выхлопной части компрессора. Камера сгорания состоит из пламенной трубы, фронтального устройства, 24 двухтопливных горелочных устройств. Конструктивно пламенная труба расположена под углом к оси турбокомпрессора (рис. 3).

Конструкция пламенной трубы – двухстенная. Наружная относительно зоны горения стенка образует несущий корпус с горизонтальным разъемом, который системой опор крепится к прочному корпусу турбокомпрессора. Внутренняя стенка состоит из отдельных экранов коробчатой конструкции, выполненных из жаропрочного никелевого сплава. Эффективная струйно-плёночная система охлаждения, апробированная в камерах сгорания ОАО «Турбоатом» прежних поколений, обеспечивает работоспособность конструкции.

Фронтальное устройство совместно с 24 горелочными устройствами обеспечивает подачу воздуха и топлива в зону горения, а также стабилизацию факела. Конструкция горелочных устройств обеспечивает предварительное смешение топлива и воздуха, тем самым реализуется горение с низкими выбросами  $\text{NO}_x$ .

Топливо к камере сгорания подводится системой коллекторов и трубопроводов.

Горелочное устройство обеспечивает подачу воздуха и топлива в камеру сгорания, их смешение и стабилизацию горения.

Зажигание факела в камере сгорания обеспечивается запальниками факельного типа с системой плазменного воспламенения. Контроль за горением осуществляется фотодатчиками.

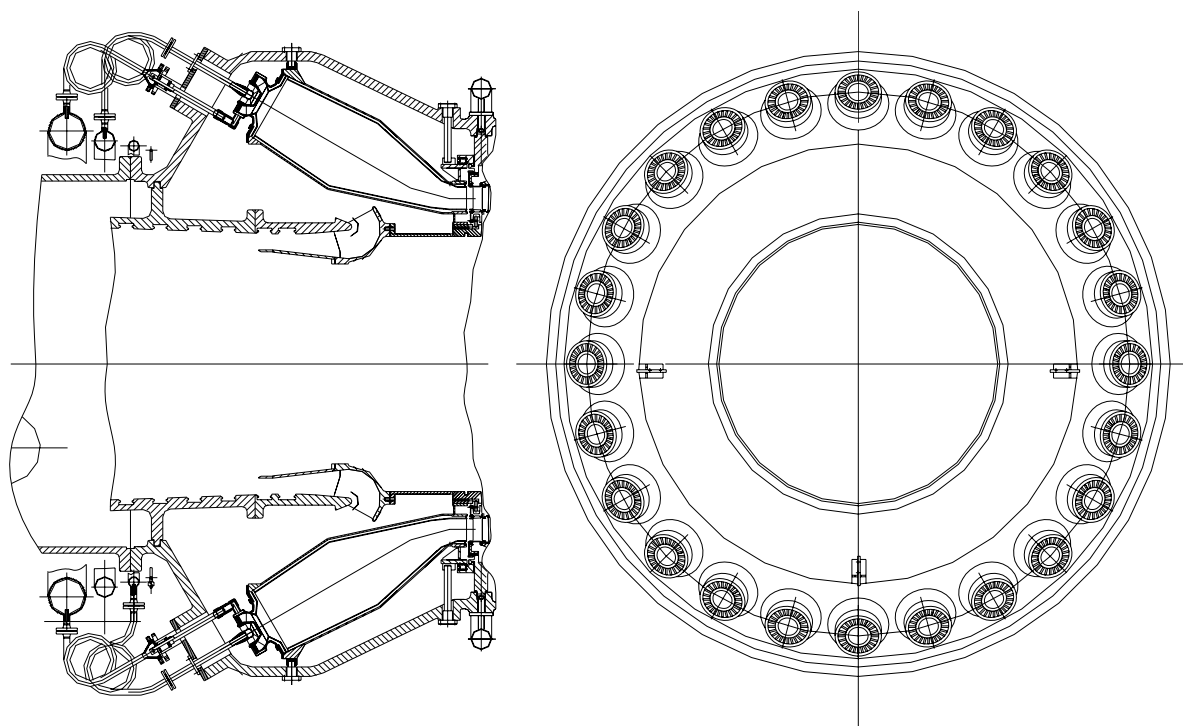


Рис. 3. Камера сгорания

### Система автоматизированного управления

Турбина оснащается системой контроля и регулирования газовой турбины (СКРГТ), которая обеспечивает: сбор и обработку информации, выработку управляющих воздействий на исполнительные механизмы системы регулирования

турбины в автоматическом режиме и по командам оператора, обмен информацией со смежными системами АСУТП энергоблока, выдачу аварийных и предупредительных сигналов в схемы сигнализации, представление оператору аналоговой и дискретной информации в объеме, достаточном для проведения анализа тепломеханического состояния газовой турбины.

СКРГТ построена на базе программно-технических средств автоматизации. Основным звеном СКРГТ является программно-технический комплекс (ПТК). Разработчиком и изготовителем ПТК является предприятие Монолит (г. Харьков). В состав ПТК СКРГТ входят: ПТК системы регулирования турбины, ПТК системы контроля тепломеханического состояния газовой турбины.

Также в состав ПТК входит пульт управления и индикации, который может быть выполнен встроенным (в виде отдельной секции ПТК), либо как автономное рабочее место оператора на базе промышленного PC-совместимого промышленного компьютера, размещенного на щите управления энергоблоком.

**ПТК системы контроля** тепломеханического состояния обеспечивает контроль следующих параметров турбины: температуру и давление воздуха перед и за компрессором, температуру и давление продуктов сгорания перед и за турбиной, температуру, давление и расход топлива, линейные перемещения (осевой сдвиг ротора, относительное расширение ротора, тепловое расширение корпуса), частоту вращения ротора, вибрацию опор подшипников турбины и генератора, температуру металла корпуса компрессора и турбины, температуру баббита подшипников.

В состав ПТК системы контроля тепломеханического состояния турбины входят: микропроцессорный шкаф, датчики, устанавливаемые на турбине, измерительные преобразователи, устанавливаемые рядом с турбиной, комплект кабельных связей.

**Система автоматизированная регулирования и защиты (САР ГТУ)** – электрогидравлическая (ЭГСР) с электромеханическими преобразователями (ЭМП) и топливными регулирующими клапанами газа и жидкого топлива, управляемыми непосредственно электромеханическими преобразователями.

В состав системы входят: узлы и механизмы, арматура, маслопроводы, контрольно-измерительная аппаратура, программно-технический комплекс.

ЭГСР обеспечивает управление регулирующими клапанами подачи топлива (КР), антипомпажными клапанами (АПК), входным направляющим аппаратом (ВНА) в пусковых, эксплуатационных и аварийных режимах работы установки.

Основными функциями ЭГСР являются: опробование ГТУ к работе на остановленной турбине, автоматизация пуска и планового останова, поддержание заданного уровня частоты вращения в режиме разворота, автоматизация синхронизации турбогенератора, плавное изменение мощности по команде оператора при работе под нагрузкой и поддержание ее на заданном уровне, вывод ГТУ на режим холостого хода при сбросе нагрузки, защитные мероприятия при аварийных ситуациях, диагностику систем.