

УДК 621.438

С.А. КАЧАН, к. т. н., доцент (БНТУ)  
г. Минск

## СОВРЕМЕННЫЕ ПАРОГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES

Компания Mitsubishi Heavy Industries (MHI) является одним из мировых лидеров в производстве газотурбинных и парогазовых установок (ГТУ и ПГУ соответственно). С 2004 года компания участвует в национальном проекте Японии «Разработка технологии сверхвысокотемпературных компонентов газовой турбины класса 1700°C». Отметим, что повышение начальной температуры газов является важнейшим условием увеличения эффективности производства электроэнергии с использованием парогазовых технологий (рисунок 1) [1].

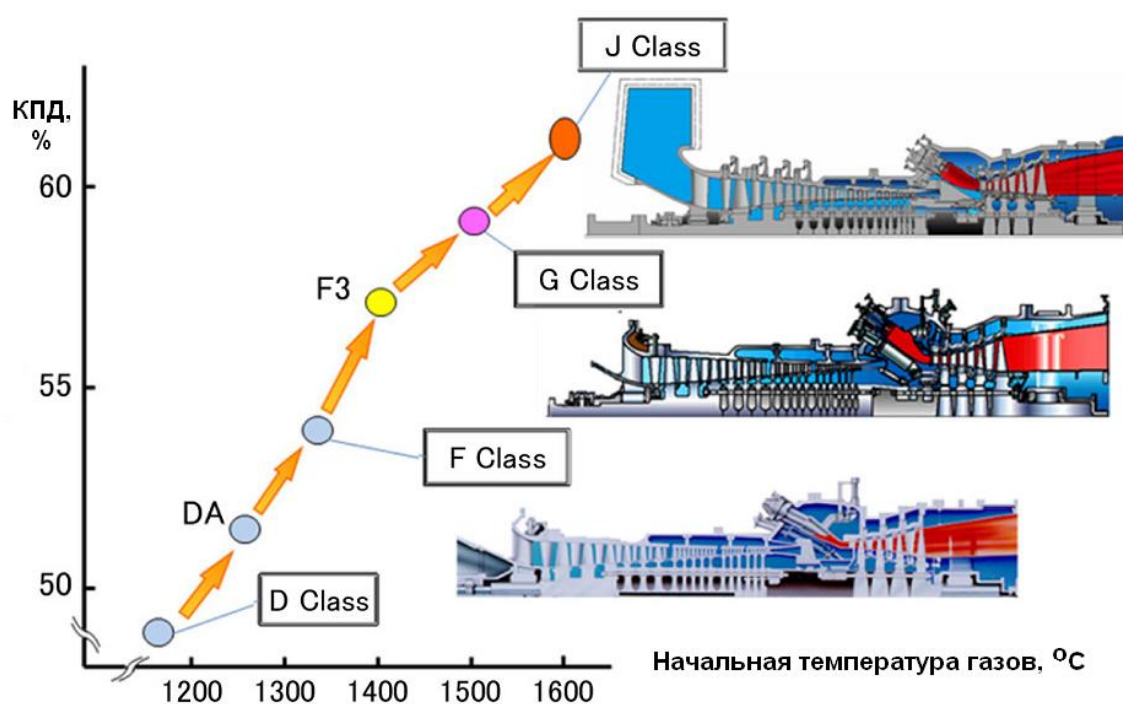


Рисунок 1. История развития ГТУ компании MHI

В результате разработок в 2011 году MHI создала ГТУ M501J частотой 60 Гц с рекордной температурой газов на входе в турбину 1600°C, что обеспечило достижение КПД комбинированного цикла около 61,5%.

Рассмотрим некоторые характеристики разработанных позже высокотемпературных ГТУ MHI частотой 50 Гц: усовершенствованной высокотемпературной серии M701J и модернизированной серии M701F5 [2]. Основные показатели таких ГТУ, а также ПГУ, построенных на их основе, приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Основные показатели современных ГТУ МНІ частотой 50 Гц и ПГУ  
на их основе при условиях ISO и работе установок на природном газе

Показатель, размерность	Тип ГТУ			
	M701F	M701J	M701JAC (2015)	M701JAC (2018)
ГТУ				
Мощность, МВт	385	478	574	448
КПД, % (LHV*)	41,9	42,3	43,4	44,0
Расход выхлопных газов, кг/с	748	896	1 024	765
Температура выхлопных газов, °C	630	630	646	663
Выбросы:				
- NO <sub>x</sub> , 15% O <sub>2</sub>	25	25	25	25
- CO, 15% O <sub>2</sub>	10	9	9	9
Минимальная нагрузка, %	45	50	50	50
Скорость повышения нагрузки, МВт/мин	38	58	66	53
Время пуска, мин	30	30	30	30
ПГУ				
Мощность, МВт				
- моноблок 1:1	566	701	840	650
- дубль-блок 2:1	1135			
КПД, % (LHV)				
- моноблок 1:1	62,0	62,3	> 64,0	> 64,0
- дубль-блок 2:1	62,2			
Время пуска, мин	45			
* низшая теплота сгорания топлива				

Конструктивные особенности ГТУ МНІ серии «F» и «J» схожи. В основе их устройства лежит базовая конструкция, принятая еще в начале 1970-х годов и имеющая опыт эксплуатации не менее 40 лет. Основные ее особенности заключаются в следующем [3]:

— Используется одновалый двухпорный ротор с приводом генератора на холодной стороне компрессора. Это снижает влияние теплового расширения на центровку установки и устраняет необходимость в гибкой муфте.

— Конструкция ротора имеет болтовые соединения дисков с моментными штифтами в секции компрессора и муфтами CURVIC в секции турбины, что необходимо для обеспечения стабильной передачи крутящего момента. Осевой выхлоп газов из турбины облегчает использование их теплоты в схемах установок комбинированного цикла. Корпус ГТУ имеет горизонтальный разъем, что облегчает замену лопаток на площадке без демонтажа ротора.

Отметим, что M701J частотой 50 Гц является масштабированной версией модели M501J частотой 60 Гц и разработана с применением концепции полного масштабного проектирования с коэффициентом масштабирования, который равен обратному соотношению скоростей вращения (рисунок 2) [1]. То есть при размере M701J, взятом в 1,2-кратном масштабе от размера M501J, характеристики (напряжение, температура и другие) каждой детали M701J сохраняются такими же, как у M501J.

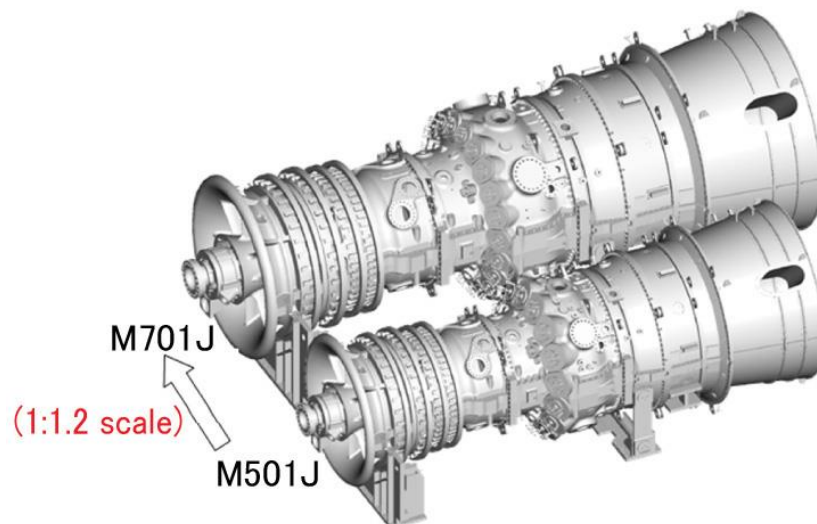


Рисунок 1. Концепция масштабирования, примененная в M701J

ГТУ M701J имеет на входе в сопла газовой турбины температуру, равную  $1600^{\circ}\text{C}$ , и электрический КПД выше 42% (см. таблица 1). M701F5 — не такой высокотемпературный двигатель, как M701J. Однако работает он при достаточно высокой начальной температуре (около  $1500^{\circ}\text{C}$ ) и имеет КПД, близкий к 42% (таблица 1). У M701F5 и тем более у M701J весьма высокая температура газов на выходе газовой турбины; она составляет более  $630^{\circ}\text{C}$ . Это позволяет получить достаточно высокую температуру пара, получаемого в котле-утилизаторе, и построить высокоэкономичную ПГУ.

К примеру, ГТУ M701J была разработана исключительно для комбинированного цикла, в котором достигается КПД выше 62%. Несмотря на то, что ГТУ M701F5 предназначена в первую очередь для применения в составе ПГУ, эта модель также используется для приложений простого цикла и когенерации. Отметим при этом, что моноблоки ПГУ 1:1 на базе M701J и M701F5 имеют выходную мощность, эквивалентную мощности дубль-блоков ПГУ 2:1, построенных на базе ГТУ прошлых поколений и имеющих меньшие мощности.

ГТУ M701F5 основана на базовой конструкции F4 и включает в себя некоторые технологии класса J. По сравнению с M701F4, модернизация M701F5 дает примерно на 11% большую мощность и несколько более высокий КПД простого цикла. Соответственно, ПГУ на базе модернизации F5 имеет большую выходную мощность и лучшую эффективность по сравнению с версией F4.

ГТУ M701F5 и M701J включают четырехступенчатую газовую турбину и осевой компрессор (15-ступенчатый для M701J и 17-ступенчатый для M701F).

Конструкция компрессора оптимизирована для достижения максимального повышения давления на ступень и обеспечения высокого КПД; это достигается за счет использования улучшенной трехмерной конструкции лопаток.

Рассматриваемые ПГУ МНІ разработаны для удовлетворения современных требований по маневренности, предъявляемых к установкам, работающим на органическом топливе (в том числе выполнения циклов пуска-останова, глубокой разгрузки установок и высокой скорости изменения их мощности (см. таблицу 1)).

Для регулирования расхода воздуха через компрессор применяются поворотные лопатки входного направляющего аппарата, а также поворотные направляющие лопатки (VGV) первых трех ступеней компрессора. Снижение расхода рабочего тела через ГТУ позволяет поддерживать относительно высокую температуру выхлопных газов при частичной нагрузке. Это, помимо обеспечения более широкого регулировочного диапазона за счет более глубокой разгрузки, также дает ряд других преимуществ: большую скорость изменения нагрузки, более легкий контроль пуска-останова, повышение эффективности подстроенного паротурбинного цикла при пониженной мощности. Так, можно снизить нагрузку ПГУ на базе М701J до 50% номинальной — и при этом работать с достаточно высоким КПД (близким к 55%).

Газовые турбины полностью охлаждаются воздухом, включая рабочие лопатки последней ступени. На первые три ступени нанесены высокотемпературные защитные покрытия. Комбинация керамических термобарьерных покрытий (ТВС) и высокоэффективного пленочного охлаждения обеспечивает долгий срок службы компонентов при высоких температурах. Отметим, что в условиях повышения начальной температуры газов на 100°C около 50°C этого повышения определяется усовершенствованной технологией охлаждения турбины и ещё около 50°C — усовершенствованием термобарьерного покрытия.

В качестве материала для лопаток используется MGA1400 (Mitsubishi Gas Turbine Alloy 1400; для рабочих лопаток) и MGA2400 (для сопловых лопаток), причем рабочие лопатки первых трех рядов турбины получают методом направленной кристаллизации для повышения их жаропрочности.

Повышение начальной температуры газов потребовало применение специальных технических решений для снижения выбросов NO<sub>x</sub>. В камере сгорания ГТУ серии J установлены улучшенные топливные форсунки, обеспечивающие более однородное смешивание топлива и воздуха. Это необходимо для оптимизации местных температур пламени в зоне горения и снижения пиковой температуры. Выбросы NO<sub>x</sub> при базовой нагрузке для серии J эквивалентны текущему уровню для существующих серий F и G, то есть 25 ppm NO<sub>x</sub> или менее при сжигании природного газа (см. таблицу 1). В камере сгорания М701F5 применяется воздушное охлаждение.

В М701J используется технология парового охлаждения элементов камеры сгорания. Пар является более эффективным теплоносителем для охлаждения, чем воздух; его давление повышается не компрессором, а насосом в жидком состоянии с меньшими затратами энергии. К тому же он не смешивается с потоком горячих газов и не разбавляет их, как это делает воздух. При этом в ГТУ

серии M701JAC вместо парового охлаждения для камеры сгорания используется воздушное. Обладая характеристиками, эквивалентными ГТУ серии M701J, ГТУ серии M701JAC обеспечивают более высокую маневренность, включая более короткое время пуска и независимость работы ГТУ от источника пара.

В заключение отметим, что ГТУ типа M701F введена в коммерческую эксплуатацию в 2015 году на электростанции Shin-Sendai компании Tohoku Electric Power Co., Inc, а ГТУ M701J – в 2016 году на электростанции Kawasaki компании TEPCO Fuel & Power, Inc [3].

#### Список литературы:

1. Development of 1600°C-Class High-efficiency Gas Turbine for Power Generation Applying J-Type Technology / Masanori Yuri, Junichiro Masada, Keizo Tsukagoshi, Eisaku Ito, Satoshi Hada // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 50 No. 3 (September 2013).
2. Farmer, Robert. M701F5 shares J-class engineering for 61% combined cycle efficiency // Gas Turbine World. 2013. Vol. 43, №3. P. 28 – 31.
3. Mitsubishi Power. Home – Products – Gas Turbines // <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/>