

УДК 621.165

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

## ОПЫТ GENERAL ELECTRIC В РАЗРАБОТКЕ ПАРОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ ПГУ

GE Power Systems является одним из мировых лидеров по производству оборудования для энергетики, в том числе газотурбинных (ГТУ) и паротурбинных (ПТУ) установок для работы в комбинированном парогазовом цикле. General Electric предлагает полную линейку паровых турбин для парогазовых установок (ПГУ), предназначенных для работе на паре, получаемом в одном или нескольких котлах-утилизаторах за счет теплоты отработавших газов ГТУ.

В маркировке парогазовых установок STAG™ (Steam And Gas), указываются ее основные характеристики: первая цифра - это количество ГТУ на одну паровую турбину, третья, четвертая и пятая - это маркировка модели ГТУ. Например, в состав парогазовой установки STAG 207FA входят две ГТУ модели 7FA и одна паротурбинная установка.

Если в состав ПГУ входит одна газовая и одна паровая турбины, дополнительно указывается исполнение ПГУ: многовальная (MS) или одновальная (SS). Например, маркировка STAG 109E MS показывает, что ПГУ двухвальная с двумя генераторами - для ГТУ типа 9E и паровой турбины.

В ПГУ небольшой мощности на базе низкотемпературных ГТУ типа 6B, 7EA и 9E применяются паровые циклы одного или нескольких давлений без промпрегрева: 59 бар для паровых турбин мощностью от 40 МВт до 60 МВт и 86 бар - мощностью более 60 МВт (рисунок 1) [1, 2].

Применение осевого выхлопа для однопоточных турбин небольшой мощности позволяет снизить абсолютное давление в конденсаторе, увеличить располагаемый теплоперепад части низкого давления (НД) и общую экономичность паровой турбины (рисунок 2) [1, 2].

Осевое (или боковое) расположения конденсатора позволяет разместить все оборудование ПГУ на нулевой отметке главного корпуса и отказаться от подвального помещения.

Размещение газовой и паровой турбин на одном уровне также дает возможность перейти на одновальную схему ПГУ с единым для ГТУ и паровой турбины электрогенератором (ЭГ), которая получает все большее распространение в мировой энергетике в последнее время. Отметим, что именно General Electric можно считать пионером по внедрению одноваль-

ных ПГУ: первая одновальная ПГУ ее производства была пущена в эксплуатацию еще в 1968 году на ТЭС Wolverine (штат Мичиган, США) [3].

Отсутствие системы регенеративного подогрева воды в цикле, связанное с необходимостью глубокой утилизации тепла отработавших в ГТУ газов в котлах-утилизаторах и наличие нескольких контуров пара приводит к увеличенному расходу пара в часть НД паровых турбин ПГУ.

Применение лопаток последней ступени длиной до 1067 мм, позволяет производить компактные турбины НРД (High Power Density™) с минимальным количеством корпусов, при этом обеспечивая достаточную площадь выхлопа и оптимальную тепловую эффективность (рисунок 2, 3).

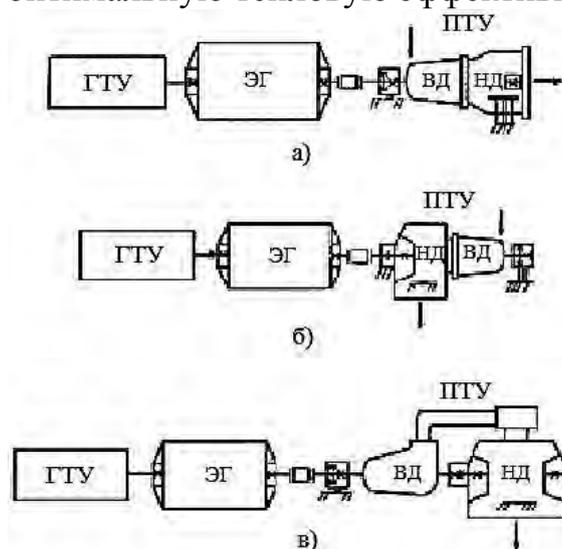


Рисунок 1. Одновальные ПГУ STAG без промперегрева: одноцилиндровая паровая турбина с осевым выхлопом (а), одноцилиндровая паровая турбина с одним выхлопом вниз (б), двухцилиндровая паровая турбина с двойным выхлопом вниз (в)

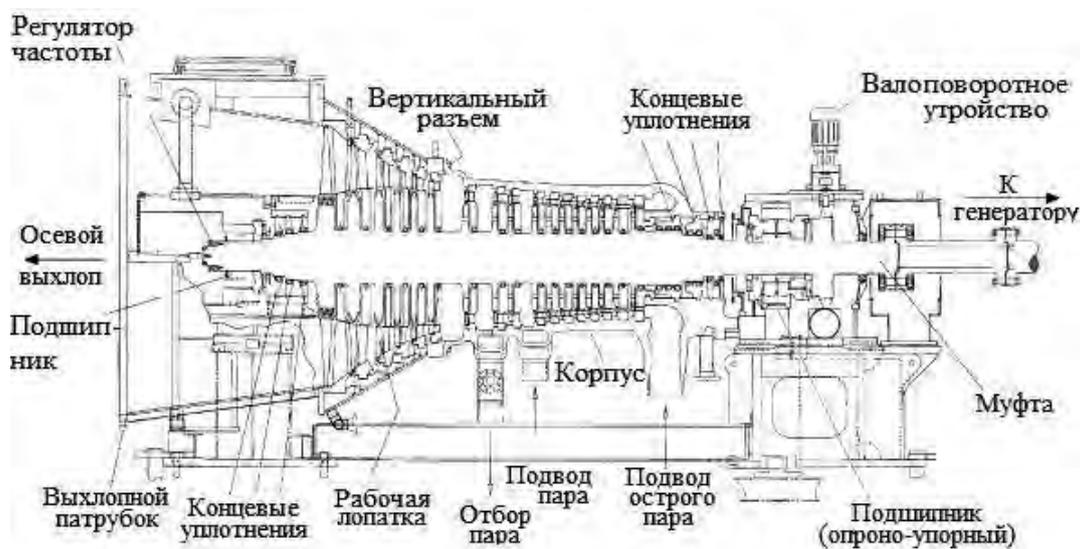


Рисунок 2. Одноцилиндровая турбина без промперегрева с аксиальным выхлопом

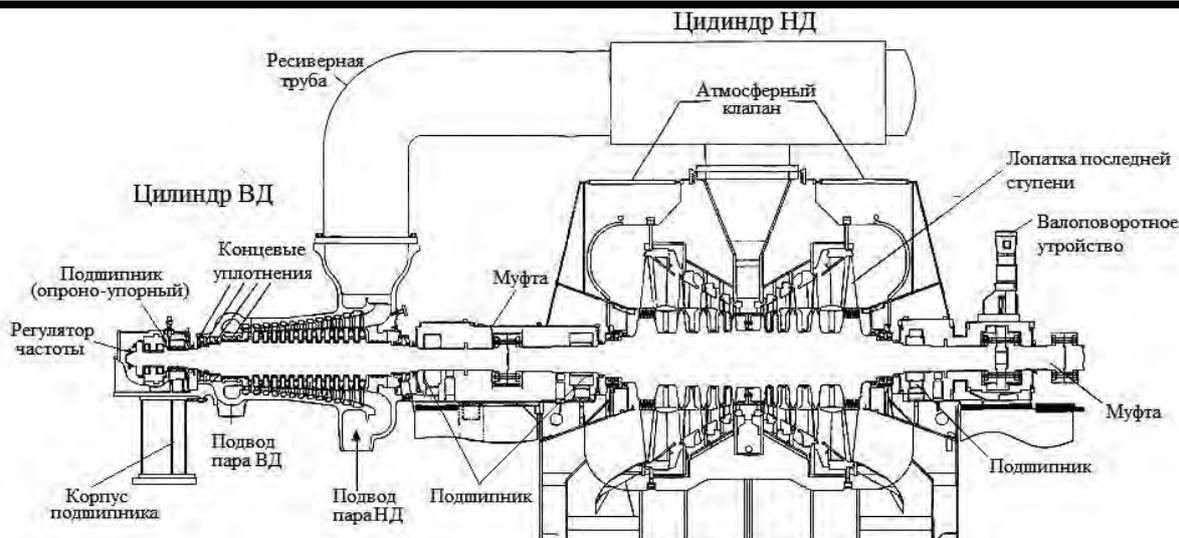


Рисунок 3. Двухцилиндровая турбина без промперегрева с двойным выхлопом вниз

В ПГУ на базе высокотемпературных ГТУ типа 6FA, 7EC, 7FA, 9EC, 9FA 7G, 7H, 9G и 9H используется вторичный (промежуточный) перегрев пара. При мощности паровой турбины 125 МВт и выше оптимальным являются начальные параметры 124 бар и 538°C с промперегревом до 538°C (рисунки 4, 5) [1, 2]. При начальном давлении 165 бар цилиндры высокого давления (ВД) применяются двухстенными.

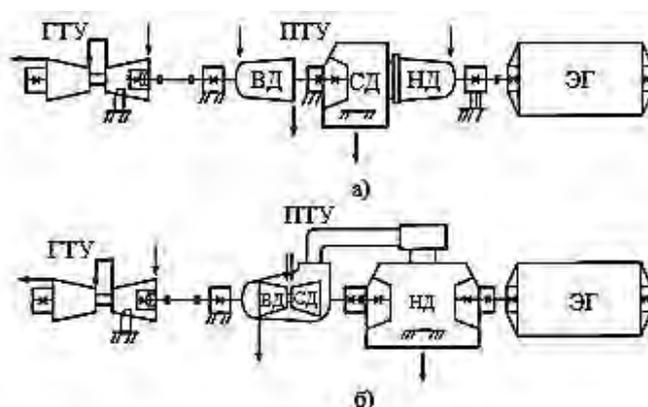


Рисунок 4. Одновальные ПГУ STAG с промперегревом: с одним выхлопом вниз (а), с двойным выхлопом вниз (б)

Парораспределение паровых турбин – дроссельное, поскольку в составе ПГУ они работают при скользящем давлении генерируемого в котле-утилизаторе пара.

General Electric последовательно проводит оптимизацию и повышение эффективности проточной части паровых турбин своего производства. Улучшением проекта модернизации сопловых и рабочих лопаток Advanced Design Steam Path стал проект Dense Pack с увеличенным числом ступеней, сниженным диаметром дисков ротора и увеличенной высотой лопаточного

аппарата (рисунок 6) [4]. Концепция Dense Pack позволяет повысить КПД проточной части, снизить протечки пара через концевые уплотнения. Разработка плазменного напыления и диффузионных покрытий, увеличение зазора между сопловыми и рабочими лопатками позволили снизить эрозионный их износ. Дополнительно оригинальная двухпоточная сопловая коробка замена на обычную однопоточную (рисунок 6).

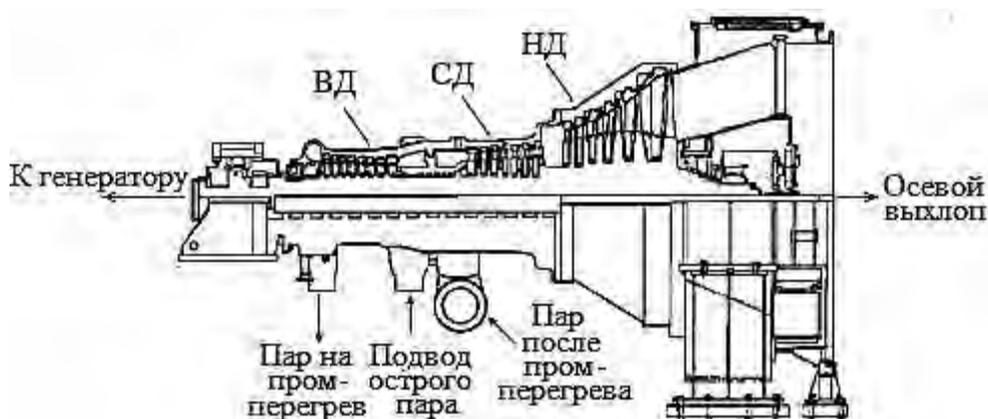


Рисунок 5. Одноцилиндровая паровая турбина с промперегревом и осевым выхлопом

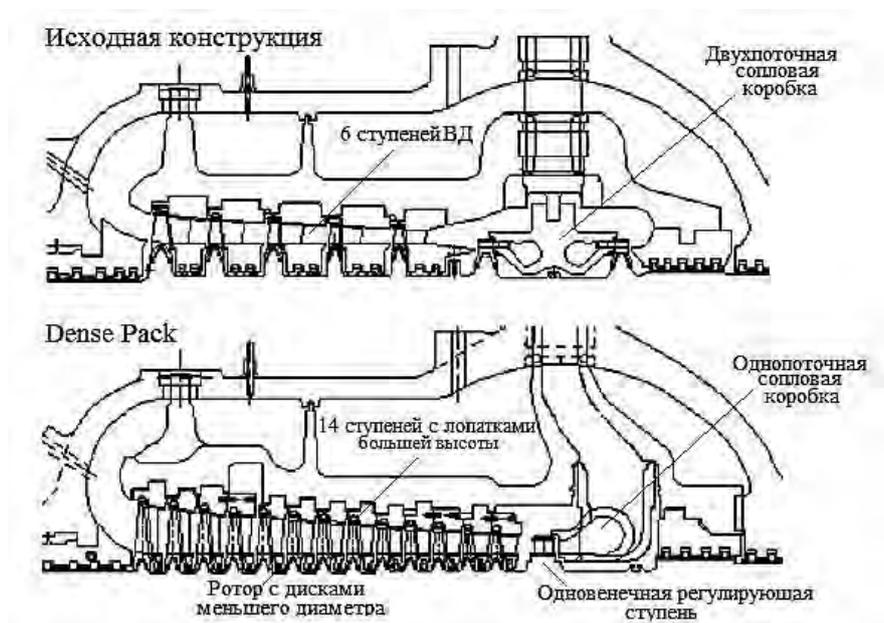


Рисунок 6. Оптимизированная проточная часть Dense Pack

В трехконтурных ПГУ S107H / S109H с ГТУ типа 7H и 9H используется комбинированное паро-воздушное охлаждение высокотемпературных элементов газовой турбины (рисунок 7). Для охлаждения сопловых лопаток 1-й и 2-й ступеней газовой турбины забирается часть пара с выхлопа цилиндра высокого давления (ВД) паровой турбины. Пройдя замкнутый

контур охлаждения ГТУ, этот пар подмешивается к потоку пара после промпрегрева, подаваемого в цилиндр среднего давления (СД). Так паровой контур охлаждения ГТУ работает параллельно с промежуточным пароперегревателем и связывает газовый и паровой циклы. Отметим, что пуск ГТУ происходит при использовании только воздушного охлаждения, но уже на переходных режимах подключается паровое. Для повышения эффективности схемы воздух, отбираемый из компрессора для охлаждения камеры сгорания и лопаток газовой турбины, проходит теплообменник, где он охлаждается питательной водой контура СД. Теплота питательной воды контура СД используется для подогрева топлива ГТУ (природного газа).

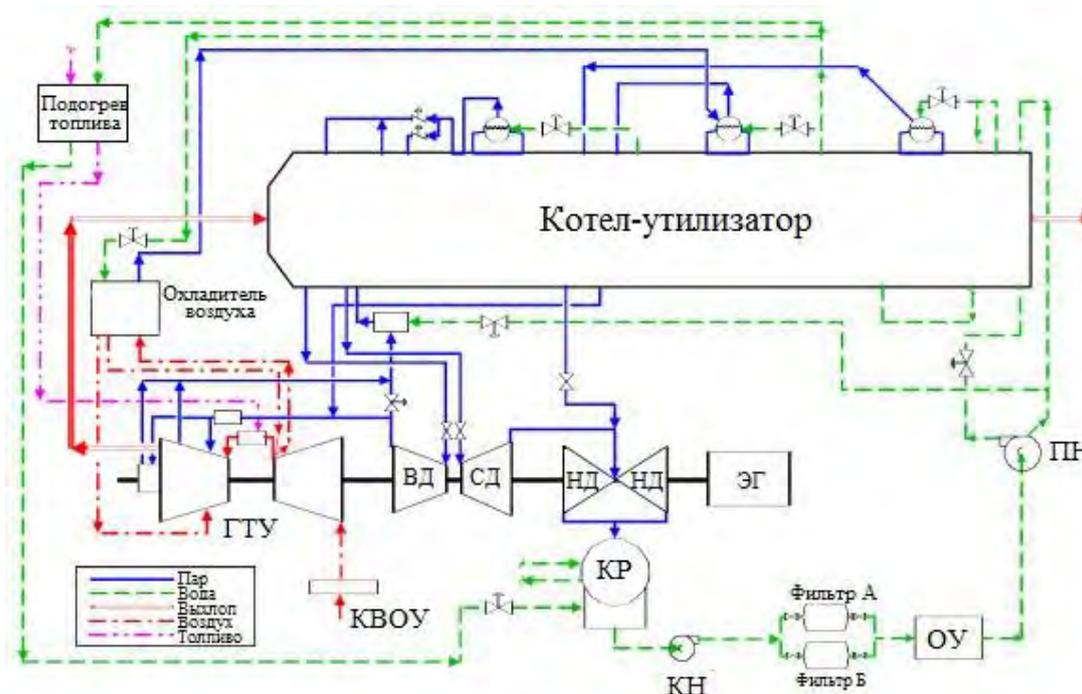


Рисунок 7. Схема ПГУ S107H / S109H

Описанные решения General Electric обеспечивают высокую эффективность и надежность работы паротурбинных установок ПГУ.

### Список литературы

1. Boss M. Steam Turbines for STAG™ Combined-Cycle Power Systems // GE Power Systems. - Schenectady, NY GER-3582E.
2. Chase, D.L., Kehoe, P.T. GE Combined-Cycle Product Line and Performance // GE Power Systems Schenectady, NY GE Power Systems. - GER-3574G (10/00).
3. General Electric Power / <http://www.gepower.com/home/index.htm>.
4. Lesiuk J. F. Steam Turbine Uprates // GE Power Systems. - Atlanta, GA. - GER-4199 (10/00).