

# Газотурбинная установка Siemens SGT-750

## на газопроводе «Северный поток»



### М. С. Ташкинов – ООО «Сименс»

В г. Любмин (Германия) запущена в эксплуатацию первая промышленная газотурбинная установка SGT-750 производства компании Siemens. Она играет ключевую роль в работе газопровода «Северный поток» – связующего звена, по которому газ поступает из России в Европу.

#### In brief

#### Siemens SGT-750 gas turbine power plant for Nord Stream natural gas pipeline.

The world's first SGT-750 industrial gas turbine from Siemens has started operation in Lubmin, Germany, and forms a key part in the operation of the Nord Stream pipeline.

The Lubmin CHP plant delivers 38 MWe and 50 MWth. It achieves a total efficiency of some 90 per cent, where 40 per cent of the SGT-750's energy input is used for power generation and 50 per cent for gas heating.

**В** апреле 2010 года международный консорциум энергетических компаний приступил к строительству газопровода «Северный поток». Двухниточный газопровод протяженностью 1224 км соединяет российский город Выборг и Балтийское побережье Германии. Он пересекает территориальные воды России, Дании и Германии и выходит на сушу в немецком городе Любмин на Балтийском побережье.

В октябре 2012 года газопровод уже начал работать на полную мощность, поставляя природный газ с крупнейшего российского месторождения «Южно-Русское» на энергетический рынок Европы, где спрос на него постоянно растет.

Природный газ играет ключевую роль на европейском энергетическом рынке. Электростанции, работающие на природном газе, обеспечивают гибкое и надежное резервное электроснаб-

жение для непостоянных возобновляемых источников, таких как солнечная и ветровая энергетика. По прогнозам, в связи с ростом мощностей на возобновляемых источниках в европейских странах будут широко востребованы электростанции на природном газе. Однако безопасность и надежность поставок природного газа продолжают оставаться предметом беспокойства в Европе.

Как полагают в консорциуме «Северный поток» (Nord Stream), куда входят ОАО «Газпром», компании Wintershall Holding GmbH (дочерняя фирма BASF), E.On Ruhrgas AG, N.V. Nederlandse Gasunie и GDF Suez, морской газопровод будет играть ключевую роль в обеспечении энергетической безопасности стран Европы. Пропускная способность газопровода позволит ежегодно транспортировать 55 млрд м<sup>3</sup> газа в Европу на протяжении, по меньшей мере, 50 лет.

## Тепловая энергия для газопровода

Береговая станция (БС) в г. Любмин играет очень важную роль в составе инфраструктуры магистрального газопровода «Северный поток». Ее задача – принять газ после прохождения через Балтийское море и подготовить его к дальнейшей транспортировке потребителям европейских стран по газопроводам OPAL и NEL. Ключевым этапом данного процесса является подогрев газа, температура которого после снижения давления с 11 МПа до 10,2 МПа (необходимого значения для дальнейшей газопроводной системы) также понижается.

Для подогрева природного газа на таком объекте естественным решением было бы применение газовых котлов, тем более что береговая станция «Любмин» располагает тремя такими котлами тепловой мощностью по 40 МВт. Однако чтобы достичь суммарной максимальной потребности 160 МВт, потребовался бы четвертый котел либо альтернативный источник тепловой энергии.

Компания Gascade – независимый оператор, осуществляющий эксплуатацию БС и газопроводов NEL и OPAL, – начала поиск иных решений для покрытия пиковых нагрузок тепловой энергии. Одним из вариантов было использование тепла выхлопных газов ГТУ.

В это время Siemens разработала опытный образец газовой турбины SGT-750 и начала переговоры с компанией Gascade о строительстве ГТУ-ТЭС, которая сможет не только обеспечивать тепло БС «Любмин», но также поставлять электроэнергию в местную сеть. Вскоре было достигнуто соглашение, что ГТУ-ТЭС на базе SGT-750 является самым верным решением для БС, и в декабре 2011 года компания Siemens получила первый заказ на свою самую современную газовую турбину. Схема комбинированного производства тепла и электроэнергии на БС «Любмин» представлена на рис. 1.

### SGT-750 в линейке газовых турбин Siemens

ГТУ SGT-750 была разработана компанией Siemens для заполнения ниши в мощностном диапазоне промышленных газовых турбин 5...50 МВт. Задачей компании было создание турбины, которая могла бы применяться в составе пиковых и парогазовых электростанций, ГТУ-ТЭС, а также в качестве механического привода в нефтегазовом секторе. И при этом конкурировать с авиапроизводными газовыми турбинами в своем классе мощности.



Результатом научных поисков и разработок стала двухвальная промышленная газовая турбина электрической мощностью 37 МВт, которая заполняет нишу между SGT-700 (32 МВт) и SGT-800 (47 и 50 МВт). Новая турбина имеет электрический КПД 39,5%, что соответствует значению КПД на валу 40,7%. ГТУ рассчитана на продолжительное время работы и увеличенные интервалы между обслуживанием.

Благодаря конструкции SGT-750 обслуживание ГТУ возможно на месте эксплуатации, обеспечен удобный доступ для проведения инспекции бороскопом, а также быстрая замена газогенератора. Кроме того, турбину компрессора, имеющую болтовое соединение с компрессором, можно легко заменить как отдельный модуль. Время простоя при плановом техническом обслуживании сокращено до минимума:

ГТУ SGT-750 поставлена на станцию в полной заводской готовности и размещена в звукотеплоизолированном модуле со всеми необходимыми системами жизнеобеспечения

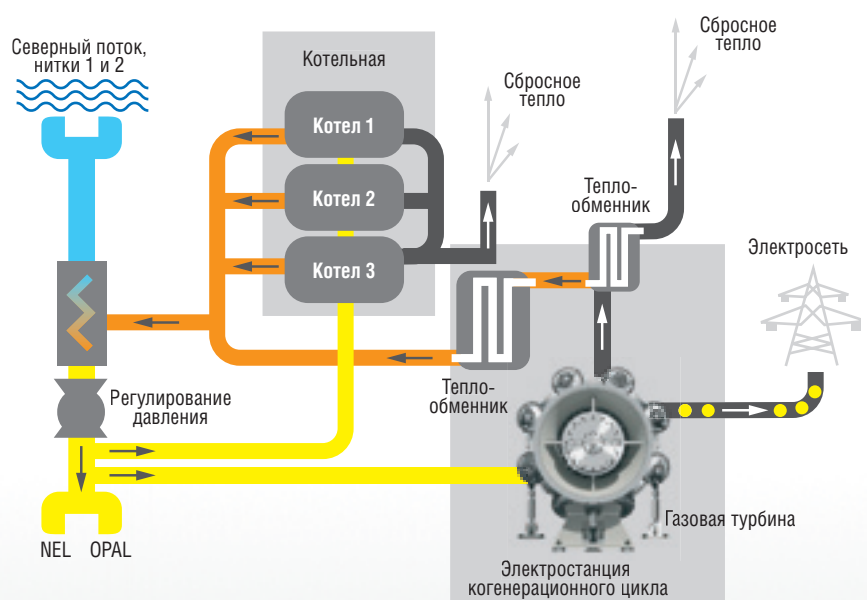
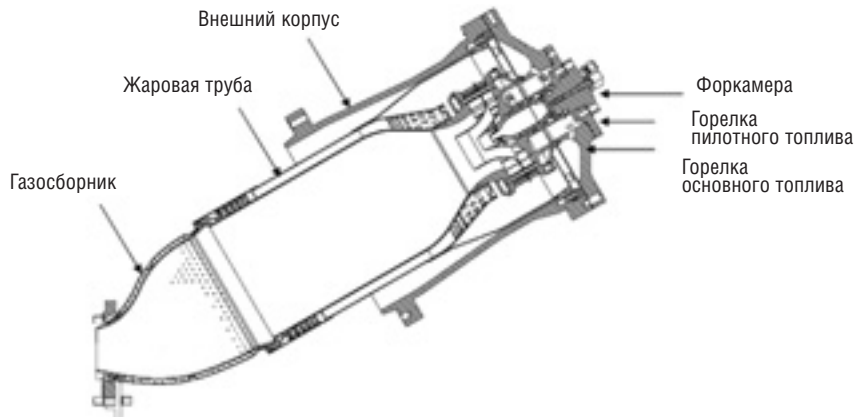


Рис. 1. Схема комбинированного производства тепла и электроэнергии на БС «Любмин» (Германия)

Подогретый природный газ      Сбросное тепло      Электрический ток  
Тепло      Холодный природный газ





**Рис. 2.**  
Низкоэмиссионная  
камера сгорания  
4-го поколения  
обеспечивает  
уровень  $\text{NO}_x$  15 ppmv

согласно данным Siemens, оно составляет всего 17 дней за 17 лет эксплуатации.

Максимальная надежность обеспечивается за счет использования апробированных компонентов других газовых турбин из линейки Siemens, что стало важным фактором при выборе ГТУ для проекта в Любимине. Горелки камеры сгорания, например, разработаны на основе технологии, успешно зарекомендовавшей себя в эксплуатации. Технология изготовления ротора SGT-750 очень схожа с технологией сварки, применяемой в SGT-800.

Газовая турбина имеет единый жесткий ротор компрессора, сваренный с применением электронно-лучевой технологии, для обеспечения стабильного и плавного запуска из горячего или холодного состояния. Пазы для осевого крепления лопаток позволяют производить их замену без демонтажа ротора.

Газовая турбина имеет 13-ступенчатый осевой компрессор со степенью повышения давления почти 24:1, что является самым высоким показателем среди модельного ряда ГТУ Siemens. Корпус компрессора имеет горизонтальный разъем. Корпуса других элементов двигателя представляют собой неразъемные цилиндрические обечайки, которые соединяются между собой в вертикальной плоскости. Это решение обеспечивает цилиндрическую форму статора горячей части и сводит к минимуму рабочие зазоры и аэродинамические потери в газозвуковом тракте. Каждый узел газогенератора можно снять как единый модуль, что упрощает доступ и ускоряет техническое обслуживание. Воздух поступает в компрессор через входную лемнискату переднего корпуса, плавно направляющую поток в компрессор.

Регулирование диффузорности обеспечивает высокую эффективность, в то время как два регулируемых направляющих аппарата и три клапана отбора воздуха обеспечивают стабильную работу при частичных нагрузках, легкий запуск и оптимальные характеристики даже в экстремальных условиях окружающей среды.

Охлаждающий воздух для ротора, сопловых и рабочих лопаток турбины и воздух наддува уплотнений отбирается из кольцевых камер отбора, находящихся после разных ступеней и на выходе компрессора. Воздух наддува уплотнений препятствует попаданию горячих газов в корпуса подшипников и предотвращает утечку масляного тумана из них.

Перед компрессором имеется отсек, обеспечивающий возможность визуального контроля во время работы компрессора, а также электро-стартера. Легкая входная камера располагается в том же отсеке, который выполнен передвижным для удобства технического обслуживания. Компрессор также имеет лючки для инспекции бороскопом каждой ступени.

Особое внимание при разработке SGT-750, в связи с ужесточением экологических требований во всем мире, уделялось уровням эмиссии. Применение камеры сгорания с системой сухого подавления вредных выбросов (DLE) позволило минимизировать уровень выбросов  $\text{NO}_x$  (рис. 2). Высокий потенциал выхлопа ГТУ обеспечивает ее эффективность при использовании в составе электростанций когенерационного или комбинированного цикла, результатом чего является низкий расход топлива и сокращение выбросов  $\text{CO}_2$ .

Радиальная вихревая горелка имеет четыре линии подвода газового топлива: первое и второе основное топливо, пилотное и богатое пилотное топливо (RPL). Горелка RPL помогает стабилизировать пламя во время работы.

SGT-750 является двухтопливной турбиной, способной работать на природном газе и легком дистилляте. Опыт применения системы DLE в других ГТУ показывает, что новейшая камера сгорания может работать на газах различного состава. Например, на природном газе с высоким содержанием азота, полученном из истощенных скважин; газах нефтеперерабатывающих заводов; на обогащенных водородом газах и др.

Помимо снижения уровня выбросов  $\text{NO}_x$ , камера сгорания обеспечивает широкий диапазон регулирования нагрузок. Турбина может работать с нагрузкой 50 % при поддержании уровня выбросов  $\text{NO}_x$  15 ppmv. В странах, где ограничения по выбросам оксидов азота не столь строгие, существует возможность снизить нагрузку до 30 %.

Камера сгорания состоит из восьми кольцевых жаровых труб с двойными стенками с последовательным охлаждением и восьми переходных каналов с двойными стенками с параллельным охлаждением. Головки жаровых труб имеют конвективное охлаждение, где весь охлаждающий воздух используется для сжигания.

Проверка работы камеры сгорания имела очень большое значение. Процесс испытаний проходил с учетом опыта работы других ГТУ данного модельного ряда. Испытания головок жаровых труб проводились отдельно и задолго до того, как был разработан реальный двигатель. Испытания высоким давлением, которые проводились в Италии и Германии, включали испытания горелок и жаровых труб. Это позволило протестировать реальные условия работы камеры сгорания.

Испытания средним давлением проводились в Великобритании в целях оптимизации работы самой горелки и включали тестирование датчиков воспламенения и зажигания. В рамках атмосферных испытаний в Швеции была протестирована камера сгорания и проведены испытания на воспламенение, горение, а также аэродинамические испытания.

После камеры сгорания газ направляется в переходный канал и далее в газовую турбину. Модуль турбины включает двухступенчатую турбину компрессора с воздушным охлаждением и двухступенчатую неохлаждаемую силовую турбину, вращающуюся в противоположную сторону. Турбина компрессора выполнена из апробированных материалов, обеспечивая износостойкость и долговечность.

### Широкомасштабные испытания ГТУ

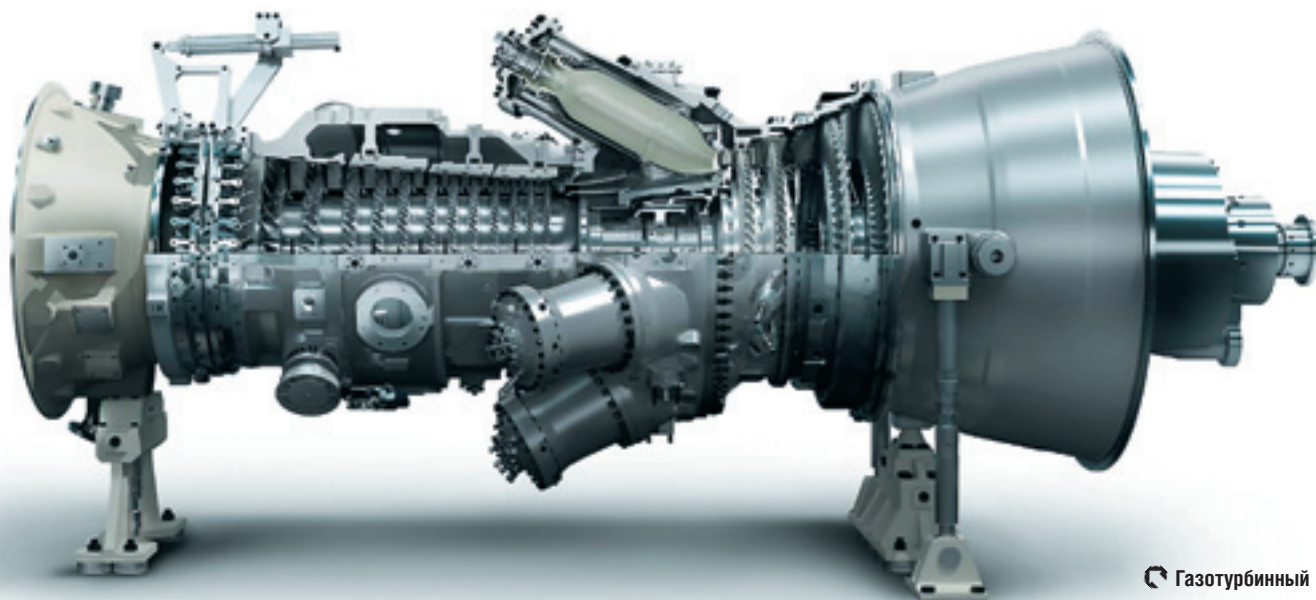
Первые два прототипа ГТУ SGT-750 были изготовлены для проведения испытаний на специально разработанном испытательном стенде в г. Финспонг (Швеция). Первый прототип содержал около 700 точек измерения, во втором прототипе их было более 3000. В процессе испытаний применялась специальная методика

с использованием термокристаллов. Около 2000 кристаллов покрывали лопатки, и двигатель выводился на полную нагрузку для снятия точного поля температуры лопаток.

Для силовой турбины (СТ) важно иметь возможность оптимизировать настройки для каждого индивидуального проекта. Поскольку ГТУ должна генерировать максимальную мощность вне зависимости от условий окружающей среды, в ней применяется свободная силовая турбина. Она представляет собой двухступенчатый высокоскоростной модуль с номинальной частотой вращения 6100 об/мин, который может использоваться как для механического привода, так и для выработки электроэнергии (совместно с понижающим редуктором). Свободная силовая турбина является хорошим решением для энергосетей, в которых требуется поддерживать мощность в случае перепадов частоты тока.

Входной направляющий аппарат СТ может устанавливаться на определенный угол в зависимости от условий эксплуатации (арктический, умеренный или тропический климат). Например, для условий тропического климата он установлен на более открытый угол. Диски турбины также имеют болтовое соединение с ротором, поэтому модуль СТ может быть легко заменен. Силовая турбина имеет высокоэффективный диффузор и установлена на сегментных подшипниках скольжения (с длительным сроком службы), смазываемых минеральным маслом.

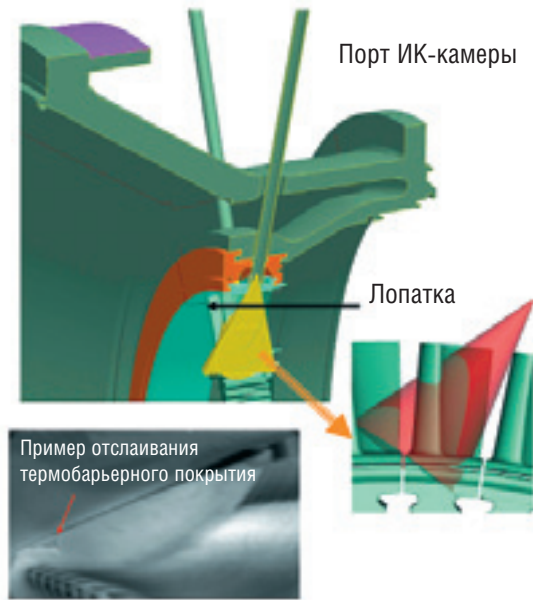
Еще одной новой разработкой для ГТУ данного класса мощности является применение специальных портов для инфракрасной камеры в целях наблюдения за лопатками первой и вто-



Газотурбинный двигатель SGT-750



➤ **Рис. 3. Чувствительная ИК-камера измеряет при работе температурное поле каждой лопатки. При обнаружении аномалий можно принять меры**



рой ступеней турбины во время эксплуатации и инспекций. Небольшие камеры (размером с теннисный мяч) способны фиксировать малейшие изменения температурного поля, и технические специалисты могут предпринимать своевременные действия в случае его неравномерности.

Использование термочувствительных камер позволяет измерять поле температур каждой лопатки (рис. 3). Эта технология, разработанная в г. Орландо (США), уже применяется в газовых турбинах большой мощности. Благодаря ей можно обнаружить дефекты еще до вскрытия турбины. Технология помогает заблаговременно подготовить план работ по техническому обслуживанию, что сокращает до минимума их продолжительность.

Предполагается, что в будущем использование таких камер будет способствовать продлению срока службы турбин и обеспечит боль-

шую гибкость интервалов технического обслуживания. Например, в случае если оператор планирует эксплуатировать ГТУ в течение дополнительных 4000 часов, показатели камер помогут принять решение на основании фактического состояния. Внедрение инфракрасных камер сократило также период НИОКР за счет ускоренных испытаний прототипа.

Данные испытания, а также предшествующий опыт работы компании Gascade с оборудованием Siemens сыграли ключевую роль при выборе турбины SGT-750 для БС «Любмин». При этом в нефтегазовой отрасли ни один компонент оборудования не приобретается без наличия реальных референций, особенно это относится к таким многомиллионным закупкам, как газовые турбины.

По условиям заключенного контракта в зону ответственности компании Siemens входила поставка, монтаж и пусконаладка газовой турбины SGT-750 совместно с генератором и вспомогательными системами, а также инфраструктура для подключения электросети. Причем время для того, чтобы обеспечить изготовление, монтаж и ввод в эксплуатацию первой ГТУ, у компании было весьма ограничено. В связи с этим группа специалистов, осуществлявших производство ГТУ в Швеции, была направлена и на площадку БС в Любмине для сопровождения монтажа, пусконаладки и испытаний. Такая «преемственность» процесса была поддержана заказчиками.

В ходе реализации проекта возникали и другие острые вопросы. Например, компания Gascade, ранее уже реализовывавшая проекты КС, не имела опыта строительства ГТУ-ТЭС с подсоединением 110 кВ в местную сеть. Разработка автоматизированной системы управле-

➤ **БС «Любмин» на берегу Балтийского моря обеспечивает подготовку природного газа для его дальнейшей транспортировки по территории Германии**



ния для такого глобального проекта была также непростой задачей.

Первоначально планировалось, что система управления объекта на базе S7/PCS 7 компании Siemens будет обрабатывать около 3000 сигналов ввода/вывода – количество, которое уже выходит за пределы ранее реализуемых объектов Gascade. Но в связи с внедрением большого объема технических средств при строительстве ГТУ–ТЭС, количество сигналов резко увеличилось, во много раз превышая первоначальное.

По сути, сейчас функционируют три системы управления: для береговой станции; для газовой турбины SGT-750; для системы утилизации тепла, выработки электроэнергии и подсоединения сети 110 кВ. Трудной задачей являлось соединение всех систем управления и разработка оптимального решения для функционирования и автоматизации с соблюдением единообразия функций всех компонентов. Поскольку береговая станция уже находилась в эксплуатации, необходимо было, чтобы системы управления, связанные с ГТУ–ТЭС, были смонтированы, интегрированы и запущены в эксплуатацию без нарушения процесса работы станции в целом.

Все КИПиА станции могут быть удаленно параметризованы (иметь обратную связь), сокращая время простоя, связанное с выходом их из строя, до минимума. Значения параметров хранятся в центральной базе данных PDM Siemens, которая является частью программного обеспечения семейства PCS 7.

### ГТУ–ТЭС на береговой станции «Любмин»

Первая газовая турбина SGT-750 впервые запущена на площадке БС «Любмин» в конце января 2013 года, однако в феврале наступившие морозы прервали строительные работы. Гарантийные испытания были проведены только в конце апреля и продемонстрировали отличные результаты: вибрация была стабильной, а показатели эффективности значительно превышали указанные в контракте.


В мае было проведено 72-часовое испытание – важнейший этап как для заказчика, так и для компании Siemens. Во время испытания газовая турбина работала на различных режимах с целью проверки эксплуатационной гибкости, подтвердив все заявленные параметры.


ГТУ–ТЭС в Любмине производит 38 МВт электрической и 50 МВт тепловой энергии. Общий КПД достигает почти 90 %, где 40 % подводимой энергии используется для производства электроэнергии и 50 % – для нагрева газа.

Важной проблемой, которую нужно было решить при реализации проекта, – регулирование выдачи тепла и электроэнергии в соответствии с сезонными расходами и температурными режимами газопровода «Северный поток». В связи с отсутствием готового решения и невозможностью применения имитационных моделей, многие мероприятия должны были выполняться итерационным путем, без нарушения работы станции.

### Перспективы SGT-750 на энергетическом рынке

Универсальность газовой турбины SGT-750 и успешный проект в Любмине предполагают хорошие рыночные перспективы. Компания Siemens отмечает значительное повышение спроса на газовые турбины мощностью 35...40 МВт вплоть до 2020 года. Прогнозируются новые проекты, аналогичные БС «Любмин», поскольку в Европе планируется увеличивать поставки природного газа.

В мае 2012 года компания Siemens получила первый заказ на SGT-750 из Мексики (модификация на 60 Гц). Покупателем является Energia MK KF, SA de CV – дочернее предприятие компании по производству текстиля Grupo Kaltex. Газовая турбина предназначена для ГТУ–ТЭС электрической мощностью 36 МВт в г. Альтамира, которая будет снабжать энергией текстильное производство. Станцию планируется ввести в эксплуатацию до конца 2013 года. 

 Компоновка  
газотурбинного  
энергоблока SGT-750

