

**В.В. Навроцкий, М. Бломштедт, С. Юбель –
Siemens Industrial Turbomachinery AB (Швеция)
С.В. Медведев – ООО «Сименс»**

В статье представлена история разработки газотурбинного агрегата SGT-600, а также краткое описание его конструкции. Приведены данные об успешном опыте эксплуатации агрегата и мероприятиях по целенаправленному улучшению его технико-экономических характеристик, наиболее важными из которых являются возможность увеличения ресурса агрегата со 120 000 эквивалентных часов наработки (ЭЧН) до 180 000 ЭЧН и интервалов между циклами технического обслуживания с 20 000 до 30 000 ЭЧН.

Газотурбинный агрегат SGT-600: совершенствование конструкции и плана технического обслуживания

IN BRIEF

Continued enhancement of SGT-600 gas turbine design and maintenance.

In order to meet growing requirements on the gas turbines, power equipment manufacturers should sustain product improvement and employment of innovative technologies in the area of design, operation and maintenance. This paper describes the successful development of SGT-600 Siemens' medium size gas turbine and the latest achievements in maintenance and life cycle improvements. High reliability and availability of SGT-600 gas turbine were enabled by further improvements and modification of the combustor, compressor turbine, power turbine diffuser and control system.

В настоящее время наряду с развитием нефтегазовой отрасли и рынка производства электроэнергии ужесточаются требования к энергетическому оборудованию – его надежности, долговечности, эксплуатационной готовности, стоимости всего жизненного цикла, а также к уровню вредных выбросов в атмосферу. Чтобы удовлетворить данным требованиям, производители оборудования должны постоянно совершенствовать свою продукцию и ее техническое обслуживание, внедряя при этом инновационные решения и новейшие технологии.

В последнее время специалистами компании Siemens Industrial Turbomachinery AB (Финспонг, Швеция) был проделан большой объем работ по совершенствованию конструкции и систем газотурбинного агрегата средней мощности SGT-600. Модернизирована камера сгорания, рабочие и сопловые лопатки первой

ступени турбины компрессора, выходное устройство (диффузор), а также системы контроля и управления. Результатом последовательного усовершенствования агрегата SGT-600 стало увеличение его надежности, эксплуатационной готовности и ресурса.

История создания газотурбинного агрегата SGT-600

Разработка агрегата SGT-600 (первоначальное название GT10A) началась в 1977 г. швейцарской компанией Sulzer Escher Wyss, ввод в коммерческую эксплуатацию был осуществлен в 1988 г. Мощность турбины к тому времени составляла 22 МВт.

В 1990 г. лицензия на производство турбины была передана шведской компании ABB Stahl (сейчас Siemens Industrial Turbomachinery AB). Первой модификацией SGT-600 было внедрение камеры сгорания с системой сухого подавления вредных выбросов (DLE – Dry Low Emission), позволяющей при работе на газообразном топливе снизить выбросы оксидов азота (NO_x) до 25 ppm при 15 % O_2 . Сегодня такая камера сгорания входит в стандартный объем поставки, а обычная КС предлагается в качестве опции.

Через два года было запущено производство более совершенной модификации турбины SGT-600, известной как GT10B. Температура газов на входе в турбину повысилась на 50 °С и составила 1115 °С, в результате чего мощность агрегата увеличилась до 24,5 МВт при КПД 34,2 %. Для снижения отрицательного воздей-

Табл. 1. Рабочие характеристики SGT-600, топливо – природный газ (ISO)

Параметр	Значение
Мощность на клеммах генератора, МВт	24,77
КПД, %	34,2
Степень повышения давления воздуха в компрессоре	14
Массовый расход выхлопных газов, кг/с	80,4
Температура газов на выходе из двигателя, °С	543
Требуемое давление топливного газа, МПа	2,45±0,05
Скорость вращения силовой турбины, об/мин	7 700

ствия повышения температуры на ресурс рабочих и сопловых лопаток турбины компрессора, на них стали наносить защитное (антиоксидантное) покрытие. В 1997 году мощность агрегата была немного повышена за счет увеличения расхода воздуха, проходящего через двигатель. Основные характеристики агрегата представлены в *табл. 1*.

Конструкция агрегата SGT -600

Газотурбинный агрегат SGT-600 является двухвальным двигателем со свободной силовой турбиной, который может использоваться как в качестве механического привода, так и в составе энергоблока (*рис. 1*).

Компрессор – 10-ступенчатый, осевой, со сварным ротором. Степень повышения давления в компрессоре – 14. Компрессор оснащен двумя антипомпажными клапанами (окнами перепуска) после второй и пятой ступени. Первые два входных направляющих аппарата – регулируемые. Все лопатки имеют антикоррозийное покрытие (за исключением рабочих лопаток первой ступени, изготавливаемых из титана).

Для обеспечения минимального радиального зазора в рабочих колесах компрессора, элементы статора – кольца, расположенные над рабочими лопатками, изготовлены из материала с низким коэффициентом теплового расширения. Кроме того, с целью уменьшения отрицательного эффекта при возникновении касаний ротора о статор, на элементы статора (кольца) нанесено легкоистираемое покрытие.

Для снижения расходов на техническое обслуживание компрессора и продления срока службы его элементов применяется повторное нанесение антикоррозийного покрытия на рабочие и сопловые лопатки и нового истратного покрытия на соответствующие статорные кольца. Предусмотрен также ремонт уплотнений ротора. Кроме того, имеется опыт проведения ремонта ротора путем замены дисков компрессора. Ремонт компонентов компрессора проводится по техническому состоянию.

Камера сгорания турбины SGT-600 с системой сухого подавления вредных выбросов характеризуется простой и надежной конструкцией (*рис. 2, фото*). В ней используется применяемое в авиационных двигателях конвективно-пленочное охлаждение. Камера сгорания имеет теплозащитное керамическое покрытие. Горелки КС (*рис. 3*) являются ее интегральной частью.

Конструкция КС позволяет агрегату работать как на газообразном, так и на жидком топливе. Жидкое топливо поступает в горелку

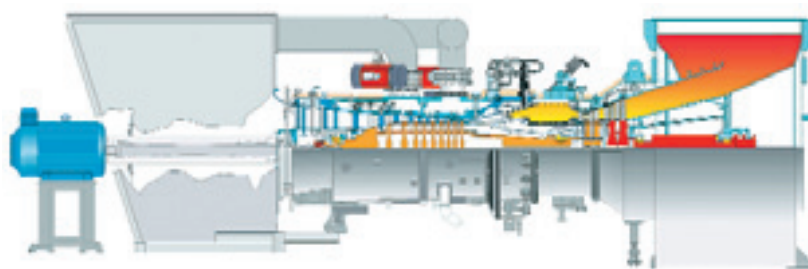


Рис. 1. Конструкция газотурбинного агрегата SGT-600

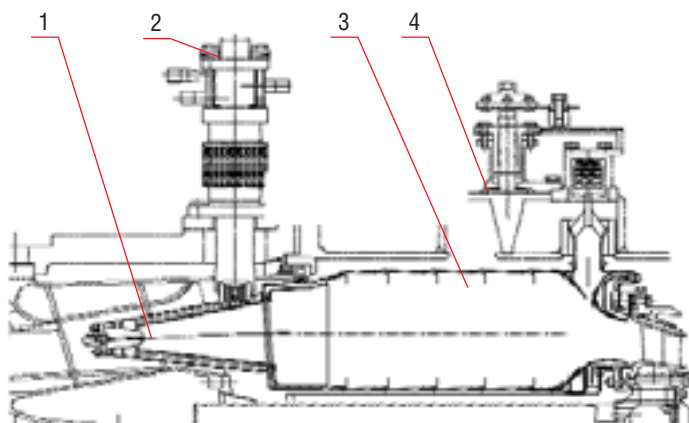


Рис. 2. Камера сгорания турбины SGT-600 с системой сухого подавления выбросов:
1 – горелка; 2 – каналы подачи топлива; 3 – жаровая труба; 4 – система перепуска воздуха

через те же каналы, что и пусковое газообразное топливо при работе турбины на газе. Для снижения уровней выброса вредных веществ к жидкому топливу в качестве эмульсии добавляется вода.

Горелка КС имеет коническую форму. Она состоит из двух частей, сдвинутых относительно друг друга для образования щелей, через которые в горелку поступает воздух из-за компрессора. Горелка работает по принципу сжигания обедненной топливной смеси.



Фото. Камера сгорания с системой сухого подавления вредных выбросов

Рис. 3.

Горелка
камеры
сгорания
с системой
DLE

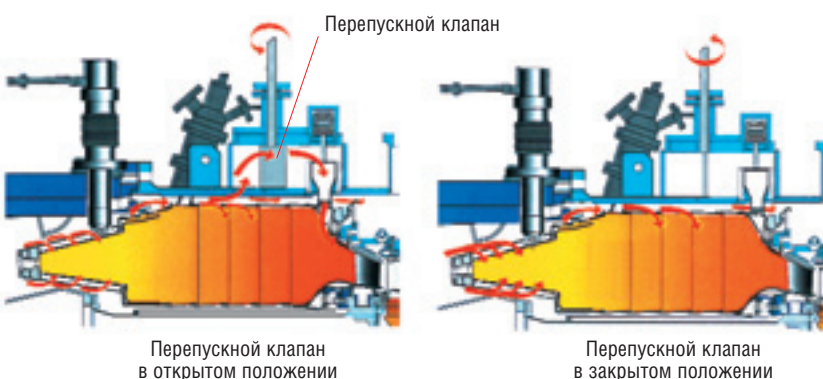
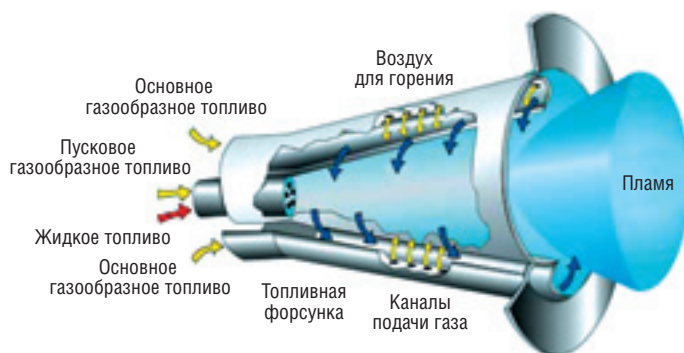


Рис. 4. Система перепуска воздуха в камере сгорания

При запуске турбины и при работе на частичных нагрузках для обеспечения стабильного горения используется так называемое пусковое газообразное топливо. Основное топливо подается в щели горелки через систему перфорационных отверстий. В горелке оно хорошо перемешивается с воздухом, поступающим из-за компрессора, что позволяет при сжигании данной топливоздушной смеси получить пламя с низкой температурой горения и низким уровнем выбросов NO_x .

Жидкое топливо подается на вход в горелку – процесс его сжигания аналогичен сжиганию пускового газообразного топлива.

Конструкция камеры сгорания и управление КС достаточно простые. Она не содержит дви-

жущихся частей, управление процессом подачи топлива осуществляется только с помощью двух регулирующих клапанов пускового и основного газообразного топлива. При работе турбины на частичных режимах функционируют все горелки, в то время как в некоторых других газовых турбинах используется только их часть (потенциальный риск возбуждения колебаний лопаток турбины).

В связи с тем что параметры управления КС не изменяются с течением времени, отсутствует необходимость ее периодической настройки. Все это является преимуществом малоэмиссионной камеры сгорания турбины SGT-600 по сравнению с другими.

Уникальным техническим решением, примененным в SGT-600, является система перепуска воздуха в камеру сгорания (рис. 4). Она используется для снижения уровня оксида углерода (CO) в выхлопных газах при работе турбины на частичных нагрузках. При открытии перепускных клапанов данной системы количество воздуха, поступающего в КС, уменьшается, в результате чего увеличивается температура пламени и сокращается уровень CO. Применение системы перепуска воздуха позволяет поддерживать постоянную температуру пламени и уровень эмиссии CO в диапазоне нагрузки 70-100 %.

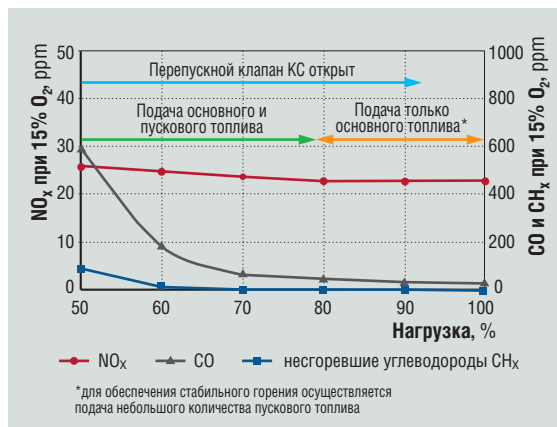
В настоящее время в стадии разработки находится камера сгорания DLE третьего поколения (сегодня стандартная конструкция SGT-600 включает КС DLE второго поколения). КС третьего поколения позволит поддерживать еще более низкий уровень CO и NO_x на полной и частичной нагрузке работы турбины. Причем, на частичной нагрузке низкий уровень CO и NO_x обеспечивается в диапазоне 50-100% номинальной мощности.

Стабильность процесса горения и низкий уровень эмиссии на различных нагрузках поддерживаются только двумя параметрами – коэффициентом пускового топлива и количеством перепускаемого воздуха в КС (рис. 5). В результате содержание NO_x удерживается на уровне менее 25 ppmt (при 15 % O_2) при работе на газообразном топливе и менее 42 ppmt во время работы на жидком топливе (при наличии впрыска воды).

В настоящее время в рамках планового технического обслуживания камеры сгорания предусмотрен ремонт КС, включающий также замену теплозащитного керамического покрытия. Целью дальнейших мероприятий, направленных на усовершенствование ремонта и восстановления камеры сгорания агрегата SGT-600, является снижение стоимости этих работ на 30 %.

Рис. 5.

Эмиссионные
характеристики камеры
сгорания при работе
на газообразном топливе



Турбина компрессора (ТК) состоит из двух ступеней (рис. 6). Рабочие и сопловые лопатки обеих ступеней имеют защитное (антиоксидантное) покрытие. Для обеспечения высокой эффективности турбины рабочие лопатки обеих ступеней снабжены бандажными аэродинамическими полками. Сопловые лопатки первой ступени, для уменьшения утечек охлаждающего воздуха, объединены в пакеты – по две лопатки в каждом.

С целью упрощения сборки и снижения стоимости изготовления замковые соединения лопаток с диском обеих ступеней имеют одинаковую конструкцию и размеры.

Для снижения стоимости жизненного цикла турбины в рамках планового технического обслуживания ТК применяются следующие восстановительные работы:

- ремонт рабочих и сопловых лопаток, в том числе с помощью новейшей технологии лазерной сварки;
- замена защитного покрытия рабочих и сопловых лопаток;
- ремонт тепловых экранов над рабочими лопатками первой и второй ступени (замена сотовых уплотнений).

Силовая турбина (СТ) – двухступенчатая, свободная (рис. 7). Первоначальная конструкция рабочих лопаток силовой турбины включала демпфирующую проволоку. С целью повышения КПД турбины все лопатки первой и второй ступени были перепроектированы – демпфирующая проволока заменена антивибрационными бандажными полками.

Замковые соединения рабочих лопаток с диском в обеих ступенях имеют одинаковую конструкцию и размеры, что упрощает сборку и сокращает расходы на изготовление СТ.

Силовая турбина имеет два варианта исполнения – для работы агрегата в умеренном и в жарком климате. Климатические условия определяют выбор угла установки соплового аппарата первой ступени.

Сопловые лопатки второй ступени СТ сформированы в пакеты – по четыре лопатки в каждом. Защитное покрытие на лопатках силовой турбины отсутствует.

Ротор СТ имеет сварную конструкцию. Для сокращения стоимости его производства была разработана специальная технология электроно-лучевой сварки ротора.

Результаты эксплуатации SGT-600

К концу 2008 года изготовлено более 230 газотурбинных установок SGT-600. Их суммарная эксплуатационная наработка составила более 5 млн эквивалентных часов, наработка турбины-лидера – более 145 тыс. часов.

В процессе эксплуатации парка этих агрегатов были получены следующие статистические данные:

- коэффициент надежности – 99,2 %;
- коэффициент готовности – 97 %.

Статистика основана на результатах, полученных при анализе опыта эксплуатации 40 % всех действующих установок SGT-600 различного применения (в качестве механического привода, а также для выработки электроэнергии) и работающих в различных условиях.

Оптимизация программы технического обслуживания SGT-600

В последнее время в программе совершенствования SGT-600, помимо повышения эффективности и надежности работы агрегата, особое внимание уделялось оптимизации плана технического обслуживания (ТО), уменьшению времени простоя агрегата и продлению его ресурса.

Разработка мероприятий по продлению ресурса агрегата была обусловлена тем фактом, что эксплуатационная наработка значительной части парка машин приближается к 120 000 эквивалентным часам – ресурсу, на который рассчитан стандартный план технического обслуживания.

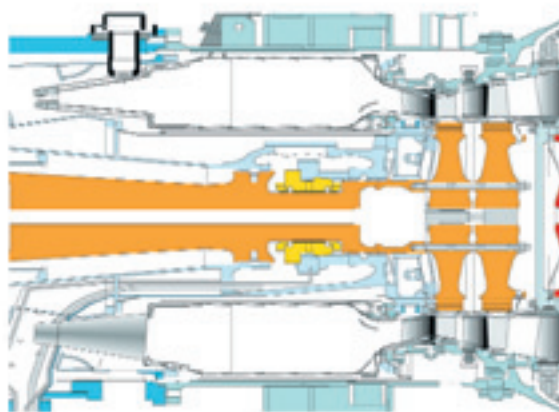


Рис. 6.
Конструкция турбины компрессора

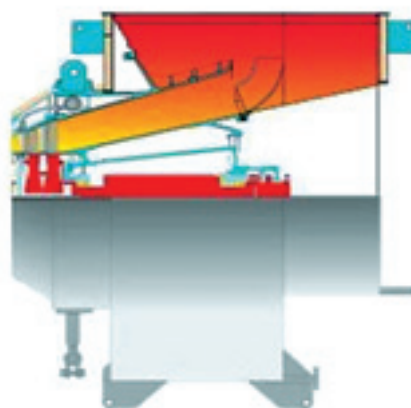
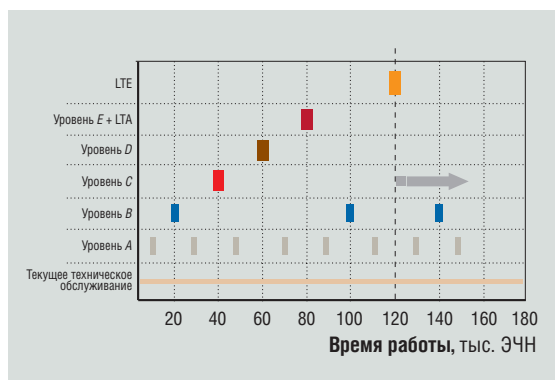


Рис. 7.
Конструкция силовой турбины

Рис. 8.
Стандартный план
технического
обслуживания
агрегата SGT-600



Последние исследования и положительный опыт эксплуатации всего парка машин показали, что с учетом последних усовершенствований конструкции агрегата и его систем существует возможность улучшить технико-экономические и эксплуатационные характеристики SGT-600, а именно:

- увеличить ресурс агрегата со 120 000 до 180 000 ЭЧН (в зависимости от состояния агрегата, определяемого условиями эксплуатации и качеством ТО);
- увеличить интервал между циклами ТО с 20 000 до 30 000 ЭЧН.

Увеличение ресурса агрегата

Возможность продления ресурса агрегата SGT-600, а следовательно, и уменьшения относительных эксплуатационных затрат, зависит от текущего состояния его элементов на момент достижения эксплуатационной наработки в 120 000 эквивалентных часов. В свою оче-

редь, состояние элементов определяется условиями эксплуатации агрегата и проведенными ранее мероприятиями по его техническому обслуживанию.

Чтобы своевременно определить возможность продления ресурса агрегата, а также чтобы процесс продления ресурса был планируемым и рентабельным, необходимо знать состояние компонентов агрегата до того, как его эксплуатационная наработка достигнет 120 000 ЭЧН. Особенно это касается роторов и корпусов, так как данные элементы имеют самую большую наработку. Поэтому процедуру продления ресурса агрегата рекомендуется разбить на два этапа:

- полное обследование агрегата и определение его технического состояния (Lifetime Assessment – LTA);
- собственно мероприятия по продлению ресурса агрегата (Lifetime Extension – LTE).

Работы по этим двум этапам должны быть разнесены во времени. Для того чтобы сократить время простоя агрегата, обследование технического состояния следует совместить с инспекцией, предусмотренной стандартным планом технического обслуживания SGT-600.

Наиболее удобным моментом для осуществления первого этапа работ является время проведения инспекции уровня E, предусмотренной при достижении агрегатом эксплуатационной наработки в 80 000 ЭЧН (краткое описание и объем работ при инспекциях различного уровня приведены в табл. 2).

Продление ресурса агрегата SGT-600 возможно и целесообразно при следующих условиях:

- обязательное следование эксплуатантом стандартному плану ТО;
- расширение плана технического обслуживания процедурами LTA и LTE;
- наличие возможности продления ресурса наиболее дорогостоящих элементов турбины – роторов и корпусов.

Разработанная программа по продлению ресурса SGT-600 изначально будет распространена на установки, эксплуатирующиеся в базовом режиме (постоянной нагрузки). При работе в этом режиме основным механизмом повреждения роторов и статора является ползучесть металла. Результаты последних исследований показали, что ресурс роторов компрессора и турбин, а также их корпусов при работе на постоянной нагрузке может быть продлен со 120 000 до 180 000 ЭЧН.

На рис. 8 представлен стандартный план ТО агрегата, дополненный мероприятиями по оценке технического состояния двигателя (LTA) и продлению его ресурса (LTE).

Табл. 2. Краткое описание инспекций различного уровня

Уровень А	Исследование с помощью бороскопа - 4-я и 10-я ступень компрессора - Камера сгорания - Рабочие и сопловые лопатки турбины компрессора	Визуальный осмотр - Соединения и шестерни - Вспомогательные системы
Уровень В	Исследование с помощью бороскопа - 4-я и 10-я ступень компрессора	Визуальный осмотр - Топливные форсунки - Рабочие и сопловые лопатки турбин - Соединения и шестерни - Вспомогательные системы - Электрический генератор
Уровень С	Неразрушающий контроль - Рабочие лопатки и лопатки направляющих аппаратов компрессора - Рабочие и сопловые лопатки турбин	Визуальный осмотр - Соединения и шестерни - Вспомогательные системы - Электрический генератор
Уровень D	Исследование с помощью бороскопа - 4-я и 10-я ступень компрессора	Визуальный осмотр - Рабочие и сопловые лопатки турбин - Соединения и шестерни - Вспомогательные системы - Электрический генератор
Уровень E	Неразрушающий контроль - Рабочие лопатки и лопатки направляющих аппаратов компрессора - Рабочие и сопловые лопатки турбин	Визуальный осмотр - Топливные форсунки - Соединения и шестерни - Вспомогательные системы - Электрический генератор

Процедура оценки состояния элементов агрегата включает в себя инспекцию уровня *E*, когда определяется состояние ответственных элементов с помощью различных методов неразрушающего и разрушающего контроля. Неразрушающему контролю подвергаются ротор компрессора, диски турбины, фланцевые соединения, элементы выходного устройства. Проверяется также относительное положение корпусов и их форма (овализация).

Выборочной проверке разрушающим методом контроля подвергаются несколько сопловых лопаток силовой турбины (третьей и четвертой ступени) и рабочих лопаток четвертой ступени. Результатом работ по оценке состояния агрегата является точный перечень элементов, подлежащих ремонту или замене.

Мероприятия по продлению ресурса агрегата включают в себя все работы, предусмотренные инспекцией уровня *B* (см. табл. 2), а также работы, запланированные на основе анализа результатов, полученных при оценке состояния двигателя.

Осенью 2007 года на одном из агрегатов SGT-600 были проведены работы по продлению ресурса со 120 000 до 160 000 эквивалентных часов наработки. С декабря того же года данный агрегат находится в эксплуатации.

Увеличение интервала между циклами технического обслуживания

На основе данных, полученных из опыта эксплуатации, и результатов проведенных исследований был разработан новый план ТО агрегата SGT-600. Он позволяет снизить суммарное (за весь жизненный цикл) время планового технического обслуживания и, таким образом, увеличить коэффициент готовности агрегата.

На рис. 9 и 10 представлен план технического обслуживания SGT-600 с интервалом между циклами в 20 000 эквивалентных часов и план ТО с увеличенным (до 30 000 ЭЧН) интервалом.

Новый план предусматривает продление интервала между циклами технического обслуживания с 20 000 до 30 000 ЭЧН, а также уменьшение продолжительности инспекции уровня *A*. Кроме того, сокращение времени проведения планового обслуживания достигается за счет работы в несколько смен, оптимизации процедур ТО и совершенствования применяемого инструмента.

Новый план технического обслуживания распространяется на агрегаты SGT-600 в следующих случаях:

- оборудование работает в режиме постоянной нагрузки;

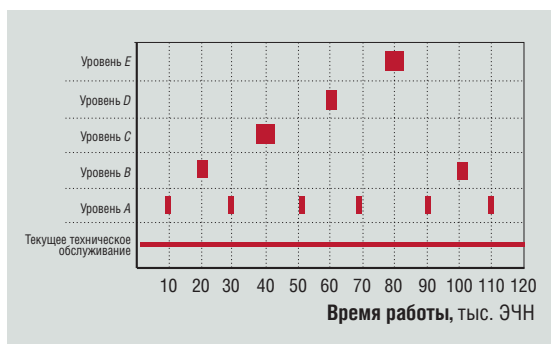


Рис. 9. Стандартный план технического обслуживания агрегата SGT-600 с интервалом между циклами ТО в 20 000 ЭЧН

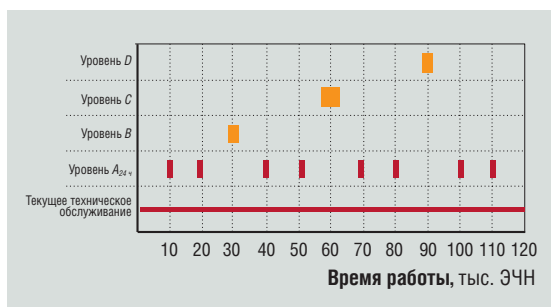


Рис. 10. Стандартный план ТО с интервалом между циклами ТО в 30 000 ЭЧН

- установки оснащены камерой сгорания с системой DLE и усовершенствованной системой управления;
- агрегаты включают элементы последней (на конец 2007 г.) конструкции.

Увеличение интервала между циклами технического обслуживания с 20 000 до 30 000 эквивалентных часов наработки позволяет уменьшить количество основных инспекций с пяти до трех (при плане ТО, рассчитанном на 120 000 ЭЧН). Наряду с сокращением продолжительности проведения остальных инспекций это приводит к значительному снижению суммарного времени планового простоя, а значит, и к увеличению коэффициента готовности агрегата SGT-600.

В настоящий момент исследования, направленные на увеличение надежности, долговечности и эксплуатационной готовности газотурбинного агрегата SGT-600 продолжают. Результаты этих исследований позволяют в дальнейшем производить более совершенные по техническим показателям и экологическим характеристикам машины.

Планируется также использовать полученные данные для проведения модернизации конструкции и усовершенствования плана ТО уже введенных в эксплуатацию агрегатов. Эти мероприятия позволят увеличить эффективность эксплуатации и снизить стоимость жизненного цикла всего парка газотурбинных агрегатов SGT-600. ■

По материалам доклада Siemens Industrial Turbomachinery
AB GT2008-51143 на конференции ASME Turbo Expo 2008, Берлин,
Германия.