

Высокоэффективные HEPA-технологии для систем фильтрации ГТУ средней и большой мощности

С. Н. Анисимов, Д. Е. Круговых, Д. С. Молодкин – ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз»

In brief
High efficiency HEPA technologies for heavy and medium duty gas turbine plants filtration systems.
Implementation of high efficiency filtration systems on the stage of designing of gas turbine plant inlet air treatment system for engine protection from external sources of pollution gives the opportunity to retain the performances of gas turbines and significantly reduce operational costs. Turbine operational performance, availability and component life can be considered as direct functions of the total mass of ingested contaminants. These deposits decrease the air-flow performance of the inlet compressor due to degradation in blade shape and surface finish. Ultimately, the overall performance of the turbine is greatly affected. HEPA filtration provides the important particle efficiency required to remove submicron-sized contaminants, resulting in laboratory-like clean air for engine combustion. The primary technical benefit derived from enhanced filtration technology include greater machine availability and reliability.

Сегодня для генерирующих компаний, эксплуатирующих ГТУ, остро стоит вопрос о снижении эксплуатационных и ремонтных затрат. Одним из возможных способов его решения является внедрение энергоэффективных технологий, направленных на сохранение элементов проточной части, сокращение времени простоя ГТУ для выполнения плановых работ, а также снижение количества аварийных остановов. К техническим решениям, способствующим сохранению эксплуатационных характеристик ГТУ, можно отнести систему фильтрации, установленную в комплексно-воздухоочистительном устройстве (КВОУ).

Мировой опыт, а также решения, внедренные на пилотных объектах в РФ, показали, что инвестиции в такие технологии возвращаются уже в первый год их применения и впоследствии приводят к заметному сокращению эксплуатационных и ремонтных затрат. Этот эффект хорошо заметен на ГТУ средней и большой мощности, снижение технико-экономических показателей которых особенно ощутимы.

Подготовка рабочего тела является важнейшим вопросом эксплуатации ГТУ. Основной частью рабочего тела является воздух (соотношение воздуха к газу 50:1). При недостаточно качественной очистке воздуха, поступающего в компрессор, возникает необходимость проводить off-line и on-line промывки. А это вместе с рядом других факторов (неудовлетворительная работа системы топливоподготовки, сильная пылевая нагрузка на систему фильтрации) влечет за собой увеличение эксплуатационных потерь, сокращение ресурса лопаток осевого компрессора (ОК) и горячей части турбины, а также увеличение объема работ при проведении среднего и капитального ремонта ГТУ.

Устанавливаемая в настоящее время в России система воздухоподготовки на современные ГТУ недостаточно эффективна даже в сочетании с регулярными промывками проточной части двигателя. Данные решения были актуальны 10–15 лет назад – до появления высокоэффективных систем фильтрации, полностью изменивших подход к пониманию способов защиты двигателя от загрязнения. Некоторые

изготовители газовых турбин, такие как Mitsubishi, GE Oil & Gas, уже устанавливают системы HEPA-фильтрации сверхтонкой очистки на все свои последние модели.

Согласно данным страховых агентств, в ГТУ малой мощности около 50 % всех неполадок связано с работой силовой турбины, в то время как на проблемы компрессорной части приходится лишь 12 % всех неисправностей. В ГТУ нового поколения машин класса H с высокой производительностью проблемная область перешла на компрессор: на него приходится около 35 % общего количества неполадок. Это свидетельствует о том, что современные газовые турбины требуют большей защиты, т.е. применения более эффективных решений в области воздухоподготовки.

Таким образом, за последнее десятилетие изменилась область проблем и стоимость их решения, потребовались новые методы оценки стоимости эксплуатации. Фактически, системы фильтрации, которые применялись в 2000-х гг., не могут использоваться для современных газовых турбин.

Сегодня для ГТУ средней и большой мощности, поставляемых в Россию, стандартная комплектация КВОУ включает в себя системы фильтрации классов G4 – F8/F9. Как показал проведенный анализ на большинстве российских электростанций, КВОУ и установленные системы фильтрации значительно влияют на потери, связанные с недовыработкой электрической мощности ГТУ вследствие загрязнения компрессора и повышения сопротивления в системе воздухоочистки.

На рис. 1, 2 даны графики снижения производительности турбины SGT-800 номинальной мощностью 47 МВт (Siemens) с системой очистки с ФТО класса F9 и ФТО класса H11. На фото 1 показан входной направляющий аппарат SGT-800 с системой очистки с ФТО класса F9 (слева) и класса H11 (справа). Для газовых турбин большой мощности экономический эффект увеличивается в разы.

Система очистки с ФТО класса F8/F9 требует регулярных off-line и on-line промывок. Основным недостатком при этом, помимо

затрат на промывочную жидкость, является то, что на последних ступенях компрессора образуется коричневый чешуйчатый налет, появляющийся в результате недостаточного смыва моющего раствора и остаточной жесткости воды.

При оценке работы системы фильтрации КВОУ необходимо учитывать также несколько основных факторов, влияющих на производительность компрессора (помимо тех, которые соответствуют спецификации производителя газотурбинной установки).

Перепад давления. Рост перепада давления в системе фильтрации приводит к снижению давления на входе в камеру сгорания, что в свою очередь снижает выходную мощность газовой турбины. Уровень снижения зависит от мощности и типа машины: для большой установки этот показатель находится в пределах 0,5 % на кПа.

Коррозия. При низкоэффективной системе фильтрации возможно попадание в камеру сгорания находящихся в воздухе аэрозольных загрязнителей, таких как натрий, содержащийся в морской соли. Натрий взаимодействует с присутствующими в топливе загрязнителями (сера, ванадий и др.), что может привести к коррозии газовой турбины и необходимости преждевременного дорогостоящего ремонта. Сульфаты также могут попадать в турбину в виде газообразных загрязнителей и вступать в реакцию с другими химическими элементами. Последствия попадания сульфатов в ГТУ трудно устраняются.

Загрязнение компрессора. Проникающие в двигатель загрязнения образуют отложения на внутренних элементах проточной части компрессора. Отложения на его лопатках изменяют треугольник скоростей и углы атаки воздушных потоков, в результате чего снижается степень сжатия компрессора, что влечет за собой снижение мощности двигателя.

Загрязнение каналов охлаждения газовой турбины. Около 30 % всей попадающей в проточную часть ГТУ пыли остается в каналах охлаждения, включая отверстия пленочного охлаждения лопаток и патрубков. В результате снижается интенсивность охлаждения элементов и срок службы дорогостоящих компонентов газовой турбины.

Проанализируем стандартную систему фильтрации, устанавливаемую на ГТУ SGT5-4000 (Siemens) одновального исполнения, с классом G4+G4+F8. Технические параметры для проведения расчета отслеживались с интервалом 30 мин. Цель проведения анализа – оптимизация эксплуатационных затрат, связанных с работой системы фильтрации.

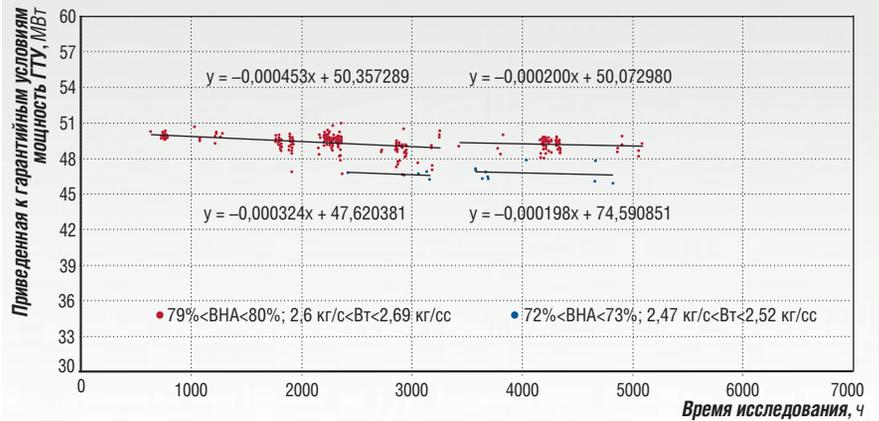


Рис. 1. График снижения электрической мощности ГТУ вследствие загрязнения проточной части при различных режимах работы с фильтром ФТО F9

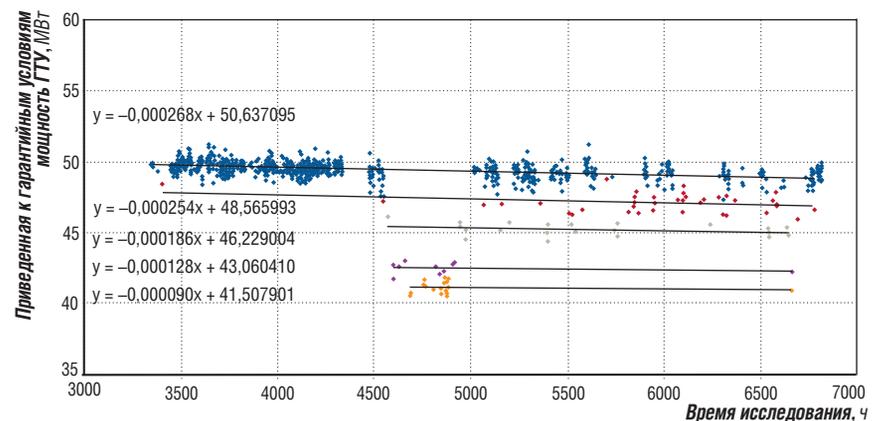


Рис. 2. График снижения электрической мощности ГТУ вследствие загрязнения проточной части при различных режимах работы с фильтром ФТО H11

Все затраты, связанные с применением системы фильтрации КВОУ ГТУ, можно разделить на следующие статьи:

- на закупку комплекта системы фильтрации;
- на закупку моющих средств для промывок проточной части компрессора ГТУ;
- «упущенную выгоду», связанную с невыработкой электроэнергии в результате повышения перепада давления на системе фильтрации КВОУ ГТУ;
- «упущенную выгоду», связанную с невыработкой электроэнергии в результате загрязнения проточной части компрессора;
- затраты на ремонт элементов проточной части компрессора в результате эрозийно-коррозионных процессов.

Фото 1. Турбина SGT-800: ВНА компрессора с системой очистки класса G4-F9 (слева) и класса F7-H11 (справа)



Табл. 1. Система фильтрации турбины SGT5-4000

ВЛО	592x592x96 мм, класс фильтра G4
ФГО	592x592x250 мм, 6 карманов, класс фильтра G4
ФТО	592x592x300 мм, класс фильтра F8

Табл. 2. Анализ годовых затрат при существующем классе фильтрации

Показатель	Существующая система очистки (G4+G4+F8)	Система очистки G2+F7+H10
Ориентировочные затраты на покупку системы фильтрации, р.	~ 4 000 000	~ 8 000 000
«Упущенная выгода», связанная со снижением мощности ГТУ по причине загрязнения ее проточной части, р.	2 x 12 733 093 (~2 x 13 126,9 МВт)	(По опыту эксплуатации) 2 x 4 401 512
«Упущенная выгода» по причине загрязнения системы фильтрации, р.	2 x 2 270 770 (~2 x 2 341 МВт)	~2 x 3 079 750 (~3175 МВт·ч)
Затраты на промывки проточной части ГТУ, р.	10 800 000	On-line промывки не требуется; off-line – не более одной в год
Итого за год, р.	44 807 726	22 962 524

Табл. 3. Количество частиц пыли, проникающих через систему фильтрации с различным сочетанием классов очистки по ступеням

Размер частиц, мкм	Кол-во частиц на м³ в относительно загрязненном воздухе на промплощадке	Система фильтрации G4+G4+F8		Система фильтрации G4+F7+H10	
		Нач. эфф-ть ФТО Е _т , %	Кол-во частиц на м³	Нач. эфф-ть ФТО Е _т , %	Кол-во частиц на м³
0,3...0,5	20 000 000	88,2	2 174 976	98,5	56 448
0,5...1,0	4 000 000	94,2	176 620	99,6	1 938
1,0...2,0	300 000	97,55	4472	99,99	1

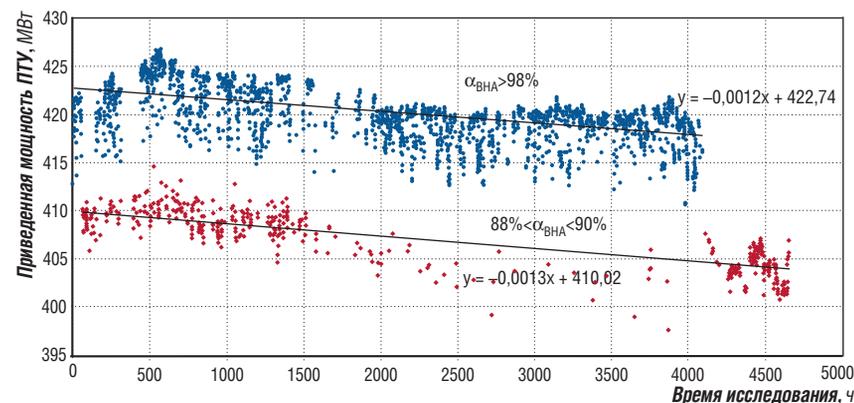


Рис. 3. График снижения приведенной мощности для основных режимов работы SGT5-4000F

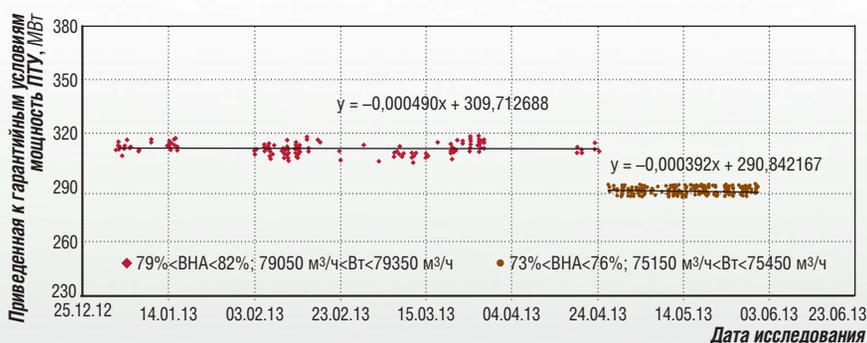


Рис. 4. График снижения приведенной мощности для основных режимов работы турбины M701F4

Расчет проводился в период 21.06.2012 – 31.01.2012. Система фильтрации, применяемая на ГТУ SGT5-4000F, представлена в табл. 1.

На первой ступени применен влагоотделитель класса G4 из 100 %-го синтетического волокна размером 592x592x96 мм. Его основная функция заключается в коагуляции влаги, содержащейся в воздухе, с целью снижения количества ее попадания на последующие ступени фильтрации.

Установленные в комбинированной системе карманные фильтры грубой очистки (592x592x250 мм, 6 карманов, класс очистки фильтра G4, 100 %-е синтетическое нетканое волокно) выполняют функцию предварительной очистки и защиту ступени тонкой очистки от загрязнения частиц крупной и средней фракции.

ФТО кассетного типа размером 592x592x300 мм выполнены из 100 %-го стекловолокна и имеют эффективную площадь фильтрующего материала 20 м². Класс фильтра F8, при котором начальная эффективность на частицы 0,4 мкм составляет около 65 %.

Графики снижения приведенной мощности для данной ГТУ представлены на рис. 3, для сравнения на рис. 4 даны графики снижения мощности газовой турбины M701F4 с системой фильтрации G4-F8-H12. Потери из-за загрязнения турбины за полгода работы (межпромывочный период) составляют 2,117 МВт (0,67 %) максимальной приведенной мощности по причине загрязнения проточной части компрессора ГТУ.

Потери, связанные с невыработкой электроэнергии ГТУ SGT5-4000F, составили за полгода работы 5,184 МВт (1,26 %) максимальной приведенной мощности. ГТУ и ПТУ работают на одном валу, поэтому для двухвального исполнения ПГУ потери максимальной приведенной мощности были бы выше.

Потери и затраты, связанные с работой системы фильтрации за год эксплуатации составили около 46 млн рублей. Сравнение подробных годовых затрат при существующем классе очистки G4+G4+F8 с примерными затратами на установку системы фильтрации, основанной на применении НЕРА-технологий, представлены в табл. 2. Выработанная электроэнергия за тот же период составила бы около 3,4 млн МВт, в денежном эквиваленте – 3 300 млн рублей (при тарифе 970 р./МВт). Затраты, связанные с «упущенной выгодой» и промывками турбины, составили 1,24 % от возможной прибыли (46 млн р.).

При использовании НЕРА-фильтрации затраты в связи с загрязнением проточной части можно сократить в 2–4 раза.

На *фото 2* можно сравнить состояние компрессора турбины SGT5-4000F (Германия) после наработки около 8 000 часов с системой очистки классов G4-F9 и F7-H11.

Для газовых турбин мощностью более 170 МВт с системой фильтрации G4-F8/F9 потеря максимальной приведенной мощности составляет порядка 1,2-2,1 % за полгода. Подобные затраты можно снизить примерно вдвое, используя НЕРА-технологии.

Анализ состояния газовых турбин показал что наибольшую опасность для лопаток компрессора представляет мелкодисперсная пыль (0,3...0,5 мкм), оседающая на лопатках, забивая каналы охлаждения лопаток и нарушая аэродинамику воздушного потока на поверхности лопаток. Согласно исследованиям, данная взвесь составляет почти 95 % от всего содержания пыли на высоте расположения КВОУ (более 10 м от уровня земли). На *фото 3* показана лопатка 4-й ступени осевого компрессора ГТУ V94.2 во время проведения капремонта газовой турбины.

Количественная оценка проникновения пыли через систему фильтрации с различным сочетанием классов очистки по ступеням представлена в *табл. 3*.

НЕРА-технологии в системе воздухоочистки имеют сравнительно небольшой мировой опыт использования (около 15 лет). Однако за этот период они отлично зарекомендовали себя и подтвердили экономическую целесообразность применения. На *фото 4* показано состояние газовой турбины M701F4 (Mitsubishi) с наработкой около 48 000 часов с установленным фильтром конечной ступени, имеющим класс очистки H12.

Выводы

1. Мировые производители ГТУ внедряют высокоэффективные системы фильтрации уже на стадии проектирования КВОУ ГТУ для

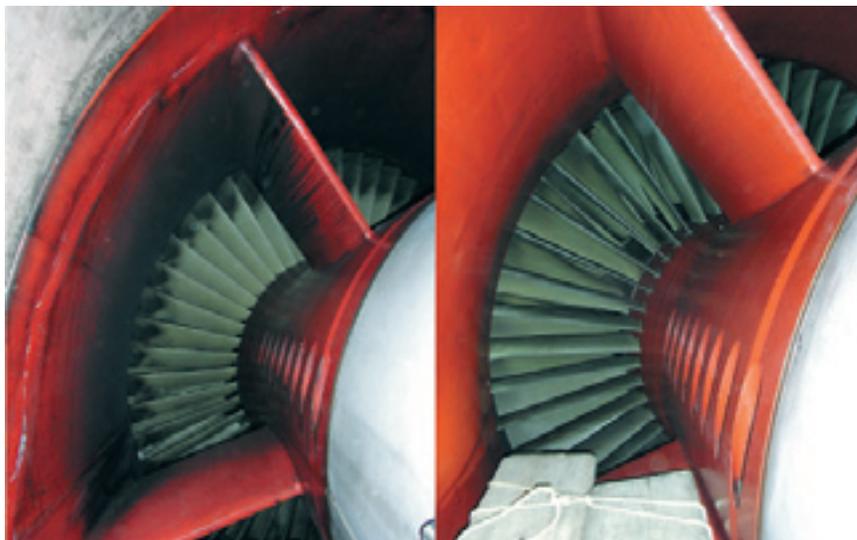


Фото 2.
Турбина SGT5-4000F при наработке компрессора 8000 ч с системой очистки классов G4-F9 (слева) и с F7-H11 (справа)

защиты двигателей от внешних источников загрязнения и сохранения их технико-экономических показателей.

2. Внедрение комплексного подхода при эксплуатации КВОУ ГТУ позволяет минимизировать эффект «упущенной выгоды» и снизить эксплуатационные и ремонтные затраты.

3. Первый опыт внедрения мер по повышению эффективности работы системы фильтрации КВОУ газовых турбин в России подтвердил, что сделанные инвестиции, в сравнении с технико-экономическим эффектом от их внедрения, – незначительны и окупают себя в первый год эксплуатации. **Д**

Использованная литература

1. Исполнительное резюме Франка Маскрофта.
2. Отчет обследования технического состояния комплексного воздухоочистительного устройства газотурбинной установки SGT-800 (Siemens), SGT5-4000F (Siemens), M701F (Mitsubishi).
3. Рекомендации компании Siemens по улучшению эффективности КВОУ.

Фото 4.
Лопаточный аппарат ГТУ M701F4 при наработке 48 000 часов



Фото 3. Лопатка 4-й ступени компрессора ГТУ V94.2 с системой фильтрации G4-F8

