

# Выбор класса воздушных фильтров КВОУ ГТУ

С. А. Гынденев — ООО «СитиЭнерго»

А. Р. Богдан, Д. Е. Круговых — ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз»

В статье представлен первый в России положительный опыт работы газотурбинной установки SGT-800 с фильтрами тонкой очистки класса HEPA.

## In brief

### Selection of filters class for air filter houses of gas turbine plants.

During the selection of air filters manufacturers you shouldn't restrict yourself with only price and operational parameters of the equipment. Their parameters mentioned in confirming documents according to DINEN 779 standards were received during the tests with using of test dust. The parameters of dust in real conditions are much different in chemical and fractional composition. The experience of low-quality coarse and fine filtering equipment application shows that it can cause the huge financial losses connected with long outages and expensive overhauls of gas turbine power plants components. The best way here is to take into account the real parameters of filters.

Целесообразность применения любого оборудования и расходных материалов, независимо от отрасли, достигается путем технико-экономического обоснования. На сегодня определяющим фактором сравнительной оценки любой продукции на конкурсных торгах является ее стоимость. При этом довольно часто не проводится оценка реальных технических характеристик продукции и качества ее изготовления. Сложившиеся тенденции, направленные на экономию закупочных средств и приобретение оборудования и материалов невысокого качества, значительно снижают надежность, долговечность и эффективность работы целых промышленных комплексов.

При выборе того или иного производителя системы фильтрации циклового воздуха, поступающего в ГТУ, не следует ограничиваться стоимостными показателями и заявленными паспортными характеристиками. Указанные в подтверждающих документах параметры фильтров, согласно DINEN 779, определены при испытаниях на тестовой пыли. Реальная пыль существенно отличается от лабораторной по химическому и фракционному составу.

Как показал уже существующий опыт эксплуатации ГТЭС в России, использование низкотехнологичных материалов при изготовлении фильтров грубой и тонкой очистки приводит к колоссальным убыткам, связанным с простоями и дорогостоящими ремонтами ГТУ. Речь идет о механическом износе, перегреве и по-

ломке отдельных элементов проточной части машины, вызванными проникновением атмосферных загрязнений через систему фильтрации, установленной в КВОУ.

Отсутствие технического понимания данных вопросов у проектных и эксплуатирующих организаций препятствует эффективному внедрению современных технологий в этой области. Кроме того, при стандартных решениях завод-изготовитель основного оборудования не учитываются реальные климатические условия и особенности местоположения газотурбинных электростанций.

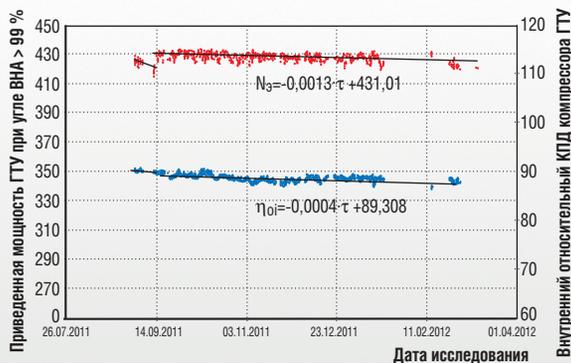
При выборе производителя нужно ориентироваться на реальные показатели работы фильтров и положительный опыт их применения. Для этого обозначим основные требования к системам фильтрации КВОУ ГТУ:

1. Основная задача при проектировании и изготовлении современной системы фильтрации (СФ) заключается не в улавливании загрязнений определенных размеров с заданной эффективностью, а в минимизации проскока частиц в проточную часть турбины, чтобы предотвратить снижение технико-экономических показателей ГТУ и надежности оборудования. Другими словами, вопрос «сколько фильтр задержал частиц», следует переформулировать: «почему он столько пропустил через себя»? Пылеемкость является количественным показателем, характеризующим работу ФГО, а проницаемость — качественно-количественным показателем ФГО и ФТО, определяющим эффективность работы ГТУ.

Например, анализ эффективности работы системы фильтрации КВОУ газотурбинной установки SGT5-4000F, проведенный специалистами ООО «Сити-Энерго» и ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз» на Яйвинской ГРЭС, показал, что с 1.09.2011 по 12.03.2012 гг. наблюдалась недовыработка электроэнергии в объеме 6942,71 МВт·ч (в денежном эквиваленте 9,18 млн рублей при тарифе 1321,63 р./МВт·ч). Снижение выработки электрической мощности ГТУ и внутреннего относи-

Рис. 1.

График снижения приведенной электрической мощности ГТУ SGT5-4000F и внутреннего КПД компрессора вследствие загрязнения проточной части



тельного КПД компрессора вследствие загрязнения проточной части представлены на рис. 1. На фото 1 показаны следы износа проточной части компрессора.

2. Работа ступеней грубой и тонкой фильтрации должна предусматривать равномерное распределение фильтрационного потенциала и эквидистантный рост перепада давления. Имеется в виду, что функция ФГО заключается в предотвращении попадания частиц пыли крупных и средних размеров на ступень тонкой очистки и тем самым продлевать ресурс ее работы. Подбор комбинаций классов фильтрации на ступенях должен производиться строго индивидуально под конкретные условия эксплуатации. Основой в выборе оптимального сочетания может служить либо протокол испытаний, учитывающий метеосостояние и анализ концентраций загрязнений за целый год исследования, либо опытная статистика.

Например, опыт применения одного и того же комплекта (влагоотделитель PoretPPI 10Δ=10 мм; ФГО S45 KR-6/500SG класса G4; ФТО МРК39-23 GT класса F9) на объектах: ТЭС «Международная» и предприятия №3 филиала №9 «Северо-Западный» ОАО «МОЭК», расположенных на западе г. Москвы, показал, что внешние условия эксплуатации ГТУ SGT-800 играют большую роль в выборе сочетания классов очистки. Ресурс работы данного комплекта на ТЭС «Международная» составил 10 месяцев, а на РТЭС «Строгино» около 6 месяцев. По мнению специалистов ООО «СитиЭнерго» и «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз» это связано с преобладанием в воздухе на высоте расположения КВОУ частиц различной концентрации и фракционного состава.

Решить вопрос о продлении ресурса работы фильтров без наличия информации о среднегодовом фракционном составе загрязнений в воздухе в этой ситуации возможно лишь опытным, итеративным путем.

3. Фильтрация циклового воздуха, поступающего в ГТУ, защищает от загрязнений ее проточную часть. В основу выбора класса фильтрации для комбинации ступеней очистки следует закладывать критерий минимума online- и offline-промывок и ресурс работы СФ. Российский и зарубежный опыт показал, что поддерживать первоначальную чистоту проточной части ГТУ за счет эффективной очистки более целесообразно, чем возвращать в состояние чистоты за счет промывок. Кроме того, добиться исходного состояния рабочих и сопловых лопаток турбины существующими моющими средствами полностью не удастся.

На фото 2а-в показано состояние проточной части компрессора на параллельно работа-



С Фото 1. Загрязнение ВНА и следы начинающегося износа проточной части компрессора после 5000 ч наработки

ющих ГТУ V84.3A с системами фильтрации различных классов.

У многих эксплуатирующих организаций возникает вопрос: как сравнить фильтры и с кем из производителей заключать контракты, какой класс очистки выбрать, сэкономить и сохранить надежность работы оборудования? Ниже предлагается методика, разработанная ООО «СитиЭнерго» и «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз» на основе критерия минимума эксплуатационных затрат и упущенной выгоды электростанции (табл. 1). Данная методика имеет следующее выражение:

$$\Delta Z_i = (n \cdot X_i^{\text{ВЛО}} + m \cdot X_i^{\text{ФГО}} + k \cdot X_i^{\text{ФТО}}) + \sum Y_i + (\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{Э1}}^{\text{загрязнение}} + \sum \Delta \mathcal{E}_{\text{Э1}}^{\text{сопротивление}} + \sum \Delta \mathcal{E}_{\text{Э1}}^{\text{упущ. выгода}}) \cdot S_{\text{ЭЭ}}$$

где n, m, k – количество замен (регенераций) влагоотделителей ФГО и ФТО; i – идентификация турбины;  $S_{\text{ЭЭ}}$  – отпускной тариф на

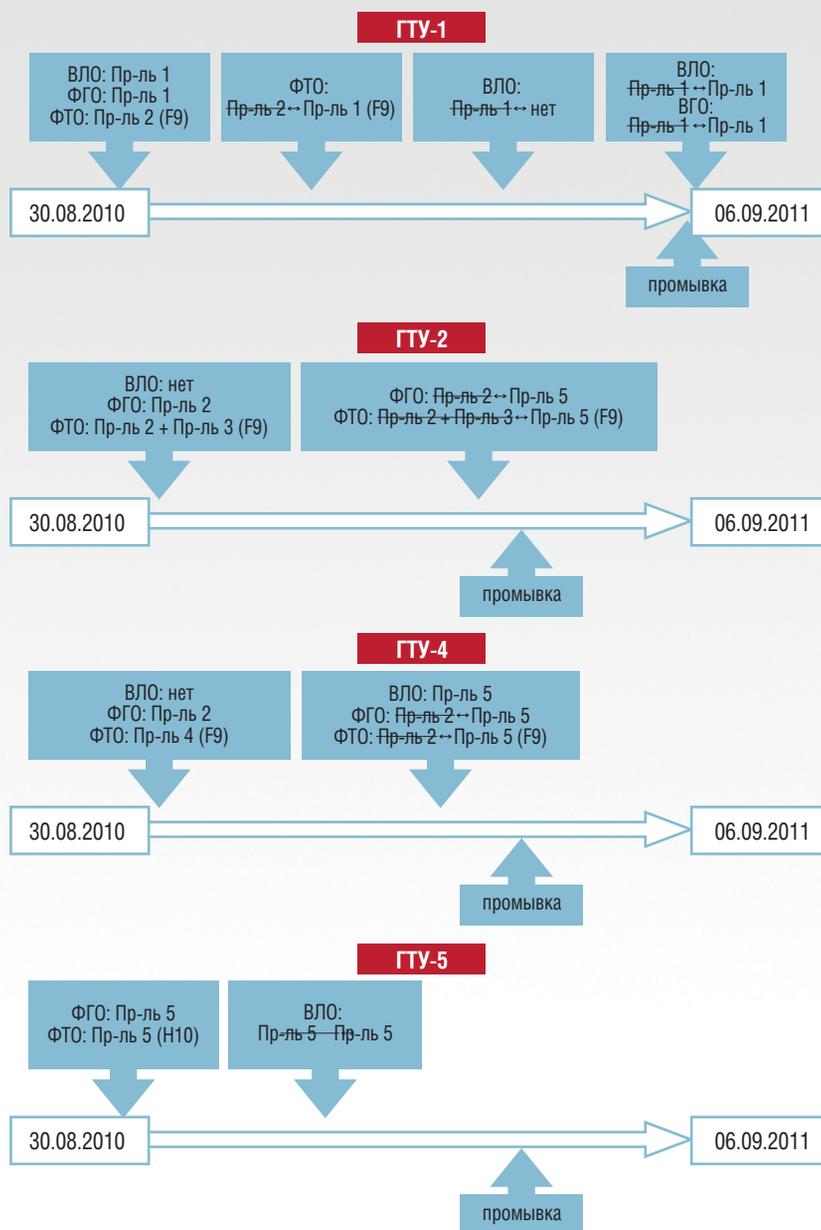


С Фото 2. Степень загрязнения компрессора параллельно работающих ГТУ V84.3A

- а) Нарботка 3970 ч после последней промывки ФГО F5 + ФТО F8  
 б) Нарботка 4391 ч после последней промывки ФГО F5 + ФТО F9  
 в) Нарботка 6692 ч, промывки не выполнялись. Предфильтр F6 + ФГО F9 + ФТО H11

Табл. 1. Методика выбора фильтров

Наименование затрат	Буквенное обозначение
Закупка системы фильтрации: - влагоотделитель (ВЛО) - фильтр грубой очистки (ФГО) - фильтр тонкой очистки (ФТО)	$X_i^{\text{ВЛО}}$ $X_i^{\text{ФГО}}$ $X_i^{\text{ФТО}}$
Промывка проточной части ГТУ	$Y_i$
Недовыработка электрической мощности, связанная с загрязнением проточной части ГТУ	$\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{Э1}}^{\text{загрязнение}}$
Недовыработка электрической мощности, связанная с ростом перепада давления на системе фильтрации КВОУ ГТУ	$\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{Э1}}^{\text{сопротивление}}$
Недоотпуск электроэнергии, связанный с вынужденными остановками ГТУ для замены системы фильтрации или выполнения промывок	$\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{Э1}}^{\text{упущ. выгода}}$



Примечание. Пр-ль 2 ↔ Пр-ль 5 – фильтры производителя 2 заменены фильтрами производителя 5

Рис. 2. Графики по замене фильтроэлементов и проведению промывок

электроэнергию, р./кВт·ч (остальные буквенные обозначения приведены в табл. 1).

В качестве примера рассмотрим реальный эксперимент, реализованный ООО «СитиЭнерго» совместно с ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз» на ТЭС «Международная». Эксперимент продолжался несколько лет и может быть условно разделен на два основных этапа. За время проведения первого этапа удалось продлить ресурс системы фильтрации с ФТО класса F9 в три раза за счет оптимально подобранной конфигурации и типов фильтрующих элементов. Работа второго этапа, выполнявшегося в течение года, заключалась в выборе оптимального сочетания ступеней очистки СФ с позиции эффективности и ресурса. Заказчиком были поставлены следующие задачи:

- сократить издержки на промывки проточной части ГТУ;
- предотвратить снижение технико-экономических показателей ГТУ, связанных с заносом загрязнений в ее проточную часть;
- минимизировать затраты на закупку фильтров грубой / тонкой очистки, установленных в КВОУ ГТУ;
- продлить ресурс работы фильтров грубой и тонкой очистки.

За расчетный период исследования был принят временной диапазон с 30.08.2010 г. по 06.09.2011 г. Газотурбинные установки №№1, 2, 4, 5 эксплуатировались с системами очистки различных производителей, использующих собственные инновационные технологии в разработке конструкции фильтроэлементов и фильтрационных материалов. В КВОУ ГТУ №№1, 2, 4, 5 применялись двух- и трехступенчатые системы фильтрации. Класс очистки финишной ступени на газовых турбинах №№1, 2 и 4 – F9, на турбине №5 – H10 в соответствии с последними рекомендациями компании Siemens для ГТУ типа SGT. Графическая интерпретация работ по заменам фильтроэлементов и проведения промывок ГТУ представлена на рис. 2.

Для анализа технической информации в виде дискретных значений параметров, в зависимости от времени, применялся метод приведения результатов к гарантийным условиям. Основой приведения служили значения, представленные в поправочных кривых для ГТУ SGT-800 (Siemens). В качестве базового варианта сравнения принята ГТУ №5 с трехступенчатой системой фильтрации. На ступени тонкой очистки впервые в России использовались кассетные фильтры типа НЕРА класса H10. Ресурс работы системы воздухоочистки полностью соответствует расчетному периоду исследования: 30.08.2010–06.09.2011 гг., наработка ГТУ №5 при этом составила 8331 ч.

Сравнение результатов основано на моделировании процесса выработки электрической мощности на четырех ГТУ с подачей одного и того же количества топлива на каждую из них, равного приведенному расходу ГТУ №5 (базовый вариант). При анализе систем фильтрации учитывался фактор загрязнения проточной части ГТУ, характеризующийся эффективностью очистки циклового воздуха в динамической модели.

Для наглядности все основные затраты электростанции, определяющие эффективность работы систем фильтрации, разнесены по статьям в соответствии с табл. 1. Результаты анализа работы систем фильтрации на ГТУ №№1, 2, 4, 5 представлены в табл. 2.

Процесс загрязнения проточной части ГТУ можно наблюдать на критических режимах работы агрегатов в условиях относительно высоких температур наружного воздуха при угле ВНА→тах. Поэтому на этих режимах – с достаточно низкой плотностью циклового воздуха, поступающего в компрессор, – массовый расход достигает минимально критических значений, при которых весь запас по производительности ГТУ полностью нивелируется.

Другим немаловажным фактором, усиливающим влияние загрязнения на снижение электрической мощности, является запыленность атмосферного воздуха. Именно в летний период работы ГТУ запас по производительности практически исчерпан, а концентрация пыли в сухую жаркую погоду максимальна.

Приведение эксплуатационных характеристик ГТУ за счет корректирующих поправок на основные воздействия (температура, давление, влажность, перепад давления на КВОУ и КУ, cosφ) при  $\alpha_{ВНА} \approx \text{тах}$  (80 % для SGT-800) позволяет оценить падение электрической нагрузки в зависимости от реального времени эксплуатации. Снижение мощности ГТУ №№1, 2, 4, 5 можно проследить по графикам на рис. 3а-г.

**Прокомментируем полученные результаты:  
ГТУ №1**

15.07.2011 г. на ГТУ произведена промывка компрессора и замена ступеней фильтрации

грубой очистки и влагоотделения. Уровень падения мощности в зависимости от времени характеризует эффективность работы системы фильтрации в целом углом наклона аппроксимирующей прямой. Из графика видно, что мощность ГТУ после промывки ее проточной части 15.07 возросла на 0,7 МВт и продолжила снижаться. За период с 1.06 по 31.08 загрязнение проточной части ГТУ-1 привело к недовыработке около 270 МВт·ч электроэнергии. Электростанция недополучила примерно 351000 р.

**ГТУ №2**

Аналогичная ситуация происходила на ГТУ-2 с использованием на ступени конечной очистки фильтроэлементов с классом очистки F9. ФГО и ФТО производителей 1 и 4 заменены фильтрами производителя 5. Мощность ГТУ после промывки проточной части 15.07 возросла на 0,8 МВт, загрязнение проточной части за период с 1.06 по 31.08 привело к недовыработке 486 МВт·ч электроэнергии, эквивалентной примерно 631800 р.

**ГТУ №4**

Промывка компрессора ГТУ проведена 22.07.2011 г., фильтры грубой и тонкой очистки производителя 5 не менялись (ФТО класса F9). Рассматривая тренд падения мощности в зависимости от времени до и после промывки, можно отметить, что угол наклона аппроксимирующей прямой сохранился, эффективность очистки при этом не изменилась.

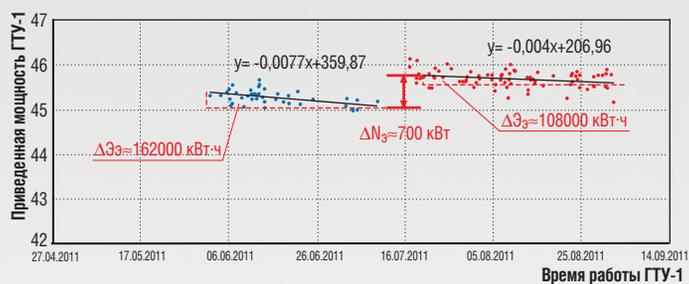
Табл. 2. Результаты анализа работы систем фильтрации на ГТУ №№1,2, 4, 5

Наименование затрат	Значения эксплуатационных затрат			
	ГТУ-1	ГТУ-2	ГТУ-4	ГТУ-5
Закупка системы фильтрации:				
ВЛО	$1,5 \times X_1^{\text{ВЛО}}$	$0 \times X_2^{\text{ВЛО}}$	$1,5 \times X_4^{\text{ВЛО}}$	$1,5 \times X_5^{\text{ВЛО}}$
ФГО	$1,4 \times X_1^{\text{ФГО}}$	$1,4 \times X_2^{\text{ФГО}}$	46 200 р.	$1 \times X_5^{\text{ФГО}}$
ФТО	$1,5 \times X_1^{\text{ФТО}}$	$1,5 \times X_2^{\text{ФТО}}$	$1,2 \times X_4^{\text{ФТО}}$	$1 \times X_5^{\text{ФТО}}$
	1 100 000 р.	1 050 000 р.	264 000 р. $1 \times X_4^{\text{ФТО}} \approx$ 900 000 р.	1 100 000 р.
Промывка проточной части ГТУ	$1 \times Y_1 = \text{н/д}$	$2 \times Y_2 = \text{н/д}$	$1 \times Y_4 = \text{н/д}$	$1 \times Y_5 = \text{н/д}$
Недовыработка электрической мощности, связанная с загрязнением проточной части ГТУ	Сравнение недовыработок электроэнергии, связанных с эффектом загрязнения и перепадом давления по ГТУ №1 и 2, с базовым вариантом (ГТУ №5) невозможно из-за отличия расходных характеристик и настроек по управлению турбины по отношению к ГТУ №4 и 5.		$\Delta \Theta_{34}^3 =$ 1938 МВт·ч	$\Delta \Theta_{35}^3 = 0,$ т.к. сравнение проводится с ГТУ-5
Недовыработка электрической мощности, связанная с ростом перепада давления на системе фильтрации КВОУ ГТУ	Однако применение на ГТУ №1 и 2 ФТО с классом очистки F9 позволяет судить, что эффекты $\Delta \Theta_{31}^3 / \Delta \Theta_{32}^3$ и $\Delta \Theta_{31}^c / \Delta \Theta_{32}^c$ соразмерны с $\Delta \Theta_{34}^3$ и $\Delta \Theta_{34}^c$		$\Delta \Theta_{34}^n =$ – 574 МВт·ч	$\Delta \Theta_{35}^c = 0,$ т.к. сравнение проводится с ГТУ-5
Недоотпуск электроэнергии, связанный с вынужденными остановами ГТУ для замены системы фильтрации или выполнения промывок	$\Sigma \Delta \Theta_{31}^{\text{вб}} = \text{н/д}$	$\Sigma \Delta \Theta_{32}^{\text{вб}} = \text{н/д}$	$\Sigma \Delta \Theta_{34}^{\text{вб}} = \text{н/д}$	$\Sigma \Delta \Theta_{35}^{\text{вб}} =$
Суммарные годовые затраты, млн рублей	$\Sigma Z_1 = 2,858$	$\Sigma Z_2 = 2,812$	$\Sigma Z_4 = 2,646$	$\Sigma Z_5 = 1,080$

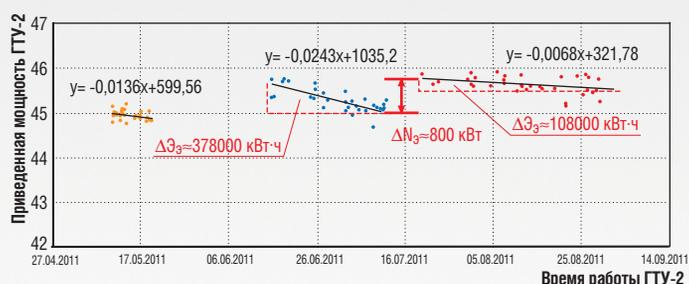
Наиболее экономичный вариант

Примечание: 1. Стоимость комплектов фильтроэлементов в п. 1 указана ориентировочно; 2. Отпускной тариф на электроэнергию принят 1,3 р./кВт·ч.

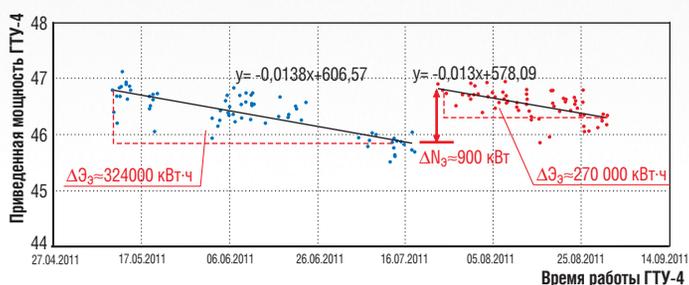
Рис. 3. Графики падения приведенной мощности на ГТУ-1, ГТУ-2, ГТУ-4, ГТУ-5  
Период исследования: май-август 2011 г.



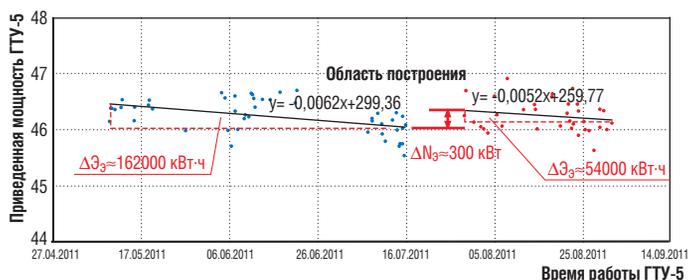
а)  $V_T=2,466-2,469$  кг/с,  $\alpha_{ВНА}>79$



б)  $V_T=2,657-2,66$  кг/с,  $\alpha_{ВНА}>79$



в)  $V_T=2,58-2,583$  кг/с,  $\alpha_{ВНА}>79$



г)  $V_T=2,567-2,569$  кг/с,  $\alpha_{ВНА}>79$

Мощность ГТУ после промывки проточной части 22.07 возросла на 0,9 МВт, загрязнение проточной части за период с 01.06 по 31.08 привело к недовыработке 594 МВт·ч электроэнергии, эквивалентной 772000 р.

#### ГТУ №5

Промывка компрессора выполнялась 22.07.2011 г. В качестве ступени тонкой очистки на этой турбине применялись фильтры класса НЕРА (Н10). Анализируя уровень падения

мощности в зависимости от времени, можно отметить, что угол наклона аппроксимирующей прямой до и после промывки существенно меньше углов, характеризующих степень снижения электрической мощности ГТУ №№1, 2, 4. Этот факт подтверждает целесообразность использования ФТО класса Н10 вместо F9. Мощность ГТУ после промывки проточной части возросла незначительно – на 0,3 МВт (если сравнивать с увеличением мощности после промывок на других турбинах), загрязнение проточной части ГТУ за период с 01.06 по 31.08 привело к недовыработке 216 МВт·ч электроэнергии, эквивалентной 280 000 р.

### Выводы

1. При выборе той или иной системы очистки циклового воздуха необходимо обязательно проводить технико-экономический анализ существующей системы фильтрации и руководствоваться не только стоимостью комплекта фильтрации, но и учитывать срок службы его работы и положительное влияние на показатели ГТУ.

2. Применение системы фильтрации с равномерно распределенным фильтрационным потенциалом и своевременная замена ФГО позволяют продлить ресурс работы ФТО в 2–3 раза. Срок службы ФГО определяется предельным значением перепада давления на ступени, при достижении которого дальнейшего увеличения перепада в процессе эксплуатации не происходит (5–7 мес. при эксплуатации в Москве). Предельное значение перепада давления может быть ниже рекомендуемого конечного перепада давления, указанного в паспортных данных на фильтры.

3. Установка системы фильтрации с более высоким классом очистки (НЕРА) является оправданным техническим решением, несмотря на ее относительно высокую стоимость по сравнению с системой класса F9.

4. Современные технологии в области фильтрации позволяют отказаться от промывок проточной части ГТУ (см. графики рис. 3а-г).

5. Эксплуатационные затраты, вызванные загрязнением проточной части ГТУ, вносят более существенный вклад в статью «упущенной выгоды», чем перепад давления на системе фильтрации. Недовыработка электроэнергии ГТУ №№1, 2, 4, связанная с загрязнением их проточной части, по отношению к ГТУ №5 составляет 1938 МВт·ч, а положительный эффект за счет более низкого перепада давления – 574 МВт·ч. В денежном эквиваленте преимущество «чистого компрессора» над влиянием перепада давления составляет:  $(1938-574) \cdot 1300 = 1,773$  млн рублей. **Д**