

УДК 621.433: 629.735.45

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ  
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Огренич Д.В., Лозовой А.А., Михайлов Д.А., Шейко Е.А., Пичко А.П.,  
Михайлов А.Н. (кафедра ТМ, кафедра МД, ДонНТУ, АГЗ МЧС ДНР, г. Донецк, ДНР)**  
Тел./Факс: +38 (071) 3060879; E-mail: tm@fimm.donntu.org

***Аннотация.** В представленной статье выполнен анализ структуры и особенностей работы газотурбинных установок нефтегазовой промышленности. Приведены структурные схемы этих установок и представлено выражение по определению структуры. А также в работе даны перспективные варианты структурных схем многокаскадных установок с выходным валом назад, вперед и со свободной турбиной.*

***Ключевые слова:** анализ, структура, варианты структурных схем, особенности работы, газотурбинные установки.*

**1. Введение**

В нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ) для выполнения различных технологических задач. В настоящее время они применяются в производстве электроэнергии совместно с газовой и паровой турбинами и совместном производстве тепла и электроэнергии, а также для обеспечения работы различного технологического оборудования компрессорных и насосных станций [1] (рис. 1 и рис. 2). В ряде случаев, для обеспечения работы технологического оборудования насосных и



Рис.1. Общий вид газотурбинной установки SGT 300 Tempest 7,9 МВт

компрессорных станций применяют авиационные [2], в том числе турбовальные [3], газотурбинные двигатели. При этом для рационального использования добываемых ресурсов, для ГТУ могут использоваться попутные нефтяные газы [4]. Это позволяет одновременно обеспечивать решение вопросов обеспечения энергетических проблем технологического оборудования и утилизации вредных выбросов газов.

Можно отметить, что в целом ГТУ состоит из множества функциональных

элементов, в том числе лопаток, предназначенных для выполнения эксплуатационных функций. При этом в ГТУ, в различных подсистемах, например, компрессоре или в зоне турбин, действуют различные эксплуатационные функции. К этим функциям можно отнести следующие: абразивно-эрозионные, коррозионные, температурные, химические и другие. Различные воздействия в подсистемах ГТУ приводят к возникновению в различных подсистемах своих особенностей разрушения лопаток. Например, в компрессоре преобладает абразивно-эрозионный износ лопаток, турбинные лопатки

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

испытывают химико-термические и абразивно-эрозионные разрушения, в камере сгорания действует другой комплекс эксплуатационных разрушений. Таким образом, в ГТУ по подсистемам реализуется своя интенсивность воздействий и действует определенная структура воздействий и разрушений.

Кроме того, наряду с неравномерностями действия эксплуатационных воздействий и разрушений по подсистемам ГТУ, происходит неравномерное воздействие и разрушение элементов каждой лопатки. Неравномерность действия эксплуатационных функций по элементам лопатки обусловлено пространственной формой пера лопатки, его пространственным расположением, кинематикой движения лопатки, особенностями движения газоздушного потока по тракту ГТУ, температурными воздействиями и наличием в потоке различных веществ, абразива, солей, кислот и тому подобного.

Таким образом, ГТУ представляет собой сложную систему, которая структурирована по подсистемам, а именно: компрессор, камера сгорания, турбина компрессора, сво-



Рис.2. Элементы газотурбинной установки SGT 300 Tempest

бодная турбина, турбокомпрессор, газогенератор. Представленная сложность структуры ГТУ и сложность действия эксплуатационных функций по подсистемам ГТУ приводит к неравномерному разрушению лопаток по подсистемам ГТУ. Это приводит к снижению структурной надежности ГТУ и его ресурса.

Целью данной работы является выполнение анализа и исследование структуры существующих и перспективных вариантов ГТУ для последующего решения вопросов обеспечения заданных параметров надежности этих установок на этапе их проектирования и эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей работы ГТУ в нефтегазовой промышленности; исследовать существующие и перспективные структурные варианты ГТУ; предложить математические выражения по определению структуры этих установок.

**2. Основное содержание и результаты работы**

В целом, ГТУ представляет собой двигатель внутреннего сгорания (рис. 2), работающий в соответствии с идеальным термодинамическим циклом Брайтона [3]. На практике, этот идеальный термодинамический цикл, конечно, отличается от реального термодинамического цикла работы ГТУ. Конструкция ГТУ состоит из трех основных частей (рис. 3):

- компрессора  $a_1$ ,
- камеры сгорания  $a_2$ ,
- турбины компрессора  $a_3$ .

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.  
ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

При запуске ГТУ воздух всасывается в компрессор через воздухозаборник с помощью системы пуска и передается в камеру сгорания, где он смешивается с топливом. Затем, после зажигания смеси высоковольтной искрой, происходит быстрый рост температуры в камере сгорания, что обеспечивает значительное увеличение объема и ско-

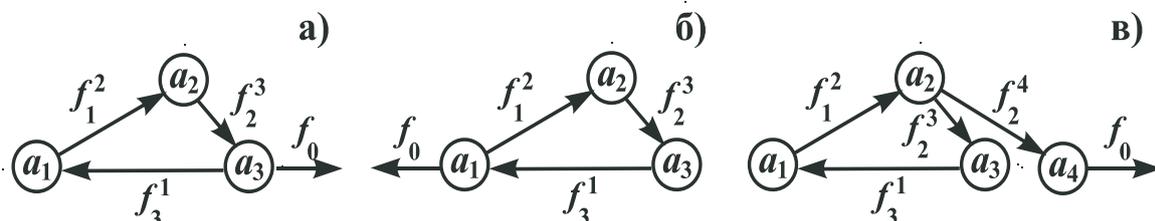


Рис.3. Структурные схемы ГТУ: а) с выходным валом назад; б) с выходным валом вперед; в) со свободной турбиной

рости газоздушного потока в тракте установки. За счет турбины компрессора выполняется вращение ротора компрессора, который создает необходимое давление в камере сгорания, в зоне турбины компрессора и в зоне рабочей (свободной) турбины, с помощью которой реализуется крутящий момент на ведущем валу ГТУ. Газоздушная смесь, в зоне турбин, расширяется, отбирается из нее тепло и передается в устройство выхлопа.

Отбор мощности в ГТУ выполняется по трем схемам (рис. 3):

- с выходным валом назад (рис. 3, а);
- с выходным валом вперед (рис. 3, б);
- со свободной турбиной (рис. 3, в).

Между элементами структуры (рис. 3) действуют связи  $f_i^j$ . В целом структуру ГТУ можно представить следующим выражением:

$$Str_{ГТУ} = \{A, F\}, \quad (1)$$

где  $Str_{ГТУ}$  – структура ГТУ;

$A$  – множество подсистем структуры ГТУ;

$F$  – множество связей между подсистемами ГТУ.

В выражении (1) множества состоят из следующих подмножеств:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\};$$

$$F = \{f_1^2, f_2^3, f_3^1, \dots\},$$

где  $a_i$  – любой  $i$ -й структурный элемент множества  $A$ ;

$f_i^j$  – связь между подсистемами структуры, а именно  $a_i$ -й подсистемы действующей на  $a_j$ -ю подсистему.

На рис. 3 представлены однокаскадные ГТУ, при этом на практике используются и двухкаскадные ГТУ. В этом случае, турбокомпрессор выполняется в виде двух каскадов лопаток турбины и компрессора. На рис. 4 представлены возможные варианты структурных схем многокаскадных ГТУ. Здесь показано: на рис. 4, а – с выходным валом назад, на рис. 4, б – с выходным валом вперед, на рис. 4, в – со свободной турбиной.

Можно отметить, что многокаскадные компрессоры обеспечивают степень сжатия более, чем 30:1. Компрессоры в ГТУ могут быть двух типов, центробежные и/или осевые. Обычно, центробежные компрессоры применяются для небольших ГТУ для

обеспечения их компактности и жесткости. Они создают степень сжатия до 10:1 на одной ступени (для одного каскада). Центробежные компрессоры ГТУ дешевле и проще в

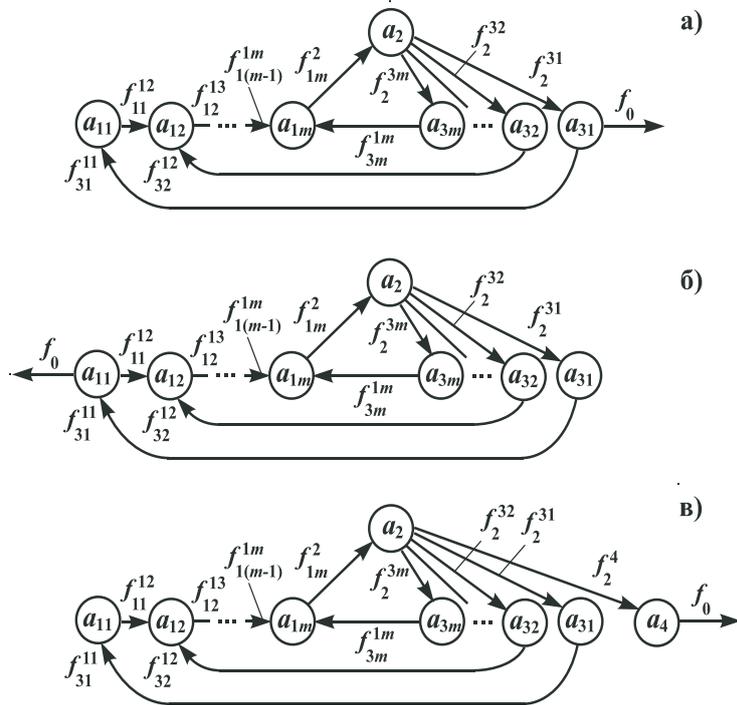


Рис. 4. Варианты структурных схем многокаскадных ГТУ: а – с выходным валом назад, б – с выходным валом вперед, в – со свободной турбиной

При этом выходные валы отбора мощности в ГТУ могут монтироваться назад (рис. 4, а) и вперед (рис. 4, б). Структурный вариант ГТУ со свободной турбиной (рис. 4, в) применяется в тех случаях, когда ГТУ имеют большой пусковой момент, динамические нагрузки и другие сложные параметры эксплуатации.

В целом газогенератор обеспечивает работу ГТУ в соответствии с идеальным термодинамическим циклом Брайтона (рис. 5).

На рис. 5 показана диаграмма идеального цикла Брайтона [5, 6]. Здесь, приведены данные для степени повышения давления  $\pi_{сж} = p_b/p_a = 12$ , максимальной температуры цикла  $T_c = 1600$  К и температуры начала сжатия  $T_a$  и степени повышения температуры  $\theta_{ц} = 1,73$ . Получаемая при этом работа  $L_{уд}$  является удельной, поскольку цикл рассматривается для 1 кг массы рабочего тела. Она соответствует выделенной темным цветом площади рис. 5, которая равна разности работ в турбине (турбинах) и сжатия в компрессоре.

На основании диаграммы рис. 5, для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газозвдушного потока проточной части в соответствии с кривой А-В. Однако, на практике идеальный цикл всегда отличается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый комплекс различных параметров. Важнейшие из них это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора, лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором. С увеличением зазоров проточной части компрессора снижаются все пара-

а) изготовлении, у них более простая балансировка ротора, а также они обеспечивают возможность создания высоких частот вращения ротора (до 100000 об/мин). Осевые компрессоры способны обеспечивать степень сжатия 30:1 и более. При этом повышение рабочих характеристик компрессоров приводит к усложнению управления воздушным потоком, причем с увеличением степени сжатия повышается вероятность срыва потока и помпажа. Для исключения этих явлений дополнительно вводятся специальные устройства для управления потоком воздуха по тракту ГТУ и для обеспечения его устойчивой работы. Особенно это необходимо во время пуска ГТУ и ее работы на нештатных режимах.

метры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и элементами проточной части компрессора происходит в основном из-за эрозионно-абразивного их

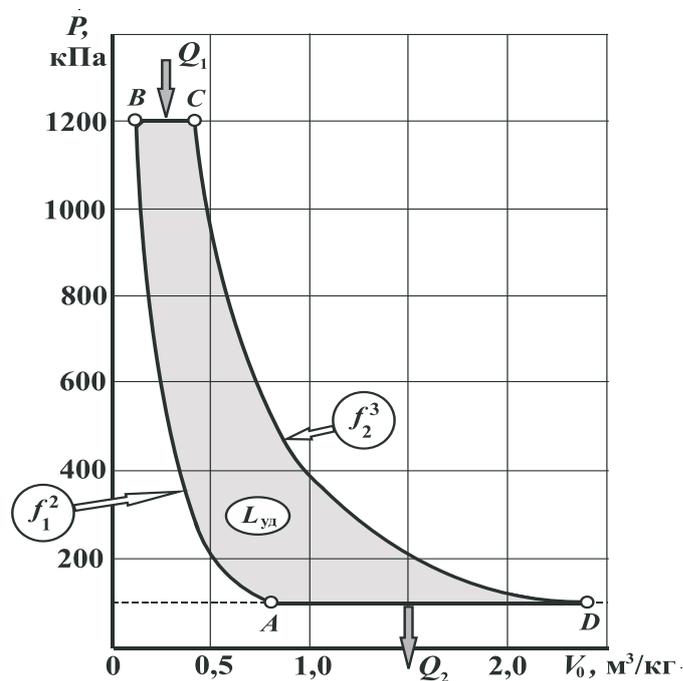


Рис.5. Диаграмма идеального цикла Брайтона для ГТУ

ют возможность в перспективе установить закономерности этих связей и вести управление ими для достижения необходимых параметров структурной надежности на этапах проектирования и выполнения процессов восстановления работоспособности ГТУ при эксплуатации и ремонтах.

**Список литературы:** 1. Корж, В. В. Эксплуатация и ремонт оборудования насосных и компрессорных станций: учеб. пособие [Текст] / В. В. Корж, А. В. Сальников. – Ухта: УГТУ, 2010. – 184 с. 2. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал [Текст]. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 4 (145). – 182 с. 3. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с. 4. Рыбаков, Б. А. Особенности сжигания попутного нефтяного газа в газотурбинных установках [Электронный ресурс] / Б. А. Рыбаков [и др.] // Турбины и дизели. – Май-июнь 2008. – С. 2-8. Режим доступа: [www.turbine-diesel.ru](http://www.turbine-diesel.ru). 5. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. - Донецк, 2016. - 22 с. 6. Пичко, А. П. К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 2 (61). - С. 64 - 74.

износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий. При этом увеличение зазоров между лопатками турбины ротора и лопатками статора происходит из-за эрозионно-абразивного их износа, термохимических процессов и других явлений.

### 3. Заключение

В заключение можно отметить, что в представленной работе рассмотрены вопросы анализа особенностей работы ГТУ в нефтегазовой промышленности. Приведены существующие и перспективные структурные варианты ГТУ, что позволяет установить состав элементов, подсистем установок и определить связи между ними. А также в работе предложены математические выражения по определению структуры этих установок.

Полученные результаты да-