

УДК 621.438.001.57

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-8-243-83-86

*А. А. Яковлев, С. Г. Поступаева, В. Н. Гребенников, Н. В. Федорова*

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ ЭВРИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ**

**Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: yaa\_777@mail.ru, posvetlana@mail.ru

Разработана логико-математическая модель для представления физических принципов действия технических систем с жидким и газообразным рабочим телом. Приведен пример моделирования газотурбинной двухвальной установки. Предложены способы эвристической модификации для разработки улучшенных моделей физического принципа действия.

*Ключевые слова:* физический принцип действия; модель физического принципа действия; рабочее тело; техническая система; функция элемента; эвристический прием; технология разработки технической системы.

---

© Яковлев А. А., Поступаева С. Г., Гребенников В. Н., Федорова Н. В., 2020.

*A. A. Yakovlev, S. G. Postupaeva, V. N. Grebennikov, N. V. Fedorova*

**DEVELOPMENT OF TECHNICAL SYSTEMS  
BASED ON HEURISTIC MODELING  
OF THE PHYSICAL OPERATION PRINCIPLE**

**Volgograd State Technical University**

A logical-mathematical model has been developed to represent the physical principles of the operation of technical systems with a fluid and gas working body. Example of modeling a gas turbine twin-shaft installation. Heuristic modification methods for developing improved models of the physical principle of action are proposed.

*Keywords:* physical operation principle; model of the physical principle of action; working body; technical system; element function; heuristic technique; technology development technical system.

Особенностью научно-технического прогресса в области создания новых технических систем (ТС) в промышленности является опережение меры сложности создаваемых изделий по сравнению с методами и технологиями их проектирования.

Наиболее остро эта проблема проявляется на начальных этапах проектирования – этапах технического предложения и эскизного проекта, когда принимаются основополагающие решения о принципе действия, структуре и компонентном составе проектируемого изделия, проводится всесторонняя оценка всех возможных вариантов его создания, а также осуществляется комплексная разработка всего изделия в общих и наиболее важных чертах.

Поставленная проблема в полной мере касается начальных этапов проектирования ТС с жидким и газообразным рабочим телом.

В связи с этим, формализация разработки ТС с жидким и газообразным рабочим телом с помощью использования новых методов инженерного анализа и технологий проектирования, позволяющих в дальнейшем разрабатывать соответствующее программное обеспечение для компьютерной поддержки этапов технического предложения и эскизного проекта, является актуальной задачей.

Большинство из современных методов проектирования основано на использовании моделей ФПД, отражающих физические процессы в проектируемой системе [1]. Анализ показал, что существующие методы являются узкоспециализированными и направлены на частные предметные области. Они учитывают характерную для каждой области техники специфику и особенности, и позволяют инженерам получить передовые технические решения. Однако их теоретические положения не могут быть использованы для получения общих методических рекомендаций для проектирования ТС, что требуется для разработки универсальных автоматизированных систем поддержки принятия реше-

ний на начальных этапах проектирования.

В рамках исследования был проведен анализ взятой за прототип модели ФПД инженерно-физического метода, основанной на понятийном аппарате теории сложных термодинамических систем. Данная модель подробно описана в работе [2] и, как показал анализ, в наибольшей степени соответствует математическому и дескриптивному описанию процессов, осуществляемых в большинстве ТС. В ней отражены перемещения рабочего тела внутри устройства, предусмотрена возможность указания очередности взаимодействий и перемещений рабочего тела, а также особенности конструктивной организации проектируемого изделия. Кроме того, учитываются следующие признаки: агрегатное состояние рабочего тела (жидкое, газообразное, комбинация жидкости и газа); наличие фазового перехода для рабочего тела в двух фазовых состояниях; замкнутость или разомкнутость маршрута рабочего тела; стационарность физических процессов.

В качестве примера для моделирования ФПД на рис. 1 показана схема газотурбинной двухвальной установки, а на рис. 2 представлен ее граф модели ФПД, который отражает процесс взаимного преобразования энергии.

Вершины графа ФПД помечаются латинской буквой  $v$ , с верхним и нижним индексами. Индексы обозначают состояние рабочего тела и порядковый номер характерной точки соответственно:  $v_1^1$  – воздух в компрессоре низкого давления;  $v_2^2$  – воздух в воздухоохладителе;  $v_3^3$  – воздух в компрессоре высокого давления;  $v_4^4$  – воздух в регенераторе;  $v_5^5, v_5^6$  – топливо-воздушная смесь и продукты сгорания в камере сгорания высокого давления;  $v_6^7$  – рабочее тело в турбине высокого давления;  $v_7^8, v_7^9$  – топливо-воздушная смесь и продукты сгорания в камере сгорания низкого давления;  $v_8^{10}$  – рабочее тело в турбине низкого давления;  $v_9^{11}$  – выхлопные газы в регенераторе;  $v_{10}^{12}, v_{11}^{13}$  – топливо в топливных насосах.

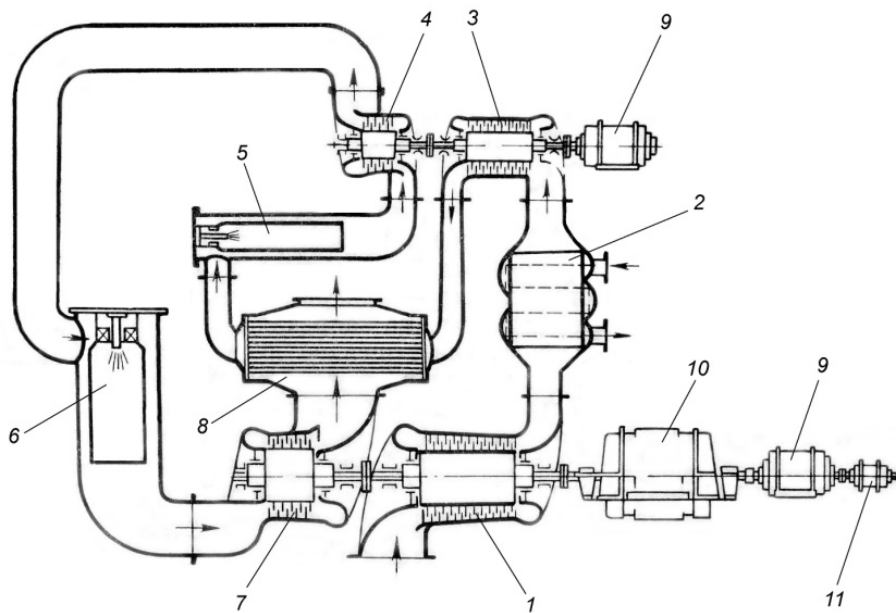


Рис. 1. Схема газотурбинной двухвальной установки:

1 – компрессор низкого давления; 2 – воздухоохладитель; 3 – компрессор высокого давления; 4 – турбина высокого давления; 5 – камера сгорания высокого давления; 6 – камера сгорания низкого давления; 7 – турбина низкого давления; 8 – регенератор; 9 – генератор; 10 – редуктор; 11 – пусковой мотор

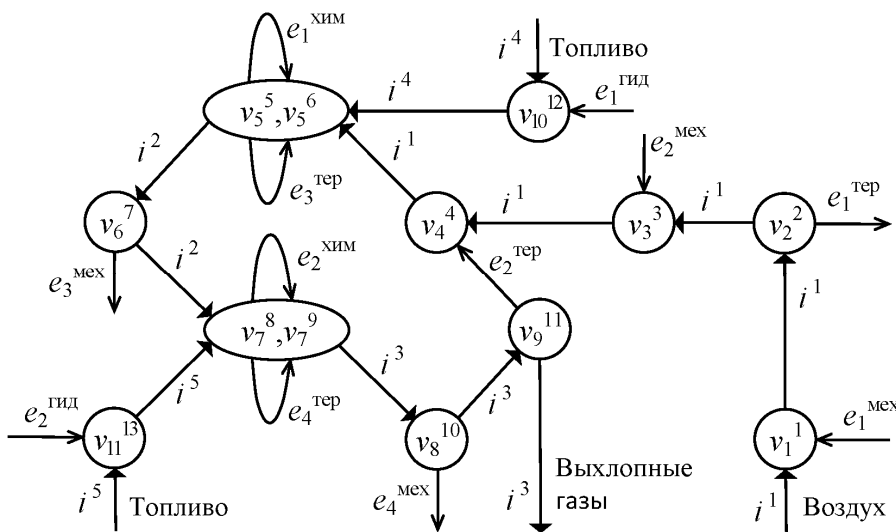


Рис. 2. Граф модели ФПД газотурбинной двухвальной установки

Дуги, обозначающие взаимодействия, помечаются латинской буквой  $e$ , также имеющей верхний и нижний индексы. Верхний индекс обозначает род взаимодействия, нижний – порядковый номер взаимодействия.

Маршрутные дуги показывают потоки (перемещения) рабочего тела и помечаются буквой  $i$ . Верхний индекс обозначает различные фазовые состояния или химический состав компонентов рабочего тела, нижний индекс – порядковый номер потока рабочего тела.

Целью построения моделей ФПД является получение новых, более эффективных технических решений ТС. В связи с этим важной задачей является разработка механизмов модификации этих моделей, то есть сформулировать рациональные операции над ними.

Анализ фондов эвристических приемов [3] показывает, что для модификаций моделей ФПД содержащиеся в них приемы следует классифицировать в соответствии с пространством переменных и множеством операций, ко-

торые характеризуют эту модель. Для этого необходимо провести сопоставление эвристических приемов с математическими операциями над графами и классифицировать эвристические приемы в соответствии с этими операциями. Кроме того, представляется целесообразным изменить формулировку части эвристических приемов с целью их более удобного использования для преобразования топологии графов ФПД.

*Модификация модели путем добавления ребра.* Добавление ребра  $e$  в граф  $G_1(V_1, E_1)$  (обозначение –  $G_1(V_1, E_1) + e$ , при условии  $e \notin E_1$ ) дает граф  $G_2(V_2, E_2)$ , где

$$V_2 := V_1 \ \& \ E_2 := E_1 \cup \{e\}.$$

Примерами таких операций над графом модели ФПД являются следующие эвристические приемы: отделить вредные или нежелательные примеси от вещества; разделить движущийся поток на два или несколько; соединить однородные или предназначенные для смежных операций объекты и др.

*Модификация модели путем удаления ребра.* Удаление ребра  $e$  из графа  $G_1(V_1, E_1)$  (обозначение –  $G_1(V_1, E_1) - e$ , при условии  $e \in E_1$ ) дает граф  $G_2(V_2, E_2)$ , где

$$V_2 := V_1 \ \& \ E_2 := E_1 \setminus \{e\}.$$

Такая операция над графом ФПД осуществляется использованием следующих эвристических приемов: исключить взаимодействие при сохранении объектом всех прежних функций; исключить канал перемещения рабочего тела при сохранении объектом всех прежних функций; вывести элементы, подверженные действию вредных факторов, за пределы их действия и др.

*Модификация модели путем добавления вершин.* Добавление вершины  $v$  в граф  $G_1(V_1, E_1)$  (обозначение –  $G_1(V_1, E_1) + v$ , при условии  $v \notin V_1$ ) дает граф  $G_2(V_2, E_2)$ , где

$$V_2 := V_1 \cup \{v\} \ \& \ E_2 := E_1.$$

Такая операция над графом осуществляется при использовании следующих эвристических приемов: присоединить к объекту новый элемент, находящейся в рабочей среде или в контакте с ней; добавить механическое, электрическое, тепловое, электромагнитное, химическое взаимодействия, а также других эвристических приемов.

*Модификация модели путем удаления вершин.* Удаление вершины  $v$  из графа  $G_1(V_1, E_1)$

(обозначение –  $G_1(V_1, E_1) - v$ , при условии  $v \in V_1$ ) дает граф  $G_2(V_2, E_2)$ , где

$$V_2 := V_1 \setminus \{v\} \ \& \ E_2 := E_1 \setminus \{e = (v_1, v_2) \mid v_1 = v \vee v_2 = v\}.$$

Такая операция осуществляется при использовании следующих эвристических приемов: Исключить наиболее напряженный (нагруженный) элемент. Исключить элемент при сохранении объектом всех прежних функций. Убрать «лишние детали», чтобы один элемент выполнял несколько функций, благодаря чему отпадает необходимость в других элементах и т. п.

Методика эвристической модификации моделей ФПД была успешно использована для получения новых способов и технических решений систем для охлаждения инструмента на различных металлорежущих станках [4–6] и может быть рекомендована и для других классов ТС с жидким и газообразным рабочим телом.

В результате проведенного исследования разработана новая логико-математическая модель для представления физических принципов действия технических систем с жидким и газообразным рабочим телом.

Разработанная модель ФПД позволяет: опделить функции элементов проектируемой системы; получить некоторое множество вариантов конструктивной реализации будущего изделия; выбрать лучшие варианты с помощью ЭВМ по заданным показателям качества.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nam, G. Conceptual design of passive containment cooling system for APR-1400 using multipod heat pipe / G. Nam, J. Park, S. Kim // Nuclear Technology. – 2015. – Vol. 189. – № 3. – P. 278–293.
2. Яковлев, А. А. Разработка множеств технических решений установок для преобразования энергии : монография / А. А. Яковлев. – М., 2007. – 127 с.
3. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / под ред. А. И. Половинкина. – М. : Радио и связь, 1981. – 344 с.
4. Яковлев, А. А. Разработка технического решения устройства для охлаждения зоны резания фрезерного станка методом поискового конструирования / А. А. Яковлев, Е. Г. Крылов, В. С. Сорокин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 3 (696).
5. Пат. 2367556 РФ, МПК В 23 Q 11/10. Способ подачи смазочно-охлаждающих технологических средств / А. А. Яковлев, В. М. Труханов, Е. В. Яковлева ; ВолгГТУ. – 2009.
6. П. м. 154326 РФ, МПК В23Q11/10. Устройство для подачи смазочно-охлаждающего технологического средства / А. А. Яковлев, С. Н. Мишустина, В. С. Сорокин, О. А. Мишустин ; ВолгГТУ. – 2015.