

7. Serebrjakov M. Je. Interior ballistics barrel systems and propellant rockets (in Russian). – Moskva : Oborongiz, 1962. – 703 p.

8. Kadaňka V. Interior ballistics of barrel guns (in Czech). – Prague : Naše vojsko, 1985. – 344 p.

9. Kodym P., Kusák J. Ballistics (in Czech). – Brno : VAAZ, 1976. – 160 p.

10. Textbook of Ballistics and Gunnery. (in English). – Vol. 1. – Part I. Basic Theory. – London : Her Majesty's Stationary Office, 1987. – 804 p.

Ян Штрба, инж., Тренчинский университет им. Александра Дубчека, Словацкая Республика, Пардубицкий Университет, Чешская Республика

Ян Кузак, профессор, инж., Prototypa-ZM, Ltd Company, Брно, Чешская Республика

К вопросу о модификации геометрических параметров поверхностно-необработанного пироксилинового пороха с семью каналами

Расчет характеристик внутренней баллистики при использовании пироксилинового пороха с семью каналами в сборном патроне может быть применен для специальной техники и специальных снарядов (патронов). Точность расчета характеристик внутренней баллистики влияет на принятие конструктивных решений для специальной техники и военного снаряжения; основная область применения – оборонная специальная техника и военное снаряжение вооруженных сил. Полученные зависимости дают более точные и простые в применении геометрические характеристики необработанного пороха с семью каналами.

Ключевые слова: внутренняя баллистика, характеристики внутренней баллистики, военное снаряжение, оружие, пироксилиновый порох.

УДК 517.9:621.45

А. В. Алиев, доктор физико-математических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Е. В. Мерзляков, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Рассматривается методика расчета температурного режима внутри шумотеплозащитного кожуха газоперекачивающего агрегата. Методика основана на решении пространственных уравнений газовой динамики и позволяет учесть местоположение отдельных модулей агрегата внутри кожуха. Верификация методики осуществлена сравнением расчетов с результатами экспериментов.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, охлаждение, математическая модель, метод крупных частиц.

Современные газоперекачивающие агрегаты (ГПА) – сложные технические объекты. Так, в типовую конструкцию ГПА (рис. 1, [1]) входят газотурбинный двигатель с улиткой 1, воздухопроводы 2, по которым в кожух шумотеплоизоляционный (КШТ) 8 подается охлаждающий газ; 3 – пол КШТ, ящик 4 агрегата зажигания, фундамент рамы двигателя 5, защитный экран 6, улитка 7 выхлопного устройства ГПА.

Надежная работа ГПА в значительной степени определяется температурным режимом внутри КШТ газоперекачивающего агрегата. Предельная температура воздушной массы внутри КШТ составляет 120...130 °С. Превышение этой температуры приводит к перегреву конструкции газотурбинной установки (ГТУ) и к необходимости ее останова. Регулирование температуры внутри КШТ обеспечивается изменением массоприхода воздуха, нагнетаемого из окружающей среды в объем КШТ по воздухопроводам 2. Анализ показывает, что массоприход нагнетаемого воздуха не единственный способ регулирования температуры внутри КШТ. Важными представляются и мероприятия, связанные с компоновкой в составе

ГПА воздухопроводов 2, улиток 1, 7 и др. Из-за высокой стоимости экспериментальных исследований, позволяющих установить влияние перечисленных факторов на температурный режим внутри КШТ, для решения задачи представляется целесообразным использовать технологию математического моделирования.

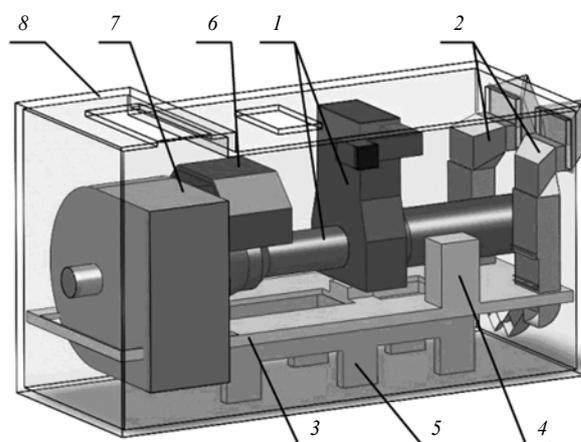


Рис. 1. Типовая конструкция ГПА

Математическая модель процессов охлаждения конструкции ГПА строится при следующих основных допущениях:

– для определения характеристик воздуха в объеме КШТ используются газодинамические уравнения в форме Эйлера [2];

– тепловые потоки, поступающие от нагретого корпуса газотурбинной установки в объем КШТ, устанавливаются по результатам выполненных экспериментов и учитываются граничными условиями;

– теплообмен в объеме КШТ происходит в ламинарном режиме, при этом коэффициент теплоотдачи α от прогретого корпуса газотурбинной установки к охлаждающему воздуху пропорционален скорости u воздуха $\alpha \sim u^{0,5}$ [3].

При записи уравнений газовой динамики для объема КШТ целесообразно использовать декартову систему координат. Это связано с необходимостью перестройки расчетной области при изменении компоновки модулей ГПА, и алгоритмы перестройки в декартовой системе координат представляются наиболее простыми. Для получения стационарного решения уравнений будем использовать метод установления. В этом случае уравнения газовой динамики записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \rho v + \frac{\partial}{\partial z} \rho w &= 0; \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho u^2 + \frac{\partial}{\partial y} \rho u v + \frac{\partial}{\partial z} \rho u w &= -\frac{\partial p}{\partial x}; \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho u v + \frac{\partial}{\partial y} \rho v^2 + \frac{\partial}{\partial z} \rho v w &= -\frac{\partial p}{\partial y}; \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho u w + \frac{\partial}{\partial y} \rho v w + \frac{\partial}{\partial z} \rho w^2 &= -\frac{\partial p}{\partial z}; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho u (E + p/\rho) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \rho v (E + p/\rho) + \frac{\partial}{\partial z} \rho w (E + p/\rho) &= 0; \\ p &= \rho(k-1)(E - 0,5 \cdot (u^2 + v^2 + w^2)). \end{aligned}$$

В записанных уравнениях (сохранения массы, количества движения, энергии и уравнение состояния) приняты следующие обозначения:

t, x, y, z – время и пространственные координаты;

p, ρ, E – давление, плотность и полная энергия воздуха;

u, v, w – составляющие скорости воздуха по пространственным координатам;

k – показатель адиабаты.

Решение газодинамических уравнений осуществляется методом крупных частиц [4] с модификацией эйлера этапа [5]. Суть модификаций состоит в расчете значений давления на границах крупных частиц по формулам, справедливым для слабого разрыва газодинамических параметров или с использо-

ванием инвариантов Римана [6]. В [5] отмечается, что применение такой модификации позволяет существенно повысить устойчивость вычислительных алгоритмов метода крупных частиц вплоть до чисел Куранта, близких к единице. Это особенно важно при решении задач в областях с малыми скоростями газа. В конструкциях ГПА максимальные значения скоростей в объеме КШТ как правило не превосходят 30 м/с, что соответствует числам Маха $M < 0,1$.

Созданный программный комплекс, обеспечивающий расчет процессов в объеме КШТ, ориентирован на применение персональных вычислительных машин (ПЭВМ) максимальной мощности. Верификация программного комплекса и принятой математической модели выполнялась сравнением расчетных результатов с имеющимися экспериментальными результатами. Верификация выполнялась на примере газоперекачивающего агрегата ГПА 25 Р-ПС «Урал» (габаритные размеры кожуха шумо-теплозащитного 6954 м × 3800 м × 4750 м). Охлаждение газотурбинной установки осуществлялось воздухом из окружающей атмосферы, температура которого составляла -10 °С. Скорость воздуха во входном сечении воздуховода принималась ~ 10 м/с. Сопrotивление в выходном тракте ГПА согласно выполненным замерам составляло 647 Па. Суммарное тепловое выделение от газотурбинной установки, с учетом утечек горячего воздуха из ГТУ в объем КШТ, принималось на уровне 970...1006 кВт. В исходных данных учитывалась неравномерность поступающего от корпуса ГТУ теплового потока (максимальное выделение тепла происходит в районе камеры сгорания и улитки). При расчете лучистого теплообмена степень черноты поверхности корпуса ГТУ ϵ_w принималась $\epsilon_w \approx 0,35$. Для других поверхностей конструкции ГПА принималась $\epsilon_w \approx 0,7$.

Выполненные расчеты показали, что приемлемые для практики результаты обеспечиваются при разбиении расчетной области на $32 \times 40 \times 80$ элементарных объема и более. Применялась дополнительная детализация расчетной сетки в областях между полом и боковыми стенками КШТ, между улиткой и задней стенкой КШТ, в области дополнительного разделяющего воздуховода, смонтированного в КШТ.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных результатов, соответствующих установившемуся режиму работы ГПА, представлены в табл. 1 и 2. В табл. 1 приводятся значения скорости воздуха в трех наиболее важных сечениях ГПА – над улиткой, над камерой сгорания ГТУ и у агрегата зажигания. В табл. 2 приводятся значения температуры воздуха в тех же сечениях ГПА.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, 2, показывает, что отличие скоростей и температур воздуха в расчетах и экспериментах составляет от 5 до 17 %. С учетом сложности решаемой задачи такой результат можно считать приемлемым. Кроме того следует заметить, что разработанная методика позволяет правильно планировать мероприятия, обеспечивающие выбор теплового режима работы ГПА.

Таблица 1. Скорость воздуха в сечениях ГПА, м/с

Скорость воздуха на входе	Скорость воздуха над улиткой		Скорость воздуха над камерой сгорания		Скорость воздуха у агрегата зажигания	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
10,0	4,29	4,03	3,68	3,03	0	0,32
5,0	1,86	1,89	1,59	1,51	0	0,24

Таблица 2. Температура воздуха в сечениях ГПА, °С

Скорость воздуха на входе, м/с	Температура воздуха над улиткой		Температура воздуха над камерой сгорания		Температура воздуха у агрегата зажигания	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
10	35,0	42,4	-6,0	-6,25	32,0	28,0

В последние годы в практике сложных вычислительных расчетов применяются специализированные пакеты прикладных программ, одним из которых является пакет SolidWorks [7]. К достоинствам пакета SolidWorks следует отнести следующие:

- удобство построения оптимальной расчетной области, в том числе при изменении компоновки отдельных модулей внутри объема КШТ;
- простота задания начальных и граничных условий;
- богатые возможности по представлению результатов расчетов и по их анализу.

Проведенные расчеты для ГПА показали, что результаты, получаемые по разработанному пакету программ, основанному на применении метода крупных частиц, и результаты, получаемые с использованием пакета SolidWorks, обеспечивают примерно одинаковые по точности результаты.

Библиографические ссылки

1. Трусов П. В., Чарнецов Д. А., Печенкина А. М. Исследование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
2. Валландер С. В. Лекции по гидроаэромеханике. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1978. – 296 с.
3. Теплотехника : учебник для вузов / под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 792 с.
4. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц. Вычислительный эксперимент. – М. : Наука, 1982. – 392 с.
5. Алиев А. В., Блинов Д. С. Решение газодинамических задач в областях сложной формы с использованием конечно-объемных алгоритмов метода крупных частиц // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 1(41). – С. 151–154.
6. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений. – М. : Наука, 1978. – 688 с.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation. – М. : Изд-во ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

A. V. Aliev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
E. V. Merzlyakov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Modeling of Gas-Dynamic Processes in Cooling Systems of Gas Pumping Units

The design procedure of a temperature mode inside a noise-heat-protective casing of a gas pumping unit is considered. The procedure is based on solution of spatial equations of gas dynamics and it allows to consider the location of separate modules of the unit inside the casing. The procedure is verified by comparison of calculations with experimental results.

Key words: gas pumping unit, cooling, mathematical model, particle-in-cell method.