

УДК 621. 1. 076 - 627. 7

О.М. БУГАЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ГТД И ТРЕХФАЗНОГО РАЗГОННОГО СОПЛА

Рассмотрен вопрос создания математической модели установки, которая включает в себя термогазодинамический модуль, характеризующий работу газогенератора, а также модуль многофазного разгонного устройства – сопла. Представлена термогазодинамическая модель газогенератора на основе авиационного двигателя. Разработана структура программы реализующей математическую модель расчета трехфазного сопла, а также структура программного комплекса, реализующего поэлементную математическую модель установившихся режимов ГТД. Предлагаемая модель реализована в форме алгоритма и соответствующего программного обеспечения. Разработана программа моделирования совместной работы ГТД и трехфазного разгонного сопла. Сделаны выводы.

Ключевые слова: моделирование, параметры, математическая модель, газовый поток, программа, газотурбинный двигатель.

Введение

В настоящее время нефть и продукты ее переработки являются одними из самых существенных загрязнителей, нарушающих экологию окружающей природной среды. Одним из направлений защиты окружающей среды является локализация пролитой нефти и сбор ее с помощью различных видов сорбентов и биодеструкторов.

Технология очистки воды от нефтепродуктов включает в себя распределение тонкодисперсных сорбционных материалов на большой поверхности с последующим их сбором. Для более тонкой очистки поверхности воды, а также почвы возможно введение в загрязняющую среду водной суспензии, препарата, содержащего нефтеокисляющие бактерии.

Применение перечисленных сорбентов и биосорбентов для рекультивации почв и водоемов, загрязненных нефтепродуктами, требуют затрат больших денежных средств, а их доставка и распределение на большие загрязненные поверхности в течение короткого времени представляют значительные трудности.

Нами была предложена, разработанная в ХАИ, многоцелевая установка, которая позволяет решить задачу очистки территории, загрязненной нефтепродуктами [1]. В ее состав входят следующие модули: газотурбинный двигатель (ГТД) и многофазное разгонное устройство.

Задача ГТД – формирование газового потока, являющегося несущей фазой, с заданными параметрами в выходном устройстве. Трехфазный поток в выходном устройстве формируется газовым пото-

ком двигателя, твердыми частицами, представляющими собой различные виды сорбента и жидкостью.

Постановка задачи

Как уже отмечалось ранее, главным назначением исследуемого многофазного газогенератора является доставка различных типов сорбентов, а также биодеструкторов в зону загрязнения нефтепродуктами. Несущая фаза - газовый поток газотурбинного двигателя установки – может иметь температуру более 673 К. Не все разновидности сорбентов, и тем более биодеструкторов, могут выдержать такую температуру даже кратковременно, без изменения своих сорбционных свойств. В качестве холодной несущей фазы разгонного устройства возможно применение воздуха, отбираемого от компрессора газотурбинного двигателя. Однако применение «холодного сопла» не может обеспечить формирование мощных многофазных потоков вследствие того, что возможности изменения гидравлического сопротивления канала в линии отбора воздуха от компрессора ограничены условиями устойчивой работы компрессора.

Одним из вариантов снижения температуры газового потока является подача в камеру смешения разгонного устройства небольшого количества воды, которая частично снижает температуру газовой фазы, однако при определенном коэффициенте инжекции уменьшает дальнобойность многофазного потока. Другой вариант состоит в выборе определенного режима работы установки, возможно, нерасчетного, который в сочетании с первым вариан-

том обеспечит как необходимую температуру газовой фазы, так и необходимую дальность доставки биодеструктора в зону загрязнения нефтепродуктами, например водной акватории.

В связи с этим нами была разработана математическая модель установки [2], обеспечивающая расчет параметров потока, как на расчетном, так и на нерасчетных режимах ее работы, с учетом изменения режима работы установки, а также внешних климатических условий.

Математическая модель установки включает в себя термогазодинамический модуль, характеризующий работу газогенератора, а также модуль многофазного разгонного устройства – сопла.

Для разработки термогазодинамической модели установки воспользуемся подходом к моделированию ГТД, изложенной в работе [3], выявим и учтем особенности моделирования созданной нами установки, связанные с совместной работой турбокомпрессора и многофазного разгонного устройства.

Обобщенная схема проточной части многофункционального газогенератора представлена на рис. 1, номера сечений которого включает: входное устройство, осевой или центробежный компрессор, камеру сгорания, одноступенчатую или двухступенчатую турбину и сопло, в рассматриваемом случае это многофазное разгонное устройство.

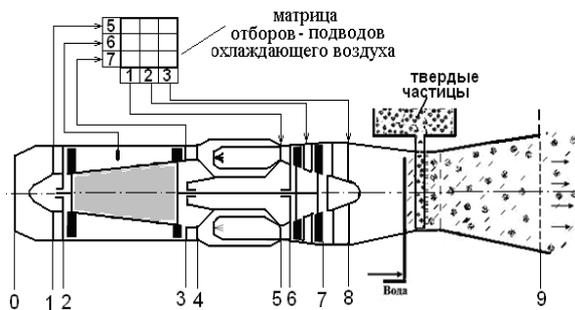


Рис. 1. Схема проточной части многофункционального газогенератора с одновальным ТК и «горячим» разгонным устройством

Для рассматриваемой установки (рис. 1) имеем пять независимых переменных и две степени свободы, поэтому получим следующую систему уравнений:

– невязка между мощностью турбины и компрессора:

$$H_N(\vec{Q}) = \frac{N_k(\vec{Q})}{N_T(\vec{Q})\eta_{мех} - \Delta N_{отб}} - 1 = 0; \quad (1)$$

– невязка между значениями приведенного расхода через сопловой аппарат турбины, рассчитанный по параметрам рабочего тела на входе в турбину и определенный по расходной характеристике турбины:

$$H_{AT}(\vec{Q}) = \frac{A_{т.расч}(\vec{Q})}{A_T(\vec{Q})} - 1 = 0; \quad (2)$$

– невязка между значением статического давления в выходном сечении разгонного устройства, определенного по математической модели разгонного устройства – $\rho_c(\vec{Q})$ и атмосферному давлению ρ_H :

$$H_p(\vec{Q}) = \frac{\rho_H}{\rho_c(\vec{Q})} - 1 = 0; \quad (3)$$

– две невязки, сформированные по значениям параметров управления, определяющим режим работы двигателя – заданным и рассчитанным по текущим значениям независимых переменных:

$$H_U(\vec{Q}) = \frac{U_p(\vec{Q})}{U_{p.зад}(\vec{Q})} - 1 = 0, \quad (4)$$

где $\vec{Q} = [n_{к.пр}, Z_k, T_T^*, \pi_T^*, u]^T$ – независимые переменные.

Таким образом, что бы решить задачу устойчивой работы газогенератора на нерасчетных режимах необходимо создать программный комплекс для расчета согласованной работы ГТД и трехфазного разгонного устройства.

Решение поставленной задачи

На первом этапе выполнения поставленной задачи необходимо разработать модуль расчета параметров сопла разгонного устройства. Требования к модулю расчета сопла можно сформулировать следующим образом: При известных параметрах двигателя (расход, давление и температура рабочего тела), поступающих на вход разгонного устройства известной геометрии, модуль должен выдать статическое давление на срезе сопла, которое используется для формирования соответствующей невязки модуля расчета параметров двигателя, которая согласует работу всех его узлов, включая и разгонное сопло. При выполнении условия, когда сумма всех невязок меньше, чем заданная точность расчета, модуль сопла выдает распределение параметров многофазного потока по длине сопла разгонного устройства [4].

В общем случае точное решение системы уравнений представленной в [2] как прямой задачи получить невозможно, поэтому приходится прибегать к ее численному интегрированию. Для использования стандартных программ решения систем обычных дифференциальных уравнений приведем систему к нормальному виду. В качестве независимой переменной, исходя из удобства практических расчетов, выберем статическое давление потока P. Тем самым мы ограничиваемся рассмотрением случаев

монотонного изменения давления вдоль проточной части сопла, что характерно для сопловых течений.

После соответствующих преобразований с учетом соотношений $u = m_k/m_\Gamma$:

$$m_k = \rho_k \pi d_k^3 / 6; \quad S_k = \pi d_k^2 / 4; \quad (5)$$

получим систему уравнений вида:

$$\rho_\Gamma = \frac{P}{RT_\Gamma}; \quad (6)$$

$$We = \frac{d_k \rho (W_\Gamma - W_k)^2}{2\sigma_k}; \quad (7)$$

$$f_k = \frac{m_k}{\rho_k W_k}, \quad f_s = \frac{m_s}{\rho_s W_s}; \quad (8)$$

$$f = \frac{\pi D_\Gamma^2}{4}; \quad (9)$$

$$f_\Gamma = f - f_k - f_s; \quad (10)$$

$$dT_\Gamma = \frac{m_k \left(C_k dT_k + W_k dW_k + \xi \frac{dP}{\rho_k} \right) + m_s \left(C_s dT + W_s dW_s + \xi \frac{dP}{\rho_s} \right) + W_\Gamma dW_\Gamma}{-m_\Gamma C_p}; \quad (21)$$

$$dk = \frac{We_{кр} G_k}{\rho_\Gamma (W_\Gamma - W_k)^2}. \quad (22)$$

Роль замыкающего уравнения в системе (6) – (22) выполняет ранее определенная геометрия сопла – D_Γ . Модулем программы, реализующим решение системы уравнений (6)–(22), является файл *Soplo 3f.dll*, представленный на языке программирования *Delphi*. Данный модуль совместно с моделью двигателя позволяет проводить расчет изменения параметров по длине сопла на различных режимах его работы и при различных внешних условиях.

Решение задачи осуществляется при задании значений следующих параметров на входе в разгонное устройство: массовых расходов и скоростей жидкости, твердых частиц и газа, температур жидкости и твердых частиц, полного давления и температуры газа, плотности жидкой и твердой фаз, коэффициента динамической вязкости и теплопроводности газа и твердых частиц, коэффициентов трения газа о стенку, жидкости и твердых частиц, удельной теплоемкости газовой и жидкой фаз, диаметра форсунки, распыляющей жидкость, числа Вебера и диаметра твердых частиц.

Решение системы проводится с постоянным шагом интегрирования методом Рунге-Кутты четвертого порядка. При этом заключительной фазой расчета является определение статического давления на срезе сопла, которое используется для формирования соответствующей невязки в модуле расчета параметров двигателя. При выполнении условия, когда сумма всех невязок меньше, чем заданная

$$dT_k = \frac{6\alpha_k (T_\Gamma - T_k)}{C_k \rho_k d_k W_k} dx; \quad dT_s = \frac{6\alpha_s (T_\Gamma - T_s)}{C_s \rho_s d_s W_s} dx; \quad (11)$$

$$dX_k = \frac{3}{4} C_{кк} m_k \frac{\rho_\Gamma}{\rho_k} \Delta W_k |\Delta W_k| \frac{dX}{W_k dk}; \quad (12)$$

$$dX_s = \frac{3}{4} C_{кс} m_s \frac{\rho_\Gamma}{\rho_s} \Delta W_s |\Delta W_s| \frac{dX}{W_s ds}; \quad (13)$$

$$dX_{T\Gamma} = 2C_{f\Gamma} m_\Gamma W_\Gamma dX / D_\Gamma; \quad (14)$$

$$dX_{T_k} = 2C_{fk} m_k W_k \frac{dX}{D_\Gamma}; \quad (15)$$

$$dX_{T_s} = 2C_{fs} m_s W_s dX / D_\Gamma; \quad (16)$$

$$dW_\Gamma = \frac{m_\Gamma}{\rho_\Gamma f_\Gamma} - W_\Gamma; \quad (17)$$

$$dP = -(m_\Gamma dW_\Gamma + dX_k + dX_{T\Gamma} + dX_s) / f_\Gamma; \quad (18)$$

$$dW_k = (-\xi f_k dP + dX_k - dX_{T_k}) / m_k; \quad (19)$$

$$dW_s = (-\xi f_s dP + dX_s - dX_{T_s}) / m_s; \quad (20)$$

точность расчета, модуль сопла выдает распределение параметров многофазного потока по длине сопла разгонного устройства. Варьируя расход жидкости и твердых частиц, а также их плотность, соизмеримую с плотностью существующих сорбентов, с помощью рассматриваемой модели можно оценить площадь воздействия сорбентного потока и его эффективность при ликвидации нефтяного загрязнения.

Структура программы реализующей математическую модель расчета трехфазного сопла представлена на рис. 2.

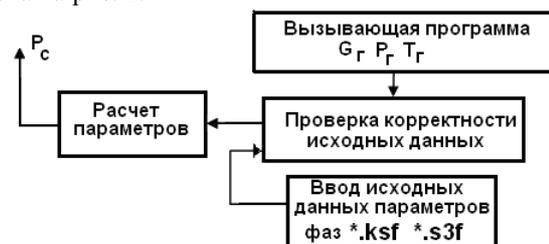


Рис. 2. Структура программы, реализующей математическую модель расчета трехфазного сопла

Вызывающая программа получает в качестве входных данных давление, температуру и расход газа, а также названия файлов параметров фаз, геометрии сопла и файла, куда будут выводиться результаты расчета. В первом блоке проверяется корректность исходных данных и вызывается модуль инициализации исходных данных. Если инициализация прошла удачно, то вызывается модуль непосредственного расчета изменения параметров фаз по длине сопла.

Структура пакета программ для моделирования параметров ГТД на установившихся режимах представлена на рис. 3.

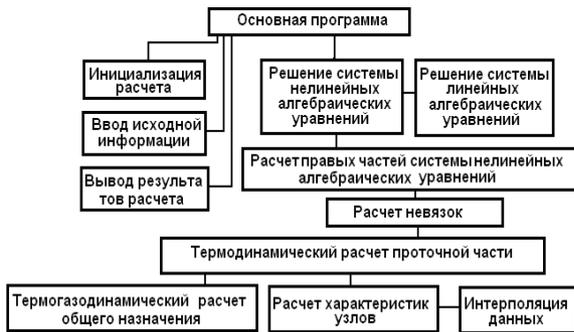


Рис. 3. Структура программного комплекса, реализующего поэлементную математическую модель установившихся режимов ГТД

Она отражает качественный состав и взаимодействие программных компонент. Для расчета параметров установившегося режима ТРД вызывающая программа обращается к программе решения системы нелинейных алгебраических уравнений. В этой программе независимые переменные \bar{Q} представлены в нормированной форме и пронумерованы подряд от 1 до 10. В универсальных программах термодинамических расчетов эти независимые переменные используются в размерной форме. Поэтому необходима промежуточная программа в функции которой входит перевод независимых переменных в размерную

форму, установка соответствия между номерами независимых переменных в указанных программах и вызов программы расчета невязок.

Программа расчета невязок вида (1) – (4) выполняет следующие функции: вызов программы термогазодинамического расчета проточной части моделируемого ГТД; вычисление невязок.

Программа термогазодинамического расчета предназначена для определения параметров ТРД, соответствующих заданным значениям независимых переменных. Эта программа составлена на основе использования универсального модуля термогазодинамического расчета однофазного газогенератора.

С использованием обобщенной математической модели газогенератора и многофазного разгонного устройства нами была разработана программа расчета параметров газогенератора структура, которой представлена на рис. 4. Вызывающая программа передает в качестве входных данных давление, температуру и расход газа, а также названия файлов параметров фаз, геометрии сопла и файла, куда будут выводиться результаты. В первом блоке проверяется корректность исходных данных и вызывается модуль инициализации исходных данных. Если инициализация прошла удачно, то вызывается модуль непосредственного расчета изменения параметров фаз по длине сопла. Если нет - в вызывающую программу возвращаются давление на срезе сопла и код ошибки.



Рис. 4. Структура программы, реализующей совместную математическую модель ГТД – трехфазное сопло

Программа расчета трехфазного разгонного сопла реализована в виде динамически подгружаемой внешней библиотеки. В данном модуле реализовано решение прямой задачи на основании трехфазной модели, описанной в [2], т.е. при известном профиле сопла определяется изменение параметров фаз по длине сопла.

Исходные данные, необходимые для работы программы, задаются тремя блоками:

- 1) параметры газа на входе в сопло;
- 2) параметры дисперсных фаз;
- 3) геометрия сопла.

Таким образом, совместная модель ГТД и

трехфазного сопла представляет собой пакет программ, реализующих модель ГТД, где в блоке «термогазодинамические расчеты общего назначения» (рис. 3) происходит вызов из динамической библиотеки функции расчета трехфазного сопла с передачей в нее параметров газа за турбинной. Результатом работы функции является давление газа на срезе сопла (возвращается в вызывающую программу) и файл, содержащий распределение параметров фаз по длине сопла (рис. 4).

Заключение

Анализ результатов расчетов с использованием совместной модели газотурбинный двигатель - разгонное сопло показывает, что модель может быть использована при формировании технологических процессов очистки нефтяного загрязнения водных акваторий и грунта при различных климатических условиях и режимах работы газогенератора. Кроме того, можно сделать вывод о том, что газовый поток ГТД может быть использован в качестве несущей фазы при доставке биосорбентов к месту ликвидации нефтяного загрязнения.

Разработанная математическая модель газогенератора с многофазным разгонным устройством является научным базисом для проектирования ус-

тановки, позволяющей обеспечивать доставку сорбентов в зону нефтяного или иного загрязнения водной поверхности и почвы.

Литература

1. Бугаенко, О.М. Многофункциональный газогенератор для ликвидации последствий загрязнений водных акваторий и грунта нефтепродуктами [Текст] / О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, Н.В. Нечипорук // *Авиационно-космическая техника и технология*: – 2008. – № 8(55). – С. 176 – 185.
2. Математическое моделирование многофункциональных генераторов трехфазных потоков на базе авиационных ГТД [Текст] / С.В. Епифанов, О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, А.В. Скляров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8(24). – С. 58 – 61.
3. Тунаков, А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей [Текст] / А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1979. – 181 с.
4. Бугаенко, О.М. Программная реализация математической модели многофункционального генератора трехфазного потока на базе авиационного ГТД [Текст] / О.М. Бугаенко, Р.Л. Зеленский, А.В. Скляров // *Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2004: тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф.* – Х., 2005. – С. 119 – 120.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: канд. техн. наук, ст. научный сотрудник кафедры конструкции авиационных двигателей В.Е. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ПРОГРАМА МОДЕЛЮВАННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ГТД ТА ТРИФАЗОВОГО РОЗГІННОГО СОПЛА

О.М. Бугаєнко

Розглянуто питання створення математичної моделі установки, що включає в себе термогазодинамічний модуль, характеризуючий роботу газогенератора, а також модуль багатофазового розгінного пристрою – сопла. Представлено термогазодинамічну модель газогенератора на основі авіаційного двигуна. Розроблено структуру програми, що реалізує математичну модель розрахунку трифазового сопла, а також структуру програмного комплексу, що реалізує поелементну математичну модель сталих режимів ГТД. Запропонована модель реалізована в формі алгоритму та відповідного програмного забезпечення. Розроблено програму моделювання сумісної роботи ГТД та трифазового розгінного сопла. Зроблено висновки.

Ключові слова: моделювання, параметри, математична модель, газовий потік, програма, газотурбінний двигун.

SIMULATION OF JOINT WORK PROGRAM AND THREE-PHASE ACCELERATION GTE NOZZLE

О.М. Bugayenko

Mathematical model creation, of thermal-gas dynamic module, which characterizes the work of the gas generator, as well as the first module of a multiphase booster device - the nozzle, subject is shown. Submitted thermal-gas dynamic model of aircraft engine-based gas-generator is shown. The structure of the program implements mathematical model for calculating the three-phase nozzle, as well as the structure of software system that implements an elementwise mathematical model of steady-state modes of gas turbine engine are developed. The proposed model is implemented in the form of an algorithm and associated software. The structure of the simulation program of joint work of gas turbine engine and the three-phase booster nozzle is shown. Conclusions are made.

Key words: modeling, parameters, mathematical model, gas flow, program, gas turbine engine.

Бугаенко Олег Михайлович – канд. техн. наук, старший преподаватель, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.bugaenko2010@yandex.ua.