

УДК 621.1.076-627.8

О.М. БУГАЕНКО, Ю.А. ГУСЕВ, Н.В. НЕЧИПОРУК*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР
ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОДНЫХ
АКВАТОРИЙ И ГРУНТА НЕФТЕПРОДУКТАМИ**

Рассмотрены вопросы разработки генератора многофазных потоков для ликвидации последствий загрязнения больших площадей водных акваторий и грунта нефтепродуктами. Представлена математическая модель многофазного разгонного устройства. Проведена верификация разработанной модели. Спроектированы выходные устройства для двигателей ГТД-5, АИ9-В и ТВ3-117. На основании проведенных исследований создана совместная математическая модель газотурбинного двигателя и многофазного разгонного устройства. Приведены результаты экспериментальных исследований генератора многофазных потоков, подтверждающие эффективность его работы.

многофазный поток, математическая модель, разгонное устройство, сорбент, нефтяное загрязнение, дальнобойность

Введение

Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов (ННП) происходят на нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях, а также при их транспортировке, чем наносят ощутимый вред экосистеме земли и приводят к негативным экономическим и социальным последствиям. Загрязнение нефтепродуктами водных акваторий и грунта обусловлено, прежде всего, изношенностью технологического оборудования предприятий, танкеров и трубопроводов, транспортирующих нефть, а также человеческим фактором.

При ликвидации нефтяного загрязнения применяются боновые заграждения, препятствующие растеканию нефтепродуктов, с последующим их сбором с применением различных технических устройств: нефтемусоросборщиков, скиммеров, насосов, ковшевых черпалок и др. [1]. Традиционная технология очистки воды и почвы от нефтепродуктов включает в себя распределение тонкодисперсных сорбционных материалов на большой поверхности с последующим их сбором. Для более тонкой очистки поверхности воды и почвы необходимо введение в загрязненную среду препарата, содер-

жащего нефтеокисляющие бактерии. Технология доставки и распределения сорбента и биопрепарата на большие поверхности водных акваторий и грунта, загрязненных нефтепродуктами в течение короткого времени, требует применения специализированных установок, *создание которых представляет современную научно-практическую задачу.*

Несмотря на проводимую в последнее время государством политику в области предупреждения и ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, (последний случай крушения двух кораблей с мазутом в Керченском проливе), данная проблема остается актуальной и требует дополнительного внимания.

Важным современным направлением двигателестроения является расширение области применения газотурбинных двигателей. В настоящее время в Украине разработаны и применяются газотурбинные установки, позволяющие решать различные технико-экологические задачи, такие как: очистка труб от парафиновых отложений, освобождение железнодорожных вагонов от остатков сыпучих пылеобразующих грузов, а также очистка и просушка взлетно-посадочных полос аэродромов, дезактива-

ция технических объектов и другие.

Таким образом, проблема создания многофункционального газогенератора многофазного потока, позволяющего повысить эффективность экологических технологий, в частности, при ликвидации нефтяных загрязнений водных акваторий и грунтов, **является актуальной** как в практическом, так и в научном плане.

Цель и задачи исследования

Целью работы является научно-техническое обоснование и исследование нового типа газотурбинной установки – многофункционального газогенератора с трехфазным разгонным устройством, позволяющего осуществлять мероприятия, повышающие эффективность экологических технологий по стабилизации состояния окружающей среды в случае техногенно-экологического загрязнения, в частности, при аварийном разливе нефти.

Для реализации поставленной цели требуется решить следующие **основные задачи:**

1) разработать математическую модель трехфазного разгонного устройства и на ее основе создать методику расчета профиля разгонного устройства газогенератора с трехфазным течением рабочего тела, обеспечивающего максимальные дальность трехфазного потока и площадь орошения пятна нефтяного загрязнения;

2) выполнить верификацию разработанной математической модели разгонного устройства с трехфазным течением рабочего тела с использованием моделирования в двухмерном пространстве течения трехфазного сорбентного потока;

3) разработать математическую модель многофазного газогенератора, которая отражает совместную работу ГТД с многофазным разгонным устройством в широком диапазоне режимов работы и внешних условий, с учетом физических параметров твердой фазы - нефтепоглощающих сорбентов;

4) создать экспериментальную установку и провести исследования многофазных сорбентных пото-

ков, а также выработать рекомендации по использованию полученных результатов при решении задач ликвидации техногенно-экологического загрязнения.

Решение проблемы

Выполнив анализ современного состояния разработок технологических устройств, основанных на использовании энергии газовой струи, оценив энергетические характеристики различных типов реактивных двигателей как источников газовой струи многофункционального генератора многофазного потока, пришли к выводу, что наиболее эффективным и экономически целесообразным источником газового потока многофазной установки является газотурбинный двигатель.

Анализ технико-экологических процессов, в которых возможно применение энергии реактивной струи газотурбинного двигателя показал, что многофазный газогенератор на базе авиационного ГТД может быть использован для решения многочисленных инженерно-экологических задач. Однако без создания математических моделей (ММ) многофазного сопла и двигателя, а также ММ их совместной работы, решение вышеперечисленных задач не представляется возможным.

Разработка математической модели многофазных разгонных устройств многофункционального газогенератора

Для создания ММ [2, 3] рассматривался двухфазный поток – газ, жидкость и трехфазный – газ, жидкость и твердые частицы (ТЧ). Принято, что ТЧ имеет сферическую форму, а жидкая и твердая фазы не взаимодействуют непосредственно между собой, т.е. отсутствуют столкновение и теплообмен между каплями жидкости и ТЧ. Схема трехфазного разгонного устройства изображена на (рис. 1).

ММ двухфазного разгонного устройства представлена уравнениями закона сохранения масс и энергии смеси, уравнением состояния и сохранения

количества движения фаз; притока тепла к жидкой фазе, соотношениями для коэффициентов теплоотдачи и зависимостью, определяющей диаметр капле-пель. Предлагаемая модель отличается от существующих видом ее замыкающего уравнения. Рассмотрены замыкающие уравнения - закон изменения проскальзывания фаз по длине сопла

$$W_2 - W_k = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (1),$$

и закон распределения давления в сопле

$$P = ax^3 + bx^2 + cx + d. \quad (2).$$

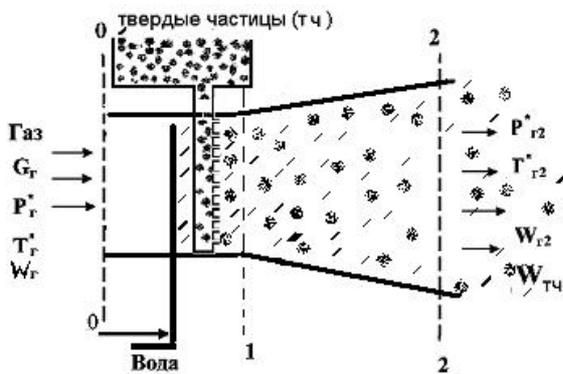


Рис. 1. Схема трехфазного разгонного устройства

Коэффициенты a_1 и a_2 определялись из условия обеспечения минимального значения диаметра капле-пель при заданном интервале длин сопла. Поиск минимума осуществлялся методом кратчайшего спуска. Для определения коэффициента c задавалась необходимая длина сопла.

Был выполнен анализ зависимости параметров фаз на выходе из двигателя от выбора замыкающего уравнения и параметров на входе в сопло [4].

Рассматриваемая ММ позволяет решать прямую задачу (определение распределения параметров по длине сопла при его заданной геометрии) и обратную задачу - расчет профиля сопла.

За основу модели трехфазного разгонного устройства принята модель гетерогенного двухфазного потока, дополненная уравнениями третьей фазы. ММ трехфазного сопла представлена следующими уравнениями:

Уравнения закона сохранения масс и энергии, а также уравнение состояния смеси имеют вид:

$$m_k = \rho_k W_k f_k; \quad m_z = \rho_z W_z f_z; \quad m_s = \rho_s W_s f; ;$$

$$f = f_z + f_k + f_s; ;$$

$$m_z \left(C_p T_z + \frac{W_z^2}{2} \right) + m_k \left(C_k T_k + \frac{W_k^2}{2} + \xi \frac{P}{\rho_k} \right) + m_s \left(C_s T_s + \frac{W_s^2}{2} + \xi \frac{P}{\rho_s} \right) = Const. \quad (3)$$

Уравнения сохранения количества движения фаз:

$$m_z dW_z = -f_z dP - dX_k - dX_{mz} - dX_s; ;$$

$$m_k dW_k = -\xi f_k dP + dX_k - dX_{mk}; \quad (4)$$

$$m_s dW_s = -\xi f_s dP + dX_s - dX_{ms} .$$

Уравнения притока тепла к жидкой и твердой фазам:

$$C_j \rho_j d_j dT_j = \alpha_j (T_z - T_j) \frac{dx}{W_j}, \quad (5)$$

где $W, T, P, C, m, f, \rho, \alpha, \xi$ - параметры фаз: скорость, температура, давление, теплоемкость, масса, суммарная площадь сечения, занимаемая отдельной фазой, плотность, коэффициент теплопередачи, коэффициент влияния конечности объема; $j = k$ - жидкая фаза; s - твердая фаза.

При профилировании сопла трехфазного потока, т.е. при решении обратной задачи, использовались следующие замыкающие уравнения:

$$P = kx + b; \quad (6)$$

$$W_2 - W_s = kx + b. \quad (7)$$

При использовании закона профилирования (7) задавалась разница скоростей газа и твердой частицы на выходе из сопла. Учитывая то, что при практическом применении трехфазных сопел необходимо обеспечить как можно большее значение скорости твердой частицы, разница скоростей принималась наименьшей. Полученная система уравнений решалась численным методом Рунге-Кутты. В качестве переменной интегрирования выбиралось давление - P . Программа была написана на языке программирования Delphi.

С использованием описанной выше математической модели трехфазного устройства выполнены варианты расчеты эффективности его действия для

разных видов замыкающих уравнений. Эффективность разгонного устройства трехфазного потока определялась скоростью ТЧ на срезе сопла. Приведены результаты исследования зависимости скорости ТЧ в трехфазном потоке на выходе из сопла от длины сопла, коэффициента инжекции твердой фазы, степени расширения газа при использовании различных замыкающих уравнений. Анализ результатов исследований, представленных на (рис. 2 и 3), позволяет сделать вывод о том, что закон изменения проскальзывания фаз, используемый в трехфазных разгонных устройствах, явно уступает в обеспечении максимальной скорости твердой частицы закону изменения давления по длине сопла.

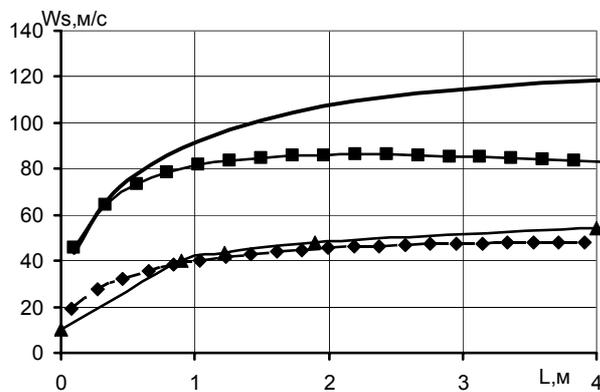


Рис. 2. Влияние длины сопла, на скорость твердой частицы для замыкающего уравнения –(2):
 —●— TR3-117; ■■■ – АИ9-В (рабочее тело из-за компрессора); ◆◆◆ – АИ9-В (рабочее тело из-за турбины); – для уравнения (1): ▲▲▲ – АИ9-В (рабочее тело из-за турбины)

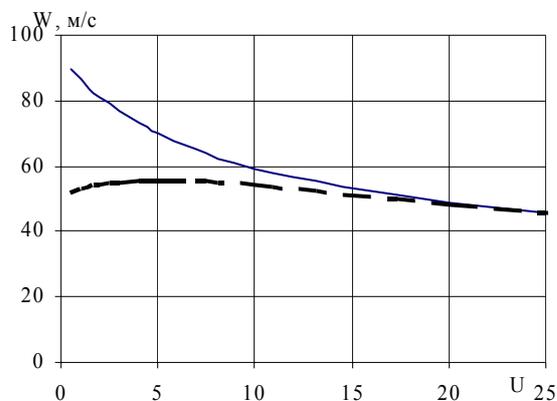


Рис. 3. Зависимость скорости твердой частицы от коэффициента инжекции: для замыкающих уравнений: — — $P = cx + d$; - - - $W_2 - W_s = a_0$

Созданная программа расчета профиля трехфазного сопла позволяет определить основные геометрические размеры разгонных устройств для различных ГТД. На (рис. 4.) представлены профили трехфазных сопел двигателей ТВЗ-117 и ГТД-5. Сделан вывод о том, что, при проектировании многофазных разгонных устройств, обеспечивающих максимальную дальность потока, необходимо использовать ММ с замыкающим уравнением (2).

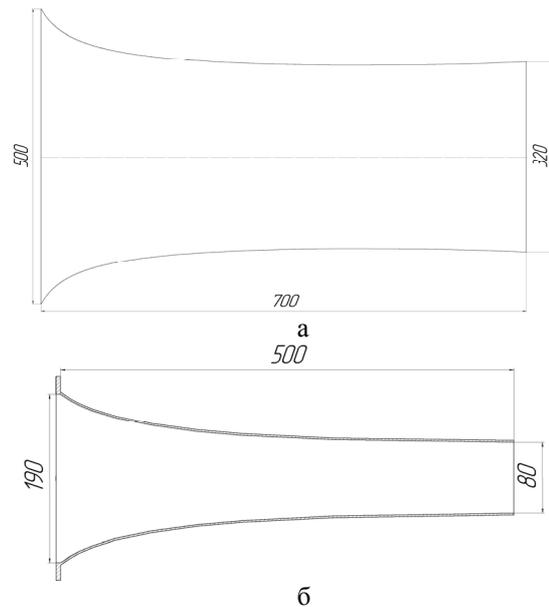


Рис. 4. Профили трехфазных сопел двигателей:
 а – ТВЗ-117; б – ГТД-5

Верификация математической модели

В разделе рассматривается экспериментальная расчетная верификация математической модели трехфазного разгонного устройства [5], представленная уравнениями (3) – (7). Для определения достоверности результатов, полученных с помощью рассмотренной модели многофазных разгонных устройств, были использованы современные методы вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД).

Многофазное течение моделировалось как двухфазная смесь с эйлеровым описанием газовой фазы (сплошная среда) и лагранжевым описанием движения частиц (траекторная модель). Взаимодействие фаз учитывалось на основе модели «частица – источник в ячейке», в соответствии с которой присут-

ствие частицы в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы.

Поведение газовой фазы в методе ВАГД представлено системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и двух уравнений дифференциальной модели турбулентности k - ϵ типа.

Траектории частиц моделировались путем интегрирования уравнения баланса сил, действующих на частицу, которое уравнивает инерцию частицы с силой аэродинамического сопротивления и силой тяжести.

При моделировании дискретной фазы задавались начальные условия: положение частицы, ее скорость, диаметр, массовый расход частиц, следующих вдоль траектории. Предполагалось, что при столкновении со стенкой частица захватывается ею.

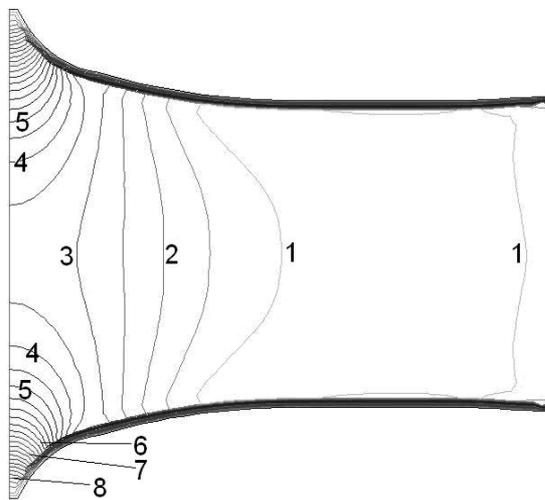


Рис. 5. Изолинии скорости:
1 – 406 м/с; 2 – 378 м/с; 3 – 350 м/с;
4 – 322 м/с; 5 – 294 м/с; 6 – 238 м/с;
7 – 128 м/с; 8 – 70 м/с

Графики изменения основных параметров представлены на (рис. 7 и 8). Как видно из графиков, характер изменения скорости дисперсной фазы, полученный методом ВАГД и с помощью математической модели многофазного сопла, одинаковый, при этом максимальное отклонение значений составляет

Решение проведено в двумерной расчетной области, соответствующей проточной части разгонного сопла. Расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой.

Для доверия результатам расчета проведено сравнение значения коэффициента гидравлического сопротивления сопла полученного методом ВАГД со значением, рассчитанным аналитическим методом по зависимостям Г.Н. Абрамовича. Различие значений гидравлических сопротивлений составляет 2,6%, что свидетельствует о достоверности полученных методами ВАГД решений и о возможности использования данных результатов для верификации математической модели многофазного разгонного устройства.

Графическое представление полученных полей скоростей и давлений частиц дисперсной фазы в разгонном сопле представлены на (рис. 5, 6.).

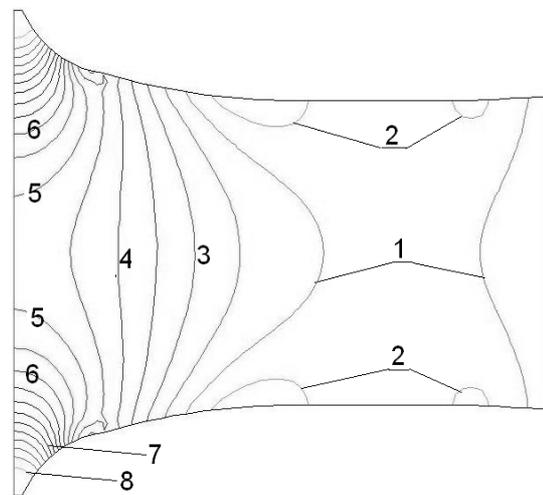


Рис. 6. Изолинии давления:
1 – 98,8 кПа; 2 – 93,1 кПа; 3 – 110,2 кПа;
4 – 121,5 кПа; 5 – 132,9 кПа; 6 – 144,2 кПа;
7 – 166,9 кПа; 8 – 195,3 кПа

10% (или в абсолютных значениях 9 м/с). Характер изменения скорости и давления газа по длине сопла совпадает для обоих вариантов расчета, а максимальное отличие значений составляет 4,6% (18 м/с) для скорости газа и 11,9% (14 кПа) для давления.

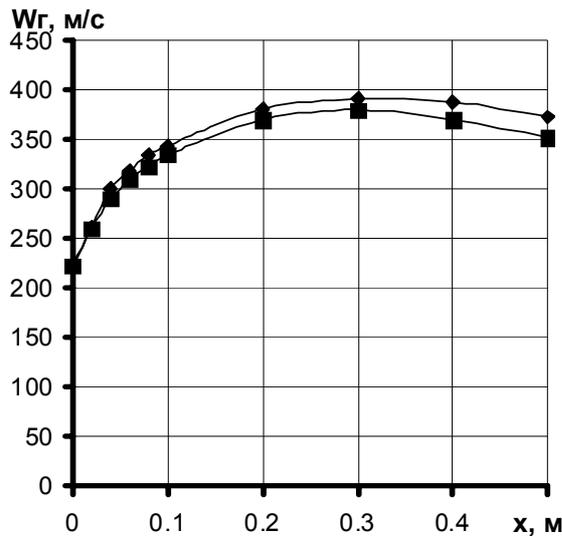


Рис. 7. Изменение скорости газа:

■ ■ ■ – результаты ВАГД
◆ ◆ ◆ – результаты ММ многофазного сопла

Совместная ММ МРУ и ГТД

В разделе приведены исследования совместной математической модели многофазного разгонного сопла и газотурбинного двигателя – модели исследуемой установки [2, 6].

ММ ГТД представлена универсальной моделью, разработанной в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е Жуковского «ХАИ» для диагностирования двигателей.

Процедура расчета параметров проточной части имеет итеративный характер и представлена как алгоритм получения следующего приближения независимых переменных по предыдущему приближению:

$$\bar{Q}^i = f(\bar{Q}^{i-1}), \quad i = 1 \dots n.$$

Целенаправленная коррекция независимых переменных возможна только на основании использования информации об их влиянии на условия совместной работы узлов. Мерой выполнения этих условий являются невязки \vec{H} . Эти невязки \vec{H} зависят от значений независимых переменных \bar{Q} , внешних условий \bar{U}_n , параметров режима \bar{U}_p и параметров узлов \bar{v} . Состав независимых переменных \bar{Q} моде-

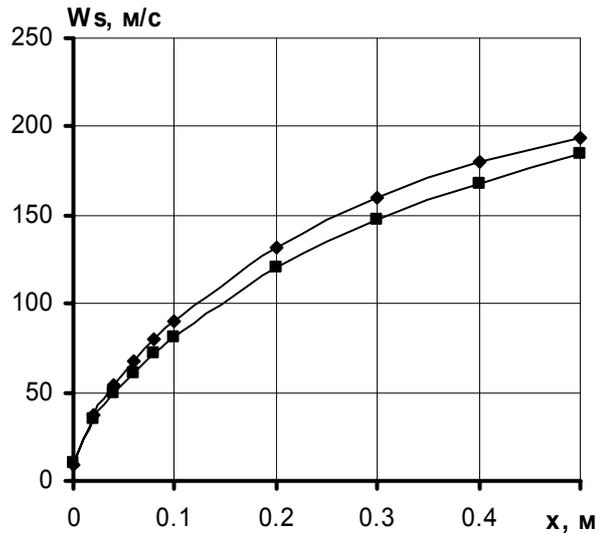


Рис. 8. Изменение скорости дисперсной фазы:

■ ■ ■ – результаты ВАГД
◆ ◆ ◆ – результаты ММ многофазного сопла

ли выбирался так, чтобы обеспечить расчет всех параметров проточной части по направлению движения потока. Полный перечень независимых переменных, используемых в данной модели, приведен в (табл. 1).

Таблица 1

Состав независимых переменных модели

Наименование	Обозначение
Приведенная частота вращения ротора	n_{np}
Параметр положения текущей точки на характеристике компрессора	Z
Температура газов за камерой сгорания	$T_{кс}^*$
Степень повышения давления	π_k
Степень понижения давления в турбине	π_m^*

Для выбранного нами двигателя ТРД, имеем следующую систему уравнений:

– невязки между мощностью турбины и компрессора:

$$H_{Nn}(\bar{Q}) = \frac{N_k(\bar{Q})}{N_m(\bar{Q})\eta_{мех} - \Delta N_{омб}} - 1 = 0;$$

– невязка между значениями приведенного расхода через сопловой аппарат турбины, рассчитанного по параметрам рабочего тела на входе в турбину и опре-

деленного по расходной характеристике турбины:

$$H_{Am}(\bar{Q}) = \frac{A_{m.pасч}(\bar{Q})}{A_{m.}(\bar{Q})} - 1 = 0;$$

– невязка между значениями расхода воздуха, определенного по характеристике компрессора:

$$H_{\pi}(\bar{Q}) = \frac{\pi_{K\Sigma}(\bar{Q})}{P_{\kappa}^*(\bar{Q}) / P_{\text{вх}}^*(\bar{Q})} - 1 = 0;$$

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

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

где

$\bar{Q} = [m_{\text{кнд.пр}} Z_{\text{кнд}} n_{\text{квд.пр}} \pi_{\text{к}\Sigma} Z_{\text{квд}} T_{\text{кс}}^* \pi_{\text{твд}}^* \pi_{\text{тнд}}^* P_{\text{см}}]^T$ – независимые переменные.

Пакет программ для моделирования параметров ГТД на установившихся режимах 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 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, установление соответствия между номерами независимых переменных в указанных программах и вызов программы расчета невязок.

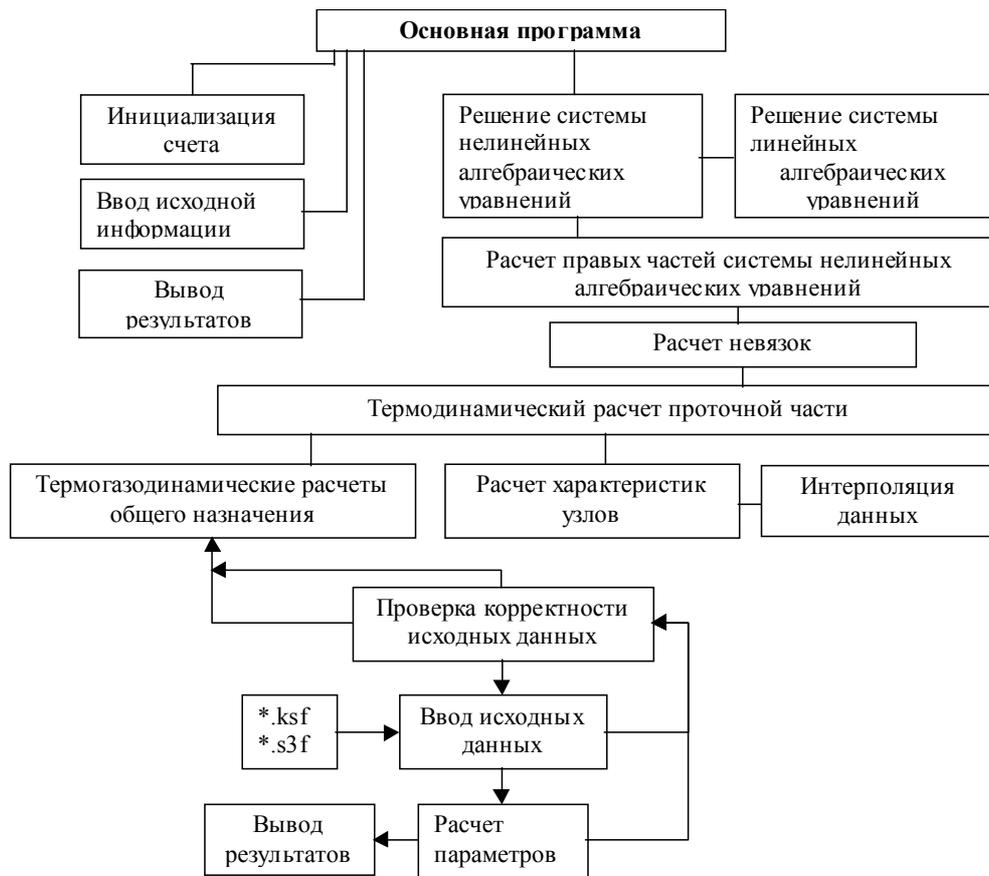


Рис.9. Структура программы совместной модели газотурбинный двигатель – трехфазное сопло

Программа расчета невязок 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.

Программа расчета трехфазного разгонного сопла реализована в виде динамически подгружаемой внешней библиотеки. В данном модуле реализовано решение прямой задачи на основании трехфазной модели, т.е. при известной геометрии сопла определяются изменение параметров фаз по длине сопла. Структурная схема математической модели многофункционального газогенератора представлена на (рис. 9).

Таким образом был сделан вывод, что разработанная ММ может быть применена при исследовании проблем создания многофункционального газогенератора, решающего задачи повышения эффективности экологических технологий.

Результаты экспериментальных исследований

В разделе рассматриваются результаты экспериментальных исследований многофазных сорбентных потоков, а также даны рекомендации по использованию полученных результатов при решении техногенно-экологических задач [7].

Представлены экспериментальные установки, разработанные в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е Жуковского «ХАИ» на базе таких авиационных двигателей, как АИ9-В и ГТД-5 (рис. 10 и 11).

Установка на базе ГТД-5 предназначена для доставки твердых частиц сорбента, а на базе АИ9-В – для твердых частиц сорбента и жидкого биосорбента. В

качестве биосорбента использовался водный раствор биопрепарата ВИКОЛИН, а в качестве сорбента – древесная стружка. Рассматривается применение указанных установок при решении задач пожаротушения и пылеподавления.



Рис. 10. Экспериментальная установка на базе двигателя ГТД-5



Рис. 11. Распыление биопрепарата, содержащего нефтеокисляющие бактерии, с использованием «холодного сопла» двигателя АИ-9В

В (табл. 2) представлены результаты экспериментальных исследований по дальнобойности и площади орошения различными многофазными сорбентными потоками (в случае применения в качестве несущей фазы воздуха, отбираемого от компрессора двигателя АИ9-В, сопло получило название «холодного», в отличие от остальных установок, использующих горячий газ).

Приведены данные исследований дисперсности жидкой фазы с использованием лазерной технологии измерения. Показано, что, в зависимости от ре-

жима работы двигателя и расхода жидкой фазы, диаметр капли может составлять от 40 до 200 мкм.

При рекультивации почвы, загрязненной нефтепродуктами, возможно применение мелкодисперсного двухфазного потока биосорбента. В связи с этим нами были проведены исследования по применению механического струнного диспергатора на

двухфазных соплах разработанных нами установок. Струнный диспергатор осуществляет дополнительное дробление капель жидкой фазы. Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение струнного диспергатора приводит к значительному уменьшению размера капель, но одновременно уменьшает дальность потока.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Исследуемые многофункциональные газогенераторы	Параметры газогенераторов								
	Расход газа (кг/с)	Давление газа за турбиной (кг/см ²)	Давление жидкости (кг/см ²)	Расход жидкости (л/с)	Диаметр капли жидкости (мкм)	Расход твердого сорбента (м ³ /мин)	Температура многофазного потока (°С)	Дальность потока (м)	Площадь орошения поверхности потоком (м ²)
ГТД-5 с двухфазным соплом	0,8	0,3	2,5	2,5	50 – 70	–	40 – 45	25 – 30	до 20 – 25
АИ9-В с двухфазным соплом	1,4	0,243	2,5	2,5	50 – 70	–	40 – 45	25 – 30	до 20 – 25
АИ9-В с двухфазным «холодным» соплом	0,4	2,5	2,5	2,5	35 – 50	–	20 – 30	30 – 40	до 20 – 25
ГТД-5 с трехфазным соплом	0,8	0,33	2,5	0,75	–	1,0	40 – 45	30 – 40	до 30

Исследована эффективность сорбентных свойств древесной стружки. Для этой цели в емкость с водой, загрязненной дизельным топливом, помещалась древесная стружка из расчета 0,35 кг на квадратный метр. Насыщение стружки продолжалось в течение двух суток. Взвешивание извлеченной стружки после удаления из нее пор воды показало увеличение веса за счет насыщения дизельным топливом на 50%, что свидетельствует о высоких сорбентных качествах древесной стружки.

Разработаны рекомендации по применению многофункциональной газотурбинной установки, позволяющей повысить эффективность экологических технологий при ликвидации техногенного нефтяного загрязнения.

Выводы

1. Применяемые при ликвидации загрязнения водных акваторий – боновые заграждения и различные технические устройства сбора нефтепродуктов,

такие как скиммеры, насосы, ковшевые черпалки и др. не обеспечивают должной эффективности очистки. Более тонкая очистка поверхности воды и также грунта с применением биопрепарата требует введение в загрязненную среду биопрепарата, технология доставки и распределения которого на большие поверхности водных акваторий и грунта, загрязненных нефтепродуктами в течение короткого времени должным образом в настоящее время не решена. В связи с этим *создание многофункционального многофазного газогенератора*, обеспечивающего в течение короткого времени доставку и распределение сорбента и биопрепарата на большие загрязненные нефтепродуктами поверхности водных акваторий и грунта является *актуальной научной и практической работой*.

2. Предложен многофункциональный газогенератор, позволяющий решить эту проблему, повышающий эффективность экологических технологий, в частности, при ликвидации нефтяных загрязнений водных акваторий и грунтов.

3. Разработана методика профилирования разгонного устройства многофазного газогенератора, которая отличается использованием математической модели течения трехфазного рабочего тела, позволяющего расширить спектр применения сорбентов при ликвидации нефтяного загрязнения водных акваторий и грунта.

4. Разработаны методические подходы к моделированию осесимметричного течения многофазного потока и с использованием данного моделирования выполнена верификация предложенной математической модели течения трехфазного рабочего тела.

5. Представлена математическая модель исследуемого многофункционального газогенератора, включающая модель двигателя и модель многофазного разгонного устройства, обеспечивающая расчет параметров сорбентных потоков в широком диапазоне режимов работы.

6. С использованием созданного многофазного газогенератора проведены исследования многофазных сорбентных потоков. Полученные автором результаты могут быть использованы при выработке рекомендаций по использованию полученных результатов при разработке технологий ликвидации техногенно-экологических загрязнений.

Литература

1. Чурсин В.Ф., Горбунов С.В., Федотова Т.В. Аварийные разливы нефти: средства локализации и методы ликвидации // Системы безопасности. – 2004. – № 1. – С. 37-41.

2. Математическое моделирование многофункциональных генераторов двухфазных потоков на базе авиационных ГТД / С.В. Епифанов, О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, В.С. Чигрин // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – С. 78-81.

3. Математическое моделирование многофункциональных генераторов трехфазных потоков на базе авиационных ГТД / С.В. Епифанов, О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, А.В. Скляр // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 8 (24). – С. 58-61.

4. Бугаенко О.М. Анализ зависимости параметров фаз на выходе газотурбинной установки от выбора замыкающего уравнения и параметров на входе в сопло // Вестник двигателестроения. журн. – 2008. – № 1. – С. 22-25.

5. Проверка достоверности математической модели многофазного разгонного сопла / В.Е. Костюк, О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, А.В. Скляр // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 7 (33). – С. 157-160.

6. Бугаенко О.М., Зеленский Р.Л., Скляр А.В. Программная реализация математической модели многофункционального генератора трехфазного потока на базе авиационного ГТД // Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні». ІКТМ'2005.: Тез. доповідей. – Х.: ХАІ, 2005. – С. 119-120.

7. Многофазный генератор на базе газотурбинного двигателя для решения задачи очистки водной поверхности от нефтепродуктов / О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, С.В. Епифанов, А.В. Скляр // Сучасні проблеми охорони довкілля раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод: Тр. Міжнар. наук.-практ. конф. – К.: Товариство «Знання», 2007. – С. 49-52.

Поступила в редакцию 30.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Ведь, Национальный технический ун-т «ХПИ», Харьков.