

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СМЕСИТЕЛЯ С ДВУХФАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ (ПРЯМАЯ ЗАДАЧА)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)" (МАИ):  
Игорь Александрович Лепешинский, д.т.н., профессор  
Ся Сюй, аспирант

*Рассматривается смеситель с двухфазным рабочим телом, представляющий собой осесимметричный канал переменной геометрии, снабженный рядом струйных форсунок. Оси струйных форсунок расположены перпендикулярно оси канала. В канал подается двухфазный газокapельный поток воздуха и топлива, который вытекает через струйные форсунки. Разработана математическая модель и программа расчета, позволяющая получать на выходе из смесителя распределение параметров двухфазного потока.*

*We consider a mixer with a two-phase working fluid, which is an axisymmetric channel of variable geometry, equipped with a number of jet nozzles. The axes of the jet nozzles are located perpendicular to the axis of the channel. A two-phase gas-drop flow of air and fuel is fed into the channel, which flows out through jet nozzles. A mathematical model and calculation program have been developed that allows obtaining the distribution of two-phase flow parameters at the mixer outlet.*

**Ключевые слова:** смеситель, двухфазный поток, струйные форсунки, газ, капли, формирование полей параметров.  
**Keywords:** mixer, two-phase flow, jet nozzles, gas, drops, the formation parameter fields.

## Введение

В форсажной камере ГТД кислорода намного меньше, поскольку значительная часть его использована в основных камерах сгорания. Поэтому для обеспечения процесса горения целесообразно использование воздуха подаваемого совместно с топливом. В основу модели положена одномерная математическая модель двухфазного газокapельного потока с учетом неравновесного взаимодействия фаз и монодисперсности каплей [1-4]. Эта модель успешно использовалась для расчета двухфазного течения в соплах, эжекторах и других каналах, и апробирована экспериментальными исследованиями [2-4]. Применительно к рассматриваемой задаче, в работе [5] решалась обратная задача. Для решения прямой задачи модель была модифицирована и доработана. Математическая модель включает уравнения, выражающие законы сохранения: неразрывности, количества движения, энергии, уравнения состояния каждой фазы, уравнения межфазного взаимодействия, значения теплофизических характеристик. Для истекающих из форсунок двухфазных струй используются аналогичные уравнения для каждой фазы. Пример рассматриваемого канала показан на рис. 1.



Рис. 1 Пример многофорсуночного смесителя

Решение задачи строилось следующим образом: для расчета течения на участке без отверстий использовалась основная система уравнений, использовавшаяся ранее при решении обратной задачи [5], для расчета течения на участке с отверстием использовалась дополнительная система уравнений, основанная на использовании уравнения количества движения с переменным расходом, которая решалась методом последовательных приближений.

## Основная система уравнений:

$$\frac{dD_{ch}}{dx} = b_1x^4 + b_2x^3 + b_3x^2 + b_4x + b_5 \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\pi D_{ch} dD_{ch}}{2dx} \quad (2)$$

$$\frac{dS_k}{dx} = -\frac{dW_k S_k}{dx W_k} + \frac{dG_k}{dx \rho_k W_k} \quad (3)$$

$$\frac{dS_g}{dx} = \frac{dS}{dx} - \frac{dS_k}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_g}{dx} = -\frac{dS_g \rho_g}{dx S_g} - \frac{dW_g \rho_g}{dx W_g} + \frac{dG_g}{dx S_g W_g} \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d\rho_g R_g T_g}{dx} + \frac{dT_g R_g \rho_g}{dx} \quad (6)$$

$$\frac{dW_k}{dx} = -\frac{dP}{dx \rho_k W_k} - \frac{3C_{ш} \rho_g \Psi(We) W_g^2 \left| \frac{W_k}{W_g} - 1 \right| \left( \frac{W_k}{W_g} - 1 \right)}{4\rho_k W_k a_k} \quad (7)$$

$$\frac{dW_g}{dx} = -\frac{dPS}{dx G_g} - \frac{dW_k G_k}{dx G_g} - \frac{\xi_f (A_{67} W_g G_g + A_{68} W_k G_k)}{D_c G_g} - \frac{dG_k W_k}{dx G_g} - \frac{dG_g W_g}{dx G_g} \quad (8)$$

$$\frac{dT_k}{dx} = -\frac{6\lambda Nu T_g \left( \frac{T_k}{T_g} - 1 \right)}{C_k \rho_g D_{ch} a_k^2} \quad (9)$$

$$\frac{dT_g}{dx} = -\frac{dW_k G_k W_k}{dx G_g C_g} - \frac{dW_g W_g}{dx C_g} - \frac{dT_k C_k G_k}{dx G_g C_g} - \frac{dG_k W_k^2}{2dx G_g C_g} - \frac{dG_g W_g^2}{2dx G_g C_g} \quad (10)$$

$$\frac{dG_k}{dx} = -B \frac{dG_{koi}}{d_{oi}} \quad (11)$$

$$\frac{dG_g}{dx} = -B \frac{dG_{g oi}}{d_{oi}} \quad (12)$$

## Дополнительная система уравнений:

$$P_1 S_1 - P_2 S_2 = (G_{g1} - G_{gotv}) W_{g1} + (G_{k1} - G_{kotv}) W_{k1} \quad (13)$$

$$P_2' = \frac{P_1 S_1 - (G_{g1} - G_{gotv}) W_{g1} + (G_{k1} - G_{kotv}) W_{k1}}{S_2} \quad (14)$$

$$\rho_{g2}' = \frac{P_2'}{R_g T_{g2}} \quad (15)$$

$$S_{k2}' = \frac{G_{k2}}{W_{k2} \rho_k} \quad (16)$$

$$S_{g2}' = S_2 - S_{k2}' \quad (17)$$

$$W_{g2}' = \frac{G_{g2}}{\rho_{g2}' S_{g2}'} \quad (18)$$

$$P_1 S_1 - P_2' S_2 = (G_{g1} W_{g1} - G_{g2} W_{g2}') + (G_{k1} - G_{kotv}) W_{k1} \quad (19)$$

$$P_2'' = \frac{P_1 S_1 - (G_{g1} W_{g1} - G_{g2} W_{g2}') + (G_{k1} - G_{gotv}) W_{g1} + (G_{k1} - G_{kotv}) W_{k1}}{S_2} \quad (20)$$

$$P_2' - P_2'' = \Delta P_2 \quad (21)$$

$$\frac{\Delta P_2}{P_2''} < 1\% \quad (22)$$

$$\Pi_{1i} = \frac{G_{ki}}{G_{gi}} \quad (23)$$

$$\rho_{gi} = \frac{P_i}{R_g T_{gi}} \quad (24)$$

$$\pi(\lambda_i) = \frac{P_H}{P_i} \quad (25)$$

$$\lambda_i = \sqrt{\left[ 1 - \left[ \pi(\lambda_i) \right]^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (26)$$

$$M(\lambda_i) = \sqrt{\left( \frac{\frac{2}{k+1} + \lambda_i^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2} \right)} \quad (27)$$

$$W_{kotvi} = \xi \sqrt{\left(2 \frac{P_i - P_H}{\rho_k}\right)} \quad (28)$$

$$W_{gotvi} = \xi M(\lambda_i) \sqrt{(kR_g T_{gi})} \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{W_{kotvi} \rho_k}{W_{gotvi} \rho_g \Pi_{1i} + W_{kotvi} \rho_k} \quad (30)$$

$$G_{kotvi} = W_{kotvi} \rho_k (1 - \alpha) F_{otv} \quad (31)$$

$$G_{gotvi} = W_{gotvi} \rho_g \alpha F_{otv} \quad (32)$$

$$c_x = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0.4 \quad (33)$$

$$Re = \frac{\rho_{rg}(W_g - W_k) a_k}{\mu_g} \quad (34)$$

Расчет истечения потока через отверстия проводился следующим образом. Значение давления и концентрации  $\Pi_{1i} = G_k / G_i$  в отверстии (i - номер отверстия) принималось равным значениям в конце сечения перед отверстием. Для расчета параметров истекающих струй использовались уравнения, аналогичные уравнениям статьи [5].

**Для расчета задавались следующие граничные условия на входе в канал:**

$$N = 10; G_{k0} = 0.069 \text{ кг/с}; G_{g0} = 0.046 \text{ кг/с}; R_g = 287 \text{ Дж/кг К}; l_{ch} = 0.16 \text{ м};$$

$$D_{ch} = 0.01 \text{ м}; P_0 = 1806063 \text{ Па}; W_{k0} = 28.8 \text{ м/с}; W_{g0} = 28.8 \text{ м/с}; T_{k0} = 300 \text{ К};$$

$$T_{g0} = 300 \text{ К}; FF_{otv} = 0.785 \text{ мм}^2; P_H = 100000 \text{ Па}; a_k = 50 \text{ мкм}.$$

Получим решение для части канала, содержащего 10 отверстий. Разделим канал на десять частей, каждая из которых содержит один канал и одно отверстие. Сначала рассчитываем изменения параметров двухфазного потока в канале до отверстия, по уравнениям 1-12. Затем по уравнениям 13-33 рассчитываем изменения параметров двухфазного потока на участке отверстия и параметры истекающих струй. После этого используем полученные результаты как начальные параметры для следующего элемента канала. Повторяем этот расчет до последнего отверстия, и объединяем данные каждого элемента, чтобы получить общий результат.

**Использованы следующие обозначения параметров:**

P - давление, ρ - плотность, W - скорость, S - площадь сечения канала, T - температура, G - массовый расход, D - диаметр, дифференциал, ζ - коэффициент скорости, C - теплоемкость, λ - коэффициент теплопроводности и приведенная скорость, Nu - критерий Нуссельта, We - критерий Вебера, Re - критерий Рейнольдса, N - число отверстий, α - объемная концентрация газа, V, b - константы. F - площадь отверстий, Cш - коэффициент сопротивления капли, μ - коэффициент динамической вязкости газа;

**нижние индексы:** g - газ, k - капли, ch - канал, н - среда, в которую истекают струи, 0 - параметры на входе в смеситель, otv - отверстие, i - номер сечения, x - осевая координата, 1,2 - номер приближения.

Ниже представлены результаты расчета параметров внутри цилиндрического смесителя и параметров истекающих струй. Из графика рисунка 2 видно, что давление P в канале возрастает, что объясняется уменьшением расхода газа G<sub>g</sub> и каплей G<sub>k</sub>, движущихся в канале, за счет истечения из отверстий, графики изменения расхода G<sub>k</sub> и G<sub>g</sub> фаз в канале приведены на рисунках 5 и 6. Поскольку масса капель существенно больше массы газа, а капли имеют относительно небольшой размер, то температура фаз практически не меняется в канале. Это следует и из графика рисунка 7. Поэтому плотность газовой фазы увеличивается, график рисунка 4. Соответственно уменьшатся осевые скорости фаз в канале, графики рисунка 8.

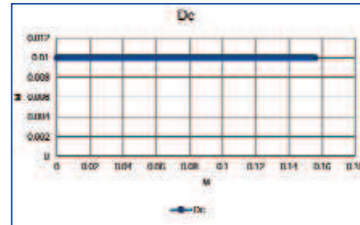


Рис. 2 Пример многофорсунного смесителя

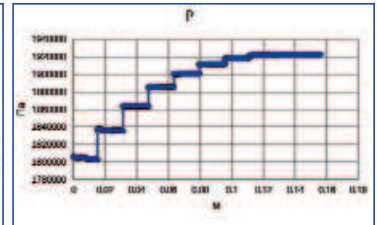


Рис. 3 Изменение давления вдоль канала смесителя

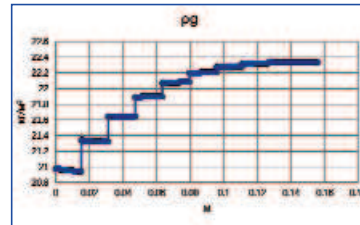


Рис. 4 Изменение плотности газа в канале

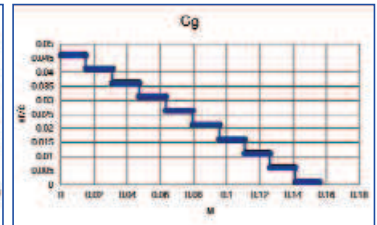


Рис. 5 Изменение расхода газа в канале

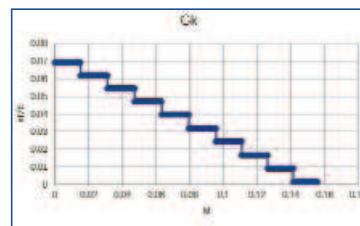


Рис. 6 Изменение расхода капель в канале

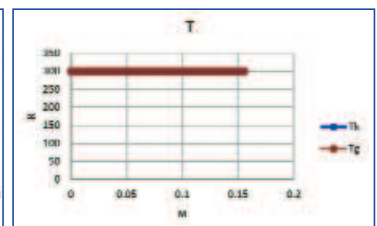


Рис. 7 Температуры капель и газа в канале

При этом скорость газовой фазы в канале W<sub>g</sub> меняется резко, отслеживая изменение давления, а частицы вследствие межфазового динамического взаимодействия и инерционности также уменьшают свою скорость W<sub>k</sub>, вследствие уменьшающейся скорости газа. Под действием увеличивающегося в канале давления P увеличивается скорость капель в отверстиях W<sub>kotvi</sub>, график рисунка 11, при этом увеличивается и расход капель через отверстия G<sub>kotvi</sub>, график рисунка 9. Расход газа через отверстия G<sub>gotvi</sub> также увеличивается, график рисунка 10, но причина увеличения этого расхода объясняется ростом плотности газа ρ<sub>gi</sub>, поскольку его скорость в отверстии W<sub>gotvi</sub> при выбранных граничных условиях не изменяется, график рисунка 12. Это связано с тем, что в канале существует сверхзвуковой перепад давления, так как π(λ<sub>i</sub>) = P<sub>H</sub>/P<sub>i</sub> < 0,528, поэтому газовая фаза истекает из отверстий с постоянной скоростью, равной скорости звука. При этом сохраняется постоянная массовая концентрация в смеси газовой и жидкостной фаз, что имеет важное значение при организации процесса горения в камерах сгорания. В работе [5] авторы решали обратную задачу, и было показано возможность формирования заданной концентрации между фазами путем формирования геометрии канала, в котором движется двухфазный поток.

В полученном решении концентрацию постоянной удалось сохранить путем выбора соответствующих граничных условий на входе и выходе канала, в частности, иметь сверхзвуковой перепад давления в канале. Следует отметить, что решаемая задача является трехмерной. Вместе с тем, разработанная методика позволяет в первом приближении получать геометрию устройства (обратная задача), или, задавая геометрию канала, его газодинамические характеристики (прямая задача). Естественно, судьей должны выступать эксперимент.

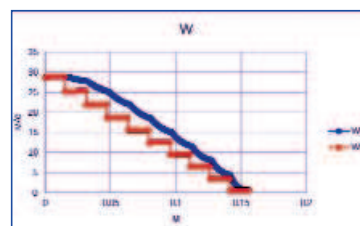


Рис. 8 Скорости капель и газа в канале

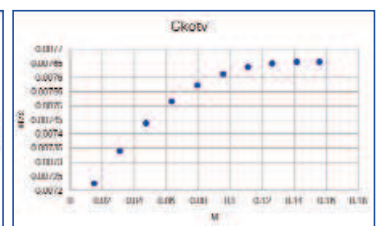


Рис. 9 Изменение расхода капель в отверстиях

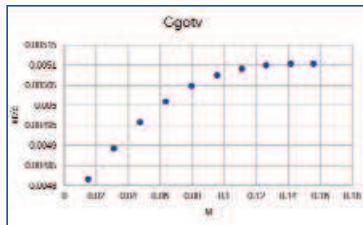


Рис. 10 Изменение расхода газа в отверстиях профиля канала

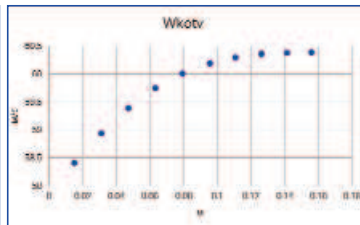


Рис. 11 Скорости капель в отверстиях

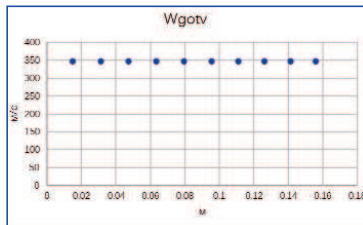


Рис. 12 Скорости газа в отверстиях

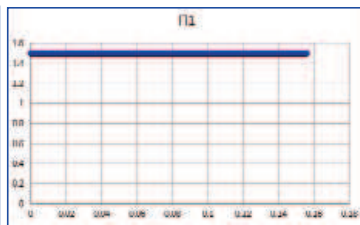


Рис. 13 Изменение концентрации в канале

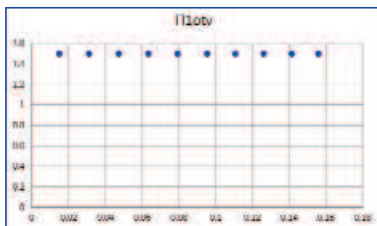


Рис. 14 Изменение концентрации в отверстиях

**Выводы.** Впервые разработана модель и программа решения прямой задачи расчета процесса многофорсунного

смесителя с двухфазным рабочим телом при истечении потока через форсунки по нормали к оси смесителя. Проведенные численные расчеты на водовоздушном рабочем теле подтвердили работоспособность модели и программы расчета. Модель и программа расчета позволяют получать поля топливоздушной смеси на выходе из смесителя. Расчет также показал возможность формирования необходимой концентрации между фазами.

**Литература:**

1. Лепешинский И.А. Газодинамика одно- и двухфазных течений в реактивных двигателях. М.: Изд-во МАИ. 2003. с. 276.
2. Лепешинский И.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А., Истомин Е.А., Решетников В.А. Оптимизация двухфазных течений с помощью решения обратной задачи. МЖГ 2016, № 1. с. 72-77.
3. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 2. С. 164 - 171.
4. Лепешинский И.А., Яковлев А.А., Молессон Г.В., Воронцов А.В., Онес В.И., Ципенко А.В. Численное и экспериментальное исследование газокпельного течения в сопле с большими концентрациями дисперсной фазы. Математическое моделирование, 14:7 (2002), 121-127.
5. Лепешинский И.А., Ся Сюй. Разработка методики расчета смесителя с двухфазным рабочим телом. Насосы. Турбины. Системы № 1 (34) 2020.с.52-59.

Связь с авторами: igorlepush@yandex.ru  
372276952@qq.com

**ИНФОРМАЦИЯ. Электрокар E-Tron FE07 от Audi**

Мировые автопроизводители, совершенствуя традиционные двигатели, всё пристальнее смотрят в сторону электродвигателей и, соответственно, электромобилей. Для последних организован и регулярно проводится международный турнир "Формула E", которому с турнира 2020-2021 года Международной автомобильной федерацией (FIA) придан статус чемпионата мира, присоединив его к таким соревнованиям как "Формулы-1" и другим.

Для выравнивания исходных условий для участников турнира FIA определяет параметры и характеристики подавляющего количества узлов гоночного автомобиля: шасси должны быть из углеродного волокна, кузов - из углеродного композита, для колёс используются 18-дюймовые покрышки от Michelin, литий-ионный аккумулятор ёмкостью 52 кВт·ч только производства компании McLaren Applied Technologies.

Командам для получения каких-нибудь технических преимуществ разрешено самостоятельно совершенствовать силовую электронику, трансмиссию, систему управления электропитанием и рекуперацию энергии. Так, компания Audi в своём электрокаре E-Tron FE07 использует шестифазный электродвигатель-генератор MGU05 собственной разработки. Переменный ток на него подаётся через инвертор от одинаковой для всех команд аккумуляторной батареи постоянного тока. Электродвигатель вращается со скоростью в 20 тысяч оборо-



тов в минуту, и в нормальном режиме выдаёт 335 л.с. и в кратковременном - 382 л.с. Этого достаточно для разгона электрокара FE07 массой 900 кг до 100 км/ч всего за 2,8 секунды и обеспечивает ему максимальную скорость в 240 км/ч.

Корпус электродвигателя изготовлен из углеродистого композита. Масса двигателя MGU05 вместе с инвертором составляет 35 кг. Двигатель MGU05 в режиме генерации энергии работает при торможении болида FE07. Система работает на первоначальных этапах торможения и позволяет



вернуть в батарею до 40 % уже израсходованной энергии.

Энергетическая эффективность (к.п.д.) инвертора, электродвигателя и коробки передач суммарно составляет порядка 97 %. Перед гонкой аккумуляторные батареи полностью заряжаются, и этой энергии хватает для полного завершения гонки даже при выходе из строя системы рекуперации. Если же сбоев работе не будет, то на финише в батарее должно остаться еще около 21 кВт·ч энергии.

Команда Audi участвует в соревнованиях электрических болидов с момента их начала в 2014 году, и за это время имела 12 побед и ещё 43 вторых и третьих мест, а в сезоне 2018 года по полученным очкам заняла первое место. Но сезон 2021 года будет для Audi, к сожалению, последним.

В 2022 году Audi примет участие уже в "Дакаре", впервые после своего ухода в 1987 году. К этим гонкам компания готовит внедорожник с гибридной силовой установкой, в которой бензиновый турбомотор TFSI будет работать только для подзарядки аккумулятора. На новом внедорожнике будут внедрены многие технические решения, апробированные в болиде FE07. И, в свою очередь, испытания "Дакаром" перспективных разработок позволит Audi использовать их на серийных электромобилях. В компании прогнозируют, что к 2025 году около 40 % произведенных ими автомашин будут либо электромобилями, либо гибридами.

