Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 118-128.
Aerospace MAI Journal, 2025, vol. 32, no. 2, pp. 118-128. (In Russ.).

Научная статья
УДК 621.454.3 + 621.45.02
URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184997
EDN: https://www.elibrary.ru/XHIYCN

Моделирование влияния размера инертных частиц на характер течения в камере сгорания и газодинамические потери в РДТТ классической схемы

Булат Дамирович Нигматуллин[1]✉, Андрей Наилевич Сабирзянов[2]

[1, 2] Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[1] bnigmatullin@internet.ru✉
[2] ANSabirzyanov@kai.ru

Аннотация. Исследовалось влияние монодисперсного течения на газодинамические потери в камере сгорания и горловине сопла ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) классической схемы, моделирование осуществлялось в осесимметричной и трехмерной постановках. Моделировались течения с частицами размером 2, 10 и 50 мкм, массовая доля которых составляла 4,625%. Использовался подход, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с применением двухпараметрических моделей турбулентности k–ε RNG и k–ω SST в квазистационарном приближении. Представлены характерные профили скорости и концентрации в камере сгорания, минимальном сечении, а также потери скорости двухфазного потока на срезе сопла в зависимости от размера инертных частиц и применяемых моделей турбулентности. Показаны немонотонность газодинамических потерь и характерная зависимость коэффициентов расхода и сопла от размера частиц двухфазного потока. Представлены влияние двухфазного течения на расположение поверхности критического перепада давления в горловине сопла и различие между решениями задачи для двухфазного потока в ракетном двигателе твердого топлива в осесимметричной и трехмерной постановке.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, металлизированные твердые ракетные топлива, двухфазное течение, профиль скорости в канальном заряде, коэффициент расхода сопла, коэффициент сопла

Для цитирования: Нигматуллин Б.Д., Сабирзянов А.Н. Моделирование влияния размера инертных частиц на характер течения в камере сгорания и газодинамические потери в РДТТ классической схемы // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 118-128. URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184997

Original article

Modeling the Inert Particles Size Impact on the Flow Character in the Combustion Chamber and Gas-dynamic Losses in the Solid Fuel Rocket Engine of the Classic Scheme

Bulat D. Nigmatullin[1]✉, Andrei N. Sabirzyanov[2]

[1, 2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[1] bnigmatullin@internet.ru✉
[2] ANSabirzyanov@kai.ru

© Нигматуллин Б.Д., Сабирзянов А.Н., 2025

Abstract

The authors studied the effect of the monodisperse flow on the gas-dynamic losses in the combustion chamber and nozzle throat of a classical scheme solid propellant rocket motor in both axisymmetric and three-dimensional formulations. Flows with the particles of 2, 10 and 50 μm in size, which mass fraction was 4,625%, were being simulated. An approach based on solving the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations employing two-parameter turbulence models k–ε RNG and k–ω SST in the quasi-stationary approximation was applied.

It was found that in the solid propellant grain channel particles tend to accumulate in the flow core, thereby distorting the cosine velocity profile typical for the homogeneous flows by a peculiar kind of "dent". The shapes of the "hollow", i.e. the velocity loss on the channel axis, depend on the size and mass of the particles, as well as on the mass of the entire particle cloud, which increases as it approaches the channel exit. In the throat and at the nozzle exit area, the presence of particles leads as well to a similar decrease in the axial velocity, with the greatest losses for particles size of 10 μm.

It was revealed that the lagging effect from the particles presence in the nozzle throat leads to a significant shift of the critical pressure drop area depending on the particles size.

The article presents distinctive velocity and concentration profiles in the combustion chamber and in the nozzle throat, as well as the loss of velocity of a two-phase flow at the nozzle exit area depending on the size of inert particles and the turbulence models employed. The gas-dynamic losses non-monotonicity and the characteristic dependence of the flow rate and nozzle coefficients on the particle size of the two-phase flow are demonstrated as well. The difference between the solutions of a two-phase flow in a solid propellant rocket motor in axisymmetric and three-dimensional formulations was established.

It is demonstrated that with the injected particles size increase, the particle-free zone increases, which extent is being determined by the distance from the nozzle wall to the boundary between the homogeneous and heterogeneous medium and stipulated by an increase in inertial forces.

Keywords: solid propellant rocket motor, metallized solid rocket propellants, two-phase flow, tubular grain velocity profile, flow coefficient, nozzle coefficient

For citation: Nigmatullin B.D., Sabirzyanov A.N. Modeling the Inert Particles Size Impact on the Flow Character in the Combustion Chamber and Gas-dynamic Losses in the Solid Fuel Rocket Engine of the Classic Scheme. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):118-128. (In Russ.). URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184997

List of Figures

Fig. 1. Computational scheme
Fig. 2. Mach number and concentration profiles for heterogeneous flow with particle size of 2 μm and homogeneous flow in the middle of the grain channel
Fig. 3. Mach number and concentration profiles for heterogeneous flow with particle size of 10 μm and homogeneous flow in the middle of the grain channel
Fig. 4. Mach number and concentration profiles for heterogeneous flow with particle size of 50 μm and homogeneous flow in the middle of the grain channel
Fig. 5. Mach number and concentration profiles for heterogeneous flow with particle size of 2 μm and homogeneous flow in the nozzle throat
Fig. 6. Mach number and concentration profiles for heterogeneous flow with particle size of 10 μm and homogeneous flow in the nozzle throat
Fig.7. Mach number and concentration profiles for heterogeneous flow with particle size of 50 μm and homogeneous flow in the nozzle throat
Fig. 8. Mach number profiles for solutions in axisymmetric and full-size formulations in the middle of the grain channel
Fig. 9. Concentration profiles for solutions in axisymmetric and full-size formulations in the middle of the grain channel
Fig.10. Mach number profiles for solutions in axisymmetric and full-size formulations in the nozzle throat
Fig.11. Concentration profiles for solutions in axisymmetric and full-size formulations in the nozzle throat

List of Tables

Table. Flow and nozzle coefficients

Введение

В ракетных двигателях твердого топлива (РДТТ) для повышения энергетических и тяговых характеристик используют твердые топлива (ТТ), имеющие в своем составе металлические добавки в виде порошков различной дисперсности. Благодаря использованию порошкообразных металлов и их гидридов увеличивается удельный импульс тяги вследствие повышения температуры продуктов сгорания (ПС) [1]. Наряду с увеличением энергетических характеристик за счет введения металлизированных горючих, возникает проблема совершенства процессов в камере сгорания (КС) и сопле, связанная с образованием конденсированных частиц оксида металла и частиц-агломератов в результате коагуляции и дробления в потоке ПС, выпадением агломератов на поверхность теплозащитного покрытия КС и сопла, с разностью скорости газа и к-фазы в расширяющейся части сопла, с увеличением газодинамических потерь вследствие наличия частиц в потоке и др., что в итоге ведет к уменьшению удельного импульса ракетного двигателя [2, 3].

В большинстве работ, посвященных исследованию влияния частиц к-фазы на газодинамические потери в РДТТ, рассматривается в основном расширяющаяся часть сопла, что справедливо, так как именно в этой области достигается наибольшая скорость истечения ПС, наибольшее отставание частиц и, следовательно, наблюдаются наибольшие газодинамические потери.

Например, в работе [4] рассматриваются вопросы образования в сопле зоны, свободной от частиц и, следовательно, влияния размера частиц на скорость истечения. Авторы [4], выполнив численный расчет в трехмерной нестационарной постановке с использованием метода моделирования больших вихрей, делают вывод о том, что влияние размера частиц на потери в сопле имеет немонотонный характер, и наибольшие потери для определенного типа сопла приходятся на частицы размером 30 мкм из исследованного диапазона от 1 до 100 мкм. В свою очередь, авторы работы [5], исследовав влияние частиц размером 1 и 10 мкм на потери тяги, пришли к выводу, что большие потери соответствуют частицам размером 10 мкм.

Распределение скорости в горловине сопла в зависимости от размера частиц рассмотрено в работе [6], где показано, что частицы размером 10 мкм вызывают сильный эффект торможения, тем самым отдаляя от минимального сечения сопла поверхность критического перепада, частицы же размером 1 мкм оказывают меньшее влияние, а расположение поверхности критического перепада в потоке с частицами размером 100 мкм соответствует гомогенному потоку, что весьма сомнительно, но отражает немонотонный характер зависимости потерь от размера частиц.

Исследуя влияние деформации частиц алюминия под действием набегающего потока на формирование зон, свободных от частиц, авторы [7] пришли к выводу, что деформация частиц оказывает влияние на их способность следовать по линиям тока, на потери из-за рассеяния, а также на выпадение частиц на стенку сопла. При сравнении течений в коническом и профилированном соплах установлено, что двухфазное течение с деформированными частицами оказывает меньшее влияние на потери в профилированном сопле.

В [8] авторы, исследуя полидисперсное двухфазное течение на сверхзвуковом участке сопла, обращают внимание на важность учета силы Магнуса, которая влияет на формирование траектории частиц (капель), подверженных вращению.

Немаловажными являются работы по исследованию влияния физико-химических свойств металлического топлива на параметры РДТТ. В работах [9–12] приводятся данные о различных составах металлических топлив и их влиянии на потери удельного импульса и тяги двигателя, а также на совершенство процессов в КС.

Адекватное моделирование двухфазного потока в КС требует учета всего спектра физико-химического взаимодействия. Например, в работе [13] исследовалось влияние размера, начальной температуры, площади вдува и массового расхода частиц алюминия на эффективность процессов в камере дожигания прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Так, при течениии с частицами с большей начальной температурой сокращается длина фронта пламени, а меньшие размеры гарантируют сокращение времени теплоотдачи. Распределение частиц по большему объему увеличивает контакт с окислителем, что повышает эффективность горения. Влияние наличия сажи в ПС на коэффициенты совершенства процессов в КС, расхода и сопла показаны в работе [14].

Кроме всего прочего, учет наличия частиц в РДТТ при его работе может иметь большое значение при проектировании внутренней геометрии КС, в особенности для двигателей с утопленными соплами с сильно загроможденными проходными сечениями. В последних имеет место сильное осаждение частиц в предсопловом объеме [15, 16].

Очевидно, что размеры частиц и их массовая доля в ПС определяют структуру потока и внутрибаллистические характеристики РДТТ. В распространенных инженерных зависимостях оценки потерь в двухфазных потоках ПС в РДТТ, полученные на основе статистической обработки данных,

влияние размера частиц весьма неоднозначно и отличается от аналитической зависимости, предполагающей отставание частиц от газа пропорционально квадрату диаметра частиц.

В настоящей работе ставилась задача рассмотреть влияние размера инертных частиц ПС ТТ на внутрибаллистические характеристики и газодинамические потери моделируемого РДТТ. Задача решалась в программном пакете Ansys Fluent, позволяющем моделировать различные газодинамические системы. Влияние частиц на параметры РДТТ анализировалось на основе сопоставления результатов моделирования.

Общие положения и принятые допущения

Для моделирования двухфазного течения в РДТТ классической схемы были построены сеточные модели в осесимметричной и трехмерной постановке. Расчет проводился в квазистационарном приближении. Использовался подход, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, для замыкания которых применялись двухпараметрические модели турбулентности k–ε RNG и k–ω SST с типовым набором модельных констант.

Для определения характера влияния размера частиц на газодинамическую картину течения в КС РДТТ частицы представлены как монодисперсные. Учитывались обмен энергией, массой и импульсом между фазами, силы термодиффузии и подъемная сила Сэффмана.

В качестве объекта исследования рассматривался РДТТ классической схемы с зарядом ТТ, горящим по внутреннему каналу, и забронированными торцами (рис. 1). Обозначения на рис. 1: $R_{кан}/R_{min}$ = = 3,2; R_a/R_{min} = 3,04; $R_{кс}/R_{min}$ = 5,86; R_1/R_{min} = 0,8; $R_{кан}$, R_{min}, R_a, R_1 и $R_{кс}$ – радиусы канала заряда, минимального сечения, среза сопла, скругления входного участка и КС; длина заряда составляет 5,8 калибров. Для корректного определения параметров потока на срезе сопла в расчетной модели учитывался дополнительный объем за соплом. На выходе дополнительного объема задавалось постоянство атмосферного давления в поперечном сечении. Стенки сопла и участков днищ гладкие с условиями прилипания и непротекания. Рабочее тело с температурой 2888 К и молярной массой 28,966 кг/кмоль подавалось в КС с поверхности

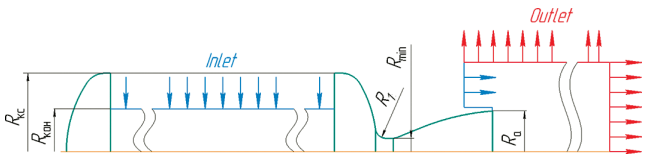

Рис.1. Расчетная схема

горения ТТ с массовым расходом $\dot{m}$ =21,62 кг/с. Геометрические параметры модели не изменялись. Теплообмен со стенкой не учитывался. Изменение параметров рабочего тела по тракту двигателя подчинялось уравнению состояния идеального газа; теплоемкость задавалась полиномиальным законом, а вязкость изменялась по закону Сазерленда.

Расчетная сетка содержит 210976 элементов с минимальным ортогональным качеством 0,73 и максимальным соотношением сторон 24,78. Минимальный размер ячейки составляет 0,6 мм в горловине сопла, максимальный – 2 мм в дополнительном объеме за соплом. Параметр y^+ изменялся в диапазоне от 0,03 до 100, где минимальные значения соответствовали областям КС и дозвукового участка сопла.

О дискретной модели

Для учета влияния частиц на газовую среду использовалась модель дискретной фазы, основанная на методе Эйлера–Лагранжа.

При расчете были приняты следующие положения и допущения:

1. Частицы, вдуваемые в моделируемую среду ПС, являются инертными, способными к теплообмену с окружающей средой, а при контакте со стенкой поглощаются последней.

2. Физические свойства вдуваемых частица соответствуют свойствам оксида алюминия при температуре 2900 К [17]. Частицы подаются в моделируемую среду с массовым расходом $\dot{m}_{Al_2O_3}$ =1 кг/с.

3. Частицы не занимают объем в КС, что лишь незначительно влияет на результаты расчета, так как даже при больших массовых долях конденсата плотность двухфазной смеси примерно равна плотности гомогенной [18].

4. Размеры и масса частиц постоянны во всем объеме модели.

5. Частицы не вдуваются в объем КС по отдельности, а поступают в моделируемую среду в кластерах.

Массовый расход частиц оксида алюминия (Al_2O_3) с размерами 2, 10 и 50 мкм составлял $\dot{m}_{Al_2O_3}$ =1 кг/с, что соответствует массовой доле конденсата в моделируемой среде

$$z = \frac{\dot{m}_{Al_2O_3}}{\dot{m}} \cdot 100\% = 4{,}625\%,$$

где $\dot{m}$ – массовый расход рабочего тела.

Результаты моделирования двухфазного монодисперсного потока в осесимметричной постановке

Изменение числа Маха потока и концентрации частиц в середине канала в зависимости от при-

веденного радиуса $\bar{R} = R_i/R$ (R_i – текущий радиус в сечении, R – полный радиус) для гомогенного и гетерогенного потоков с размерами частиц, равными 2, 10 и 50 мкм, представлены на рис. 2–4, пунктирной линией показаны результаты, полученные по модели k–ω SST, а сплошной – k–ε RNG.

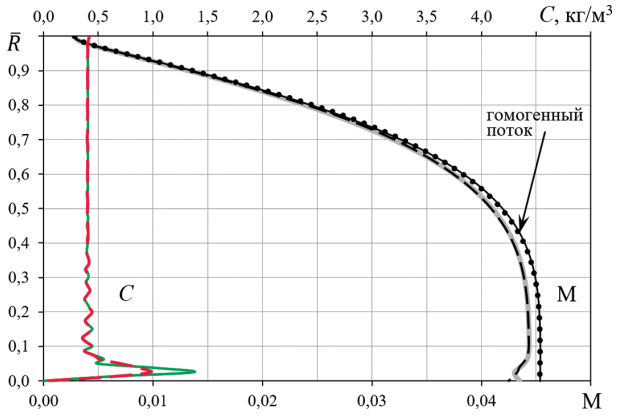

Рис. 2. Профили числа Маха и концентрации для гетерогенного потока с размером частиц 2 мкм и гомогенного течения в середине канала заряда

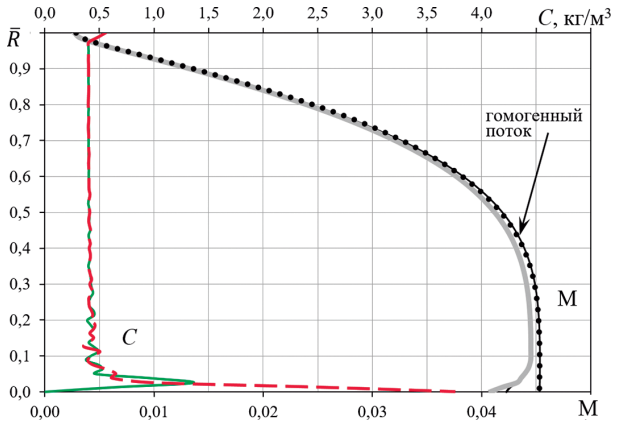

Рис. 3. Профили числа Маха и концентрации для гетерогенного потока с размером частиц 10 мкм и гомогенного течения в середине канала заряда

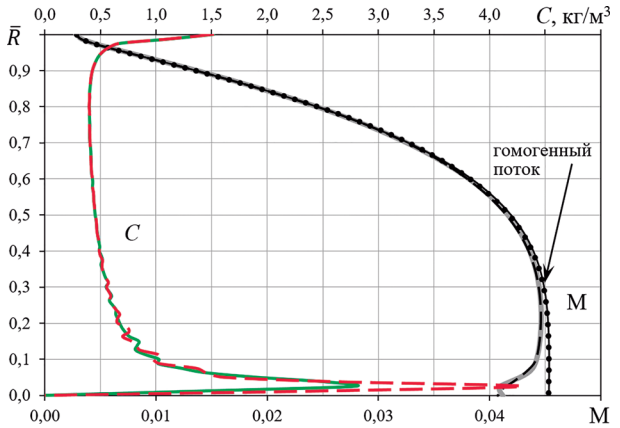

Рис. 4. Профили числа Маха и концентрации для гетерогенного потока с размером частиц 50 мкм и гомогенного течения в середине канала заряда

Профили скорости гомогенного потока, рассчитанные с применением рассматриваемых моделей турбулентности, имеют несущественные различия и носят косинусоидальный характер [19, 20], описываемый уравнением, являющимся эталоном для канальных течений со вдувом:

$$v_x = v_{x0} \cos\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{R_i}{R}\right)^2\right],$$

где $v_{x0} = \pi x u/R$ – скорость потока на оси канала; u – скорость подачи рабочего тела с поверхности ТТ; x – продольная координата сечения от входа в канал.

Так как газовой фазе требуется затратить определенную часть энергии на проталкивание частиц, взвешенных в потоке, что отражается на скорости гетерогенного потока, наибольшие потери скорости происходят в ядре потока, что связано с наибольшей концентрацией там твердой фазы, проявляющейся на профиле скорости наличием «лунки». Подобное явление уменьшения скорости в ядре течения отмечено в работах [4, 5].

Потери скорости с увеличением размера частиц смещаются со всего фронта течения в сторону ядра потока, что указывает на распределение мелких частиц по большему объему в рассматриваемом сечении. С увеличением размера частиц их миграция от поверхности горения заряда в сторону оси происходит быстрее за счет большей инерции. Потери скорости в гетерогенном потоке с размерами частиц в 2, 10 и 50 мкм относительно гомогенного для моделей турбулентности k–ε RNG/k–ω SST соответственно равны 2,42%/2,45%; 1,98%/1,94% и 1,47%/1,47%.

В общем случае наибольшая концентрация частиц наблюдается в области, прилегающей к оси канала заряда, и увеличивается по длине канала по мере поступления новых частиц, мигрировавших от горящей поверхности. Различия между осредненными значениями концентраций частиц размерами 10 и 50 мкм в середине канала для моделей турбулентности k–ε RNG/k–ω SST относительно размера 2 мкм больше на 1,96%/12,23% и 48,31%/57,59% соответственно. Такое большое различие осредненных значений концентраций объясняется неоднозначностью численного решения на оси как для середины канала, так и для горловины сопла, что можно наблюдать на приведенных графиках.

С приближением течения к выходу из канала заряда наблюдаются описанные выше тенденции изменения профилей относительной скорости и концентрации частиц. Значения потерь скорости не сильно отличаются от потерь в середине канала и соответственно равны 2,39%/2,52%; 1,86%/1,98%

и 1,22%/1,36% для моделей k–ε RNG/k–ω SST, что свидетельствует о сохранении косинусоидального характера профиля скорости для гетерогенного потока. Концентрация частиц размером 10 и 50 мкм относительно концентрации 2 мкм соответственно на 5,34% и 39,69% больше.

Стоит отметить, что на представленных зависимостях изменения концентрации частиц относительно приведенного радиуса на фоне скачка в приосевой области наблюдается аномальная тенденция полного обнуления ее значения непосредственно на оси, свойственная, как будет показано далее, только осесимметричному приближению. Исключение составляет график для модели турбулентности k–ω SST на рис. 3.

Изменение числа Маха потока и концентрации частиц в горловине сопла представлено на рис. 5–7. Наглядно показано, что наибольшие потери скорости наблюдаются для гетерогенного потока с размером частиц 10 мкм, что, предположительно, является следствием загромождения проходного сечения для газовой фазы частицами данной фракции в диапазоне $\bar{R} = 0{,}65 \ldots 0{,}75$, в котором наблюдается скачкообразное увеличение концентрации данных частиц, обусловленное обтеканием стенки заднего днища.

Концентрация частиц с размерами 2 мкм в горловине сопла ниже концентраций более крупных (10 и 50 мкм) частиц для моделей турбулентности k–ε RNG/k–ω SST на 42%/73,94% и 53,25%/77,78% соответственно, однако частицы размером 2 мкм занимают большее по радиусу проходное сечение, создавая наибольшее гидравлическое сопротивление.

Примечательным является незначительное изменение профиля скорости потока с размером частиц 50 мкм (см. рис. 7) относительно профиля гомогенного течения. Частицы размером 50 мкм загромождают меньшую площадь проходного сечения и в меньшей степени влияют на потери скорости в дозвуковой части сопла. Это обусловлено тем, что большая часть частиц, столкнувшись со стенкой на входе в горловину сопла, не препятствует свободному проходу ПС в газовой фазе. Скачок концентрации частиц данной фракции, наблюдаемый приблизительно в том же диапазоне $\bar{R} \approx 0{,}7$, существенно меньше, чем частиц размером 10 мкм.

Представленные распределения скорости в минимальном сечении согласуются с данными [6] о смещении вниз по потоку критического перепада при неравновесном двухфазном течении. Потери скорости в минимальном сечении для гетерогенного потока с частицами размером 2, 10 и 50 мкм для моделей k–ε RNG/k–ω SST соответственно составляют 7,23%/7,8%; 13,2%/13,12% и 1,41%/1,47%.

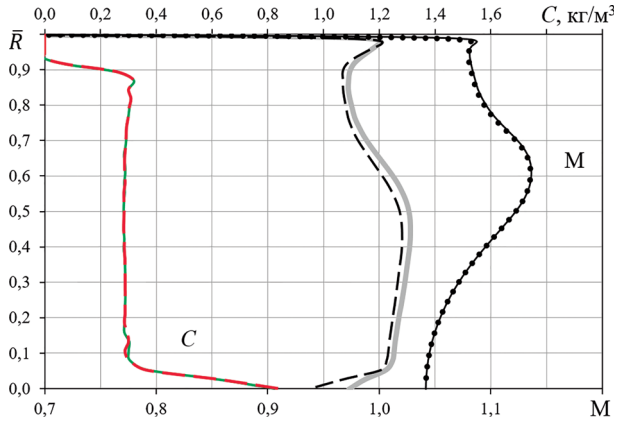

Рис. 5. Профили числа Маха и концентрации для гетерогенного потока с размером частиц 2 мкм и гомогенного течения в минимальном сечении

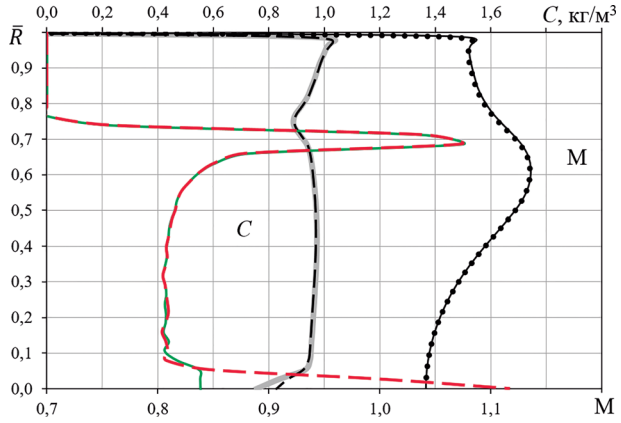

Рис. 6. Профили числа Маха и концентрации для гетерогенного потока с размером частиц 10 мкм и гомогенного течения в минимальном сечении

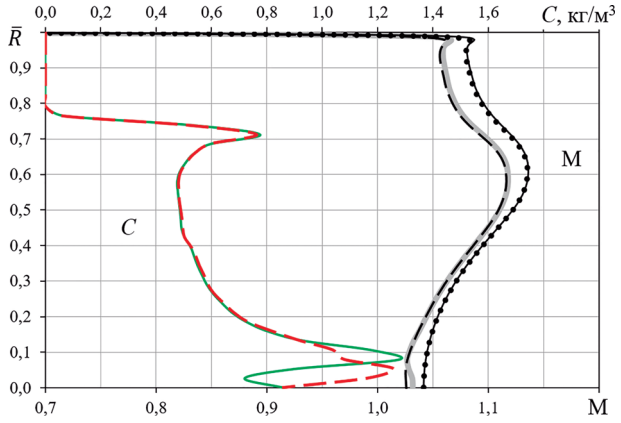

Рис. 7. Профили числа Маха и концентрации для гетерогенного потока с размером частиц 50 мкм и гомогенного течения в минимальном сечении

Структуры потока в областях переднего и заднего днищ различаются.

При заполнении объема переднего днища газом частицы увлекаются течением и в зависимости от их размера и массы либо заключаются в застойной зоне (частицы 2 и 10 мкм), либо оседают на стенках КС и заряда (частицы 50 мкм).

В объеме заднего днища частицам с небольшой инерцией (2 и 10 мкм) свойственно плавное изменение траектории и следование за потоком, что позволяет им избегать столкновения со стенкой. Частицы размером 50 мкм сталкиваются со стенкой в силу своей инертности. Согласно статистическим данным, полученным во время расчета, для частиц 50 мкм отношение количества выпавших на стенку частиц (trapped) к количеству ушедших из расчетной области (escaped) равно 0,66, а для частиц меньших размеров это соотношение равно нулю. Следует отметить, что частицы не увлекаются потоком в вихревую структуру за уступом заряда, что обусловлено инертностью частиц, а также наличием градиентов сил, направленных в сторону выхода из КС.

В горловине сопла наблюдается относительно равномерное загромождение проходного сечения при течении с частицами размерами 2 и 10 мкм, что обусловлено как поступлением частиц из объема заднего днища, избежавших столкновения со стенкой, так и их закономерным распределением на выходе из канала заряда. Частицы размером 50 мкм меньше загромождают проходное сечение в горле сопла.

Внутрибаллистические параметры двухфазной среды тесно связаны с коэффициентом расхода, отражающим степень совершенства конструкции и процессов в КС РДТТ:

$$\mu = \frac{\dot{m}}{m_{\text{ид}}},$$

где $\dot{m}$ – значение действительного массового секундного расхода, определяемое в процессе численного решения;

$\dot{m}_{\text{ид}} = \dfrac{p_0 F_{\min} A(k)}{\sqrt{R(1-z)T_0}}$ – идеальный расход, рассчитанный через осредненные параметры потока;

p_0 и T_0 – полное давление и полная температура в минимальном сечении;

$F_{\min}$ – площадь минимального сечения;

k, R – отношение теплоемкостей и газовая постоянная ПС;

$$A(k) = \sqrt{k}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}.$$

Осредненные по числу итераций значения полного давления, секундного расхода и пересчитанные значения коэффициента расхода сведены в таблицу (данные для модели турбулентности k–ε RNG). Показано, что полное давление и коэффициент расхода зависят от размера частиц в гетерогенном потоке.

Движение частиц в расширяющейся части сопла соответствуют классическим представлениям: частицы с небольшими размерами увлекаются потоком и распределяются по объему, а частицы с большими размерами в силу своей инертности занимают небольшую часть объема раструба сопла в ядре потока.

Пренебрегая разделением на виды потерь, на основании расчетных значений скорости гетерогенного потока на срезе сопла w_a можно определить значение коэффициента сопла:

$$\varphi_{\text{c}} = \frac{w_a}{w_a^{\text{ид}}},$$

где $w_a^{\text{ид}}$ – идеальная скорость на срезе сопла:

$$w_a^{\text{ид}} = \sqrt{\frac{2k_a}{k_a - 1} R(1-z) T_0 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_0}\right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}}\right]};$$

k_a и p_a – показатель адиабаты и статическое давление на срезе сопла.

Осредненные значения скорости рабочего тела на срезе сопла и значения коэффициента сопла в зависимости от размера инертных частиц также представлены в таблице (данные для модели турбулентности k–ε RNG).

Согласно данным, приведенным в таблице, влияние размера частиц на потери скорости в сопле носит нелинейный характер, и самые большие потери наблюдаются при размере частиц 10 мкм. Можно предположить, что геометрические параметры сопла в сочетании с конфигурацией заряда определяют некоторый размер или массы частиц, которые будут занимать определенный «тормозящий» объем, при котором возникают наибольшие потери. Применение рассматриваемых моделей турбулентности не оказывает существенного влияния на результаты моделирования для гетерогенного потока с размером частиц 10 мкм и более. При частицах меньшего размера различие в результатах весьма заметно.

Результаты моделирования двухфазного монодисперсного потока в пространственной полноразмерной постановке

При расчете полноразмерной численной модели РДТТ принимались допущения и граничные

Коэффициенты расхода и сопла

Параметры	Гомогенный поток	Гетерогенный поток		
		d_s = 2 мкм	d_s = 10 мкм	d_s = 50 мкм
p_0, Па	6948752,0	6894192,3	6917851,6	6916332,2
$\dot{m}$	22,62	22,62	22,62	22,28
w_a, м/с	2269,590	2226,998	2202,529	2218,174
μ	0,997	1,030	1,023	1,024
φ_c	0,996	0,995	0,989	0,988

условия, соответствующие осесимметричному подходу. В связи с тем что решение полноразмерной задачи требует больших вычислительных ресурсов, строилась дискретная модель с более разреженной сеткой.

Газодинамический расчет проводился с применением моделей турбулентности k–ε RNG и k–ω SST для гетерогенного потока с размером частиц 10 мкм. На рис. 8–11 сопоставлены профили числа Маха и концентрации, полученные в результате решений задачи в осесимметричной и полноразмерной постановке для середины канала заряда и минимального сечений.

В пространственной полноразмерной постановке аномальные изменения скорости и концентрации на оси канала, характерные для осесимметричного приближения, не наблюдаются, что приводит к выводу о недостаточно адекватном решении задачи двухфазного течения в осесимметричной постановке. Примечательно то, что в

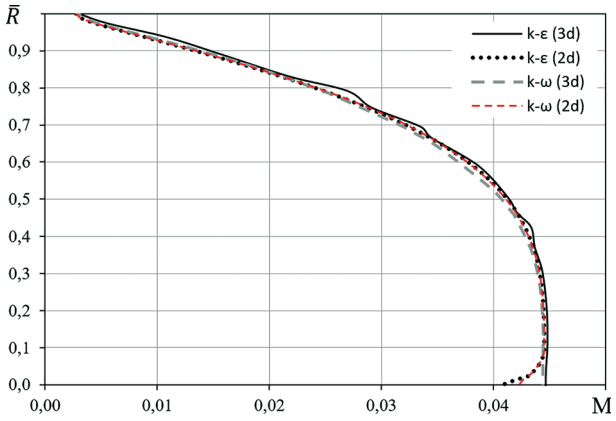

Рис. 8. Профили числа Маха для решений задачи в осесимметричной и полноразмерной постановке в середине канала заряда

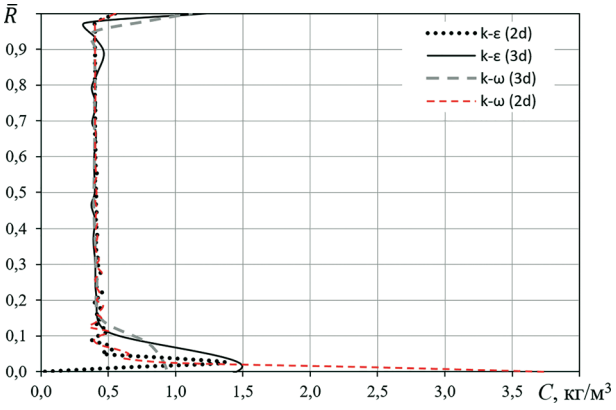

Рис. 9. Профили концентраций для решений задачи в осесимметричной и полноразмерной постановке в середине канала заряда

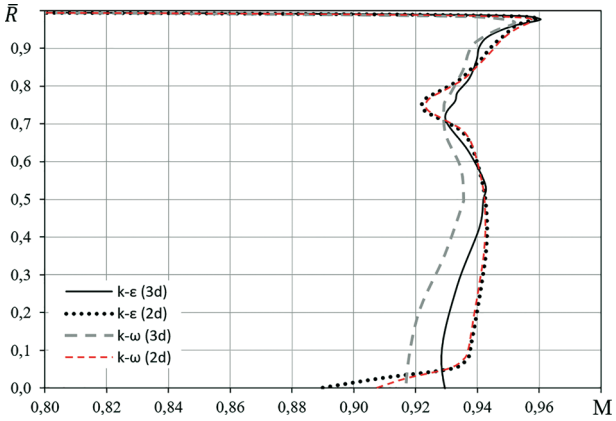

Рис. 10. Профили числа Маха для решений задачи в осесимметричной и полноразмерной постановке в минимальном сечении

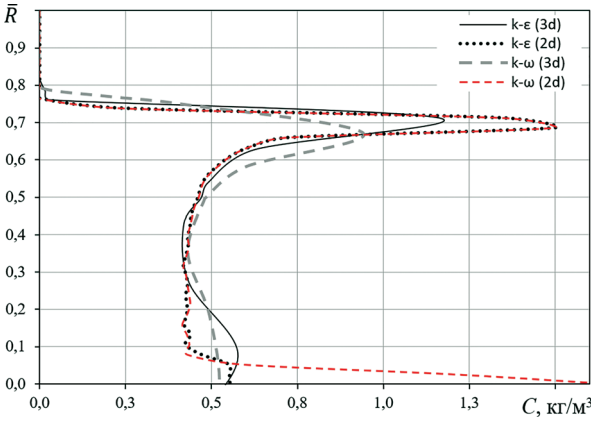

Рис. 11. Профили концентраций для решений задачи в осесимметричной и полноразмерной постановке в минимальном сечении

профилях концентраций по трехмерным моделям присутствует незначительная несимметричность.

По сравнению с осесимметричным подходом в трехмерной модели профили скорости как в середине канала заряда, так и в минимальном сечении, полученные по модели турбулентности k–ε RNG, являются более наполненными (см. рис. 8, 10), что может быть следствием применения грубой сетки.

Надо отметить некоторые различия в результатах расчета распределения концентраций частиц в полноразмерной постановке при использовании моделей турбулентности k–ε RNG и k–ω SST. Так, в профилях концентраций частиц, полученных с применением модели турбулентности k–ε RNG, наблюдаются значительные скачки концентрации по сравнению с распределениями, полученными по модели k–ω SST: ~50% на оси канала заряда (см. рис. 9) и ~22% в диапазоне $\overline{R} \approx 0{,}7$ минимального сечения (см. рис. 11). Вследствие вышесказанного, профили скорости претерпевают соответствующие изменения. Например, профиль скорости на оси канала заряда, рассчитанный по модели турбулентности k–ε RNG, имеет большее углубление по сравнению с профилем, рассчитанным по модели k–ω SST (на представленных зависимостях «лунки» сглажены и наглядно не отражены, в том числе из-за огрубленной сетки).

Выводы

На основании результатов численного моделирования двухфазного течения в РДТТ классической схемы с использованием моделей турбулентности k–ε RNG и k–ω SST можно сделать следующее выводы.

Решение задачи с использованием двухпараметрических моделей турбулентности как в осесимметричной, так и в трехмерной постановке обеспечивает, в общем, тождественные результаты для всего течения за исключением ядра потока. Отмечено влияние применяемой модели турбулентности на профили скорости и концентрации, что нагляднее всего показывает решение задачи в трехмерной постановке.

Установлено, что в канале заряда частицы имеют тенденцию скапливаться в ядре потока, тем самым искажая привычный для гомогенных течений косинусоидальный профиль скорости своеобразной «лункой». Размеры «лунки», т. е. потери скорости на оси канала, зависят от размеров и массы частиц, а также от массы всего облака частиц, которая увеличивается по мере приближения к выходу из канала. В горловине и на срезе сопла наличие частиц также приводит к подобному уменьшению осевой скорости, при этом наибольшие потери характерны для случая, когда частицы имеют размер более 10 мкм.

Наглядно показано влияние размеров частиц на расположение поверхности критического перепада в горловине сопла, что связано, в первую очередь, с эффектом торможения газового потока, обусловленного распределением частиц в объеме дозвукового участка сопла.

Показан нелинейный характер зависимостей коэффициентов расхода и сопла от размера инертных частиц, экстремальные значения наблюдаются при размерах частиц порядка 10 мкм.

Список источников

1. *Липанов А.М.* (ред.) Твердые топлива реактивных двигателей. Т. IV. Топлива. Заряды. Двигатели. М.: Машиностроение, 2011. 380 с.
2. *Глушко В.П.* (ред.). Теория ракетных двигателей. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980. 533 с.
3. *Шишков А.А.*, *Панин С.Д.*, *Румянцев Б.В.* Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. Москва: Машиностроение, 1989. 240 с.
4. *Li X.*, *Zhang H.*, *Bai B.* Particle-free zone of the two-phase flow in a convergent-divergent nozzle // Powder Technology. 2021. Vol. 394, pp. 1169–1177. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.09.055
5. *Maochang D.*, *Xijun Yu*, *Chen D.*, et al. Numerical Simulation of Gas-Particle Two-Phase Flow in a Nozzle with DG Method // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2019. Vol. 2019. No. 1783, pp. 1-12. DOI: 10.1155/2019/7060481
6. *Li Z.*, *Wang N.*, *Shi B.*, et al. Effects of particle size on two-phase flow loss in aluminized solid rocket motors // Acta Astronautica. 2019. Vol. 159, pp. 33-40. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.022
7. *Ding S.*, *Hu H.*, *Wang Q.* Drag force and heat transfer characteristics of deformable alumina droplets in compressible flows // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36. No. 3: 036106. DOI: 10.1063/5.0187738
8. *Бушланов В.П.*, *Бутов В.Г.*, *Глазунов А.А.* Численное исследование полидисперсных двухфазных течений в осесимметричном сопле Лаваля с учетом силы Магнуса, действующей на вращающиеся капли // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 88. С. 66–78. DOI: 10.17223/19988621/88/6
9. *Ворожейкина Д.А.*, *Еремин И.В.*, *Костюшин К.В.* Расчет квазиодномерного полидисперсного двухфазного течения в соплах // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9-3. С. 46-48.
10. *Xin H.*, *Wang K.*, *Ren H.*, et al. Comparative Study on Combustion Behavior of Aluminum-Based Alloy Fuels and Aluminum Powder in Solid Propellants // Metals. 2023. Vol. 13. No. 8:1492. DOI: 10.3390/met13081492
11. *Fukuchi A.* Effect of aluminum particle size on agglomeration size and burning rate of composite propellant // Journal of Thermal Science and Technology. 2022. Vol. 17. No. 1:21-00346. DOI: 10.1299/jtst.21-00346

12. *Tu Ch.*, *Chen X.*, *Chen F.*, et al. Effect of Al and AP particle sizes on the condensed combustion products characteristics of aluminized NEPE propellants // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. No. 1. DOI: 10.1038/s41598-024-70168-1
13. *Zhu M.*, *Chen X.*, *Zhou C.*, et al. Numerical Study of Micron Scale Aluminum Particle Combustion in an Afterburner Using Two Way Coupling CFD–DEM Approach // Flow, Turbulance and Combustion. 2020. Vol. 105. No. 6, pp. 191-212. DOI: 10.1007/s10494-019-00104-1
14. *Шайдулин Р.А.*, *Сабирзянов А.Н.* Влияние взаимодействия продуктов сгорания с продуктами разложения резиноподобного теплозащитного материала в объеме камеры сгорания РДТТ на коэффициенты расхода и сопла // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 158-168. URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182570
15. *Емельянов В.Н.*, *Якимова И.В.* Двухфазные течения в околосопловом пространстве установок на твердом топливе // Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8. № 3. С. 287-294.
16. *Арсентьева М.В.* Исследование течения двухфазного газового потока в предсопловой области энергетической установки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 11. С. 75-80.
17. *Силин Н.А.* (ред.). Теплофизические свойства компонентов горючих систем: Справочник. М.: НПО «Информ ТЭИ», 1992. 184 с.
18. *Пирумов У.Г.*, *Росляков Г.С.* Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 368 с.
19. *Райзберг Б.А.* (ред.). Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972. 384 с.
20. *Сабирзянов А.Н.*, *Хаматнурова Ч.Б.*, *Кузьмин В.В.* Газодинамические потери в проточной части канального заряда ракетного двигателя твердого топлива // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 3. С. 47-57. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-47-57

References

1. Lipanov AM. (ed) *Solid propellants of reaction-propulsion engines. Vol. IV. Propellants. Charges. Engines*. Moscow: Mashinostroenie; 2011. 380 p. (In Russ.).
2. Glushko VP. (ed) *Theory of rocket engines*. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie; 1980. 533 p. (In Russ.).
3. Shishkov AA, Panin SD, Rumyantsev BV. *Operational processes in solid fuel rocket engines*: *Handbook*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 240 p. (In Russ.).
4. Li X, Zhang H, Bai B. Particle-free zone of the two-phase flow in a convergent-divergent nozzle. *Powder Technology*. 2021;394:1169–1177. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.09.055
5. Maochang D, Xijun Yu, Chen D, et al. Numerical Simulation of Gas-Particle Two-Phase Flow in a Nozzle with DG Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2019;2019(1783):1-12. DOI: 10.1155/2019/7060481
6. Li Z, Wang N, Shi B, et al. Effects of particle size on two-phase flow loss in aluminized solid rocket motors. *Acta Astronautica*. 2019;159:33-40. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.022
7. Ding S, Hu H, Wang Q. Drag force and heat transfer characteristics of deformable alumina droplets in compressible flows. *Physics of Fluids*. 2024;36(3):036106. DOI: 10.1063/5.0187738
8. Bushlanov VP, Butov VG, Glazunov AA. Numerical modeling of polydisperse two-phase flows in an axisymmetric de Laval nozzle with account for the Magnus force acting on rotating droplets. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2024(88):66–78. (In Russ.). DOI: 10.17223/19988621/88/6
9. Vorozheikina DA, Eremin IV, Kostyushin KV. Calculation of quasi-one-dimensional polydisperse two-phase flow in nozzles. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2013;56(9-3):46-48. (In Russ.).
10. Xin H, Wang K, Ren H, et al. Comparative Study on Combustion Behavior of Aluminum-Based Alloy Fuels and Aluminum Powder in Solid Propellants. *Metals*. 2023;13(8):1492. DOI: 10.3390/met13081492
11. Fukuchi A. Effect of aluminum particle size on agglomeration size and burning rate of composite propellant. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2022;17(1):21-00346. DOI: 10.1299/jtst.21-00346
12. Tu Ch, Chen X, Chen F, et al. Effect of Al and AP particle sizes on the condensed combustion products characteristics of aluminized NEPE propellants. *Scientific Reports*. 2024;14(1). DOI: 10.1038/s41598-024-70168-1
13. Zhu M., Chen X., Zhou C. et al. Numerical Study of Micron Scale Aluminum Particle Combustion in an Afterburner Using Two Way Coupling CFD–DEM Approach. *Flow, Turbulance and Combustion*. 2020;105(6):191-212. DOI: 10.1007/s10494-019-00104-1
14. Shaydullin RA, Sabirzyanov AN. The Effect of Combustion Products Interaction with Decomposition Products of the Rubber-Like Heat-Protective Material in the SRE Combustion Chamber Volume on the Flow Rate and Nozzle Coefficients. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):158-168. (In Russ.). URL: https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=182570
15. Emel'yanov VN, Yakimova IV. Two-phase currents in the circumference of solid fuel installations. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2006;8(3):287-294. (In Russ.).
16. Arsentieva MV. The study of the flow of two-phase gas flow in preaproval region of the energy system. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2018(11):75-80. (In Russ.).
17. Silin NA. (ed) *Thermophysical properties of components of combustible systems: Handbook*. Moscow: NPO "Inform TEI"; 1992. 184 p. (In Russ.).

18. Pirumov UG, Roslyakov GS. *Gas dynamics of nozzles*. Moscow: Nauka; 1990. 368 p. (In Russ.).
19. Raizberg BA. (ed) *Fundamentals of the theory of work processes in solid fuel rocket systems*. Moscow: Mashinostroenie; 1972. 384 p. (In Russ.).
20. Sabirzyanov AN, Khamatnurova ChB, Kuz'min VV. Gas-dynamic losses in the flow part of the channel charge of a solid-propellant rocket engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022;21(3):47-57. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-47-57

Статья поступила в редакцию / Received 27.03.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 13.04.2025
Принята к публикации / Accepted 19.04.2025