

УДК 621.45.034

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-53-66

К вопросам сеточного влияния в методике численного моделирования нестационарных процессов горения

А.Т. Савчук¹, Л.В. Москаленко¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: Оценка запасов устойчивости процессов горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей (КС ГТД), основанная на искусственном моделировании возбуждения нестационарных процессов (НП) в КС, в параметрах температура – давление представляет собой актуальную задачу двигателестроения. Все большее количество летательных аппаратов (ЛА) требуют применения двигателей с высокой газодинамической устойчивостью (ГДУ) вплоть до 30 % и более, например при создании силовых установок для самолетов вертикального и укороченного взлета и посадки, экранопланов и др. Применение инструментария вычислительной гидрогазодинамики (англ. CFD – Computational Fluid Dynamics) для расчета горящих течений в КС ГТД в настоящее время является неотъемлемым этапом процесса проектирования, так как проведение численного исследования, в отличие от натурального эксперимента, требует значительно меньших материальных ресурсов, предоставляющих возможности моделирования трудно реализуемых на этапе стендовых испытаний дорогостоящих и небезопасных случаев летной эксплуатации ЛА, таких как пересечение реактивной струи впереди летящего ЛА либо фронта ударной волны (например, при подрыве боеприпаса) перед воздухозаборником воздушно-реактивного двигателя (ВРД), критический боковой ветер при взлете, приводящий к срыву потока на обечайке воздухозаборника, вертикальные порывы и турбулентность атмосферы, полет на больших углах атаки, эволюции ЛА (скольжение и др.). Результаты численного моделирования решающим образом определяются учетом ограничений применяемых моделей и упрощающих предположений для моделируемого течения. Существует множество источников ошибок в любых расчетах с использованием методов вычислительной газовой динамики: накопленные ошибки вычислений, чувствительность к размеру сетки, дискретизации, экстраполяции потоков в сеточных интерфейсах используемого солвера (ANSYS.Fluent), ошибки моделей турбулентности, допущения и упрощения, применяемые к конструкции, и т. д. В данной работе рассмотрено сеточное влияние на задачу доказательства случайной природы колебаний газа в КС ГТД, имеющей существенное значение для определения газодинамической устойчивости двигателя в целом.

Ключевые слова: вычислительная гидрогазодинамика, нестационарный процесс, камера сгорания, сеточное влияние.

Для цитирования: Савчук А.Т., Москаленко Л.В. К вопросам сеточного влияния в методике численного моделирования нестационарных процессов горения // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 53–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-53-66

Grid influence issues in the methodology of numerical modelling of non-stationary combustion processes

A.T. Savchuk¹, L.V. Moskalenko¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: Estimation of reserves of combustion process stability in gas turbine engine (GTE CC) based on artificial modeling of non-stationary process (NP) excitation in the combustion chambers in temperature-pressure parameters is an actual problem in engine engineering. An increasing number of aircraft require the use of engines with high gas dynamic stability (GDS) up to 30% and more, for example, when creating power plants for vertical and short take-off and landing aircrafts, ekranoplans (ground-effect vehicles) and etc. The use of computational fluid dynamics (CFD) tools for calculating combustion flows in the combustion chamber of a gas turbine engine is currently an integral part of the design process, since a numerical study, in contrast to a full-scale experiment, requires significantly fewer material resources providing the ability to model expensive and unsafe cases of aircraft

flight operation that are difficult to implement at the stage of bench tests, such as: crossing a jet distrail or a shock wave front (e.g., when an ammunition detonates) in front of the air intake of an air-jet engine, critical crosswind during takeoff leading to flow separation on the air intake cowl, vertical gusts and atmospheric turbulence, flight at high angles of attack, aircraft evolution (slip, etc.). The results of numerical simulation are decisively determined by the limitations of the applied models and simplifying assumptions for the simulated flow. There are many sources of errors in any calculation using computational gas dynamics methods: accumulated calculation errors, sensitivity to grid size, discretisation, flow extrapolation in grid interfaces of the used solver (ANSYS.Fluent), errors of turbulence models, assumptions and simplifications applied to the design, etc. This paper considers the grid effect on the problem of proving the random nature of gas oscillations in the combustion chamber of a gas turbine engine, which is essential for determining the gas dynamic stability of the engine as a whole.

Key words: computational fluid dynamics, non-stationary process, combustion chamber, grid effect.

For citation: Savchuk, A.T., Moskalenko, L.V. (2025). Grid influence issues in the methodology of numerical modelling of nonstationary combustion processes. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 53–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-53-66

Введение

В данной статье освещены вопросы постановки задачи и принимаемых допущений на основе расчетной модели камеры сгорания (КС) на стационарных расчетных режимах (малый газ, крейсерский, режим максимальной тяги), в ее нерасходящемся горящем переходном (transient) решении с требуемыми уровнями базовых невязок температуры/давления/скорости в выходном сечении (outlet) [1], с последующим искусственным возбуждением нестационарного процесса (НП) на общую точность, а также требуемые вычислительные ресурсы и стабильность получаемого решения. По результатам работы будут выработаны рекомендации к основным исследуемым параметрам расчетной модели, а именно: продуктивному максимальному размеру ячеек расчетной сетки.

Созданная расчетная сетка должна удовлетворять минимальным критериям солверов, моделирующих высокоградиентные процессы, протекающие в КС, при этом следует иметь в виду, что с увеличением количества элементов сетки соответственно возрастает время вычислений. В то же время, как показывают исследования [2–3], есть верхний предел размера сетки, когда полученный результат не зависит от дальнейшего уменьшения размеров расчетных ячеек.

При выборе параметров математической модели следует учитывать принципиальный физический характер течения в КС. При расчете КС с возникшим НП неизбежно по-

являются транс- и сверхзвуковые зоны течения, совместное рассмотрение которых с дозвуковым доменом определит выбор параметров всей расчетной модели переходного процесса. В ряде публикаций [4–9] приведены рекомендации и проведена оценка влияния указанных параметров потока и расчетной сетки с верификацией полученных результатов [10–14].

Как детально описано в [1, 3], предлагаемая методика является многоэтапной и решение задачи последовательно проходит этапы стационарного и нестационарного расчетов. В рамках текущего исследования были проведены серии нестационарных расчетов модельной КС на сетках разного разрешения (coarse/крупная, medium/средняя, fine/мелкая) и эквивалентной топологии и качества конечных элементов (неструктурированная сетка с тетраэдральными конечными элементами, сгенерированными стандартным инструментарием ANSYS-Mesh по методу Делано триангуляции с соизмеримым качеством элементов сеток), предшествовал стационарный расчет до достижения стабильного решения по критериям достижения низких среднеквадратичных невязок (около $1e-2$ по примитивным переменным) и массового дисбаланса входящего и выходящего потоков (не более 2 %). Используемые ниже фактические оценки и критерии состояния переходного процесса нестационарного горения по формальным расчетным критериям детально описаны в [4].

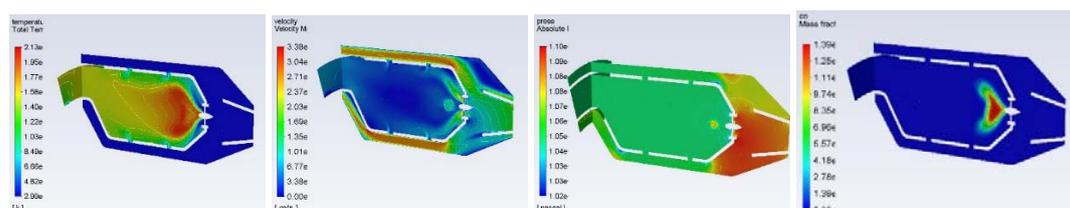


Рис. 1. Слева направо: температура, скорость потока, абсолютное давление, массовая доля CO
Fig. 1. From left to right: temperature, flow rate, absolute pressure, mass fraction of CO

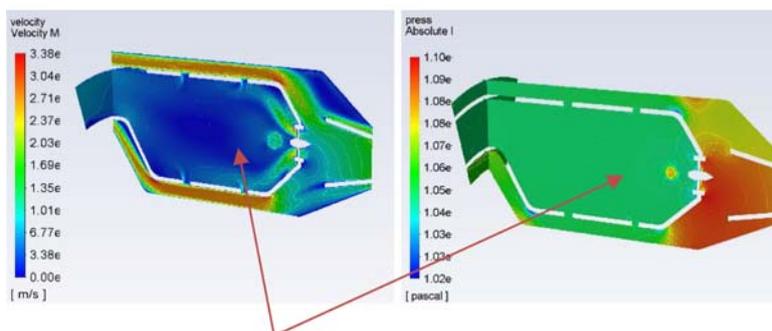


Рис. 2. Область постоянного зажигания, скорость слева, абсолютное давление справа
Fig. 2. Constant ignition region, velocity on the left, absolute pressure on the right

Общие параметры серии численных экспериментов

Расчетная сетка минимального CAD-элемента сектора КС создана адекватной ресурсам вычислений (основной ограничивающий фактор – общее время вычислений не более 48 часов) и удовлетворяющей минимальным требованиям и ограничениям применяемых ANSYS-моделей:

- турбулентности k-ε standard;
- многофазной модели DPM (Discrete Phase Modeling) ANSYS Fluent;
- линейаризованной модели формирования спрея из тонких жидкостных пленок LISA (Linearized Instability Sheet Atomization);
- горения с испарением без предварительного смешивания топлива и окислителя (Non-Premixed Combustion)¹;
- химической кинетики горения топливной пары «керосин + воздух» (Jet-A) [15].

¹ CFD EXPERTS Simulate the Future [Электронный ресурс] // Ansys Fluent Theory Guide, 2021. 1069 p. URL: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf (дата обращения: 25.08.2024).

В случае использования фиксированного шага по времени его максимальная величина не должна быть больше времени прохождения как потоком, так и его возмущением одного слоя ячеек в любом направлении. Использование адаптивного шага по времени, реализованного в ANSYS.Fluent, позволяет автоматизированно вычислять значения каждого временного шага с учетом указанных ограничений как в решениях для установившегося потока, так и в переходных процессах.

После достижения стабильного результата стационарного (steady) расчета процесса горения топливовоздушной смеси (ТВС) в КС (рис. 1) при следующих начальных условиях, одинаковых для всех исследуемых расчетных сеток: перепад давления в КС 0,5 атм, температура входящего воздуха 300 К, подача топлива 1,5 г/с (керосин), модель турбулентности k-ε 2-го порядка точности, количество инфляционных пристеночных слоев 12, объем КС 0,266432 л, и переключения задачи на нестационарный солвер с адаптивным шагом по времени в точке на 10 мм ниже по потоку от области постоянного зажигания ТВС (сфера диаметром 2,5 мм и температурой 4 500 К, рис. 2).

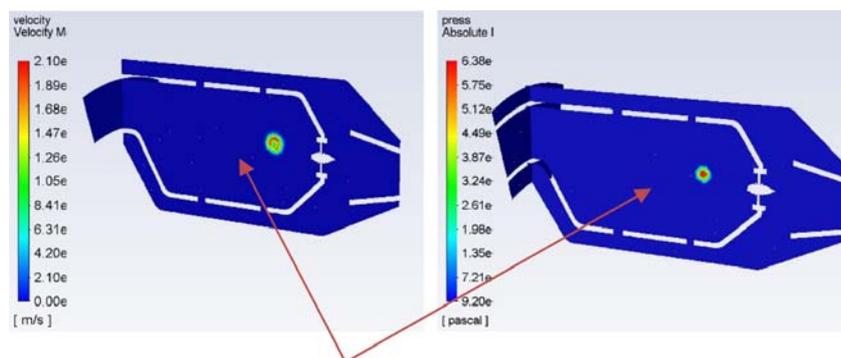


Рис. 3. Область возбуждения НП, скорость потока слева, абсолютное давление справа
Fig. 3. Excitation region of the NP, flow velocity on the left, absolute pressure on the right

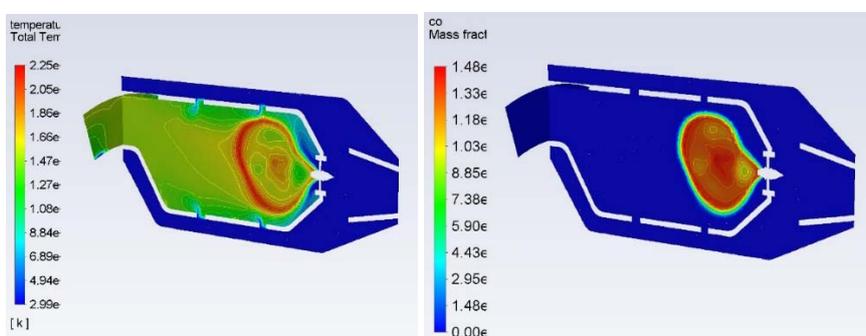


Рис. 4. Температура после возбуждения НП слева, массовая доля CO справа, сетка fine
Fig. 4. Temperature after excitation of NP on the left, mass fraction of CO on the right, fine grid

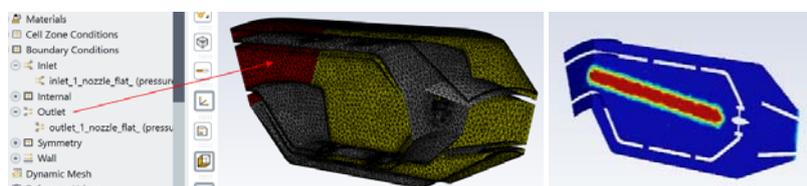


Рис. 5. Выходное сечение Outlet справа, «огневая дорожка» слева
Fig. 5. Outlet section on the right, fire path on the left

Средствами программного управления ANSYS создавалась искусственная нестационарная область диаметром 5 мм с температурой, равной температуре зажигания, и избыточным давлением 25 атм (рис. 3).

После возбуждения НП (рис. 4) расчет на сетках разного разрешения продолжался на тех же настройках адаптивного нестационарного солвера либо до достижения в выходном сечении КС Outlet значений, близких к стабильным по примитивным газодинамическим переменным (температура/скорость/давление), и массового расхода при условии существования «огневой дорожки» (имеющей физиче-

ский смысл цилиндрического контрольного объема) от зоны зажигания до геометрического центра сечения Outlet (рис. 5), либо до получения критического (прекращение горения по бедному срыву) или нефизического результата, шаг по времени принят комбинированным (на этапе steady – фиксированный, на этапе transient – адаптивный).

По мнению авторов данной статьи, критерий стабилизации решения с химически реагирующими компонентами потока должен быть максимально «инертным», то есть не должен быть подвержен мгновенным вычислительным прецессиям в различных солве-

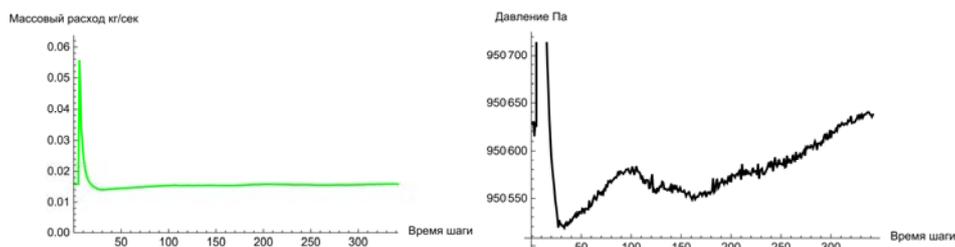


Рис. 6. Сетка fine, массовый расход слева, давление справа
Fig. 6. Fine grid, mass flow on the left, pressure on the right

рах, неизбежным при расчете переходных процессов в пространственных сетках, что приводит к предположению о неперспективности попыток поиска критериев формальной стабилизации решений данного класса задач в области высоких градиентов примитивных газодинамических переменных (температура, скорость, давление) и концентрации нестабильных химических компонент во фронте горения. Ввиду нестабильного характера процесса горения ТВС в КС, вызванного дискретностью моделирования подачи топлива, отражением чего в реальной КС являются пульсации давления в тракте подачи топлива в форсунки, критериями стабилизации нестационарного расчета предлагается считать появление колебаний контролируемых параметров (примитивные переменные и массовый расход), имеющих выраженный случайный характер от конкретной временной точки расчета и до его окончания. Фиксацию определения случайной природы нестабильности измеряемых величин предлагается определять как значения критерия Пирсона по средним значениям параметров потока (температура, скорость, давление, массовый расход) в сечении Outlet при условиях существования процесса горения (температура в «огневой дорожке» не менее 1 100 К) и восстановления тяги двигателя (не менее 98 % от начального значения).

Общие параметры сгенерированных сеток

В рамках исследования были проведены серии расчетов камеры сгорания на неструктурированных сетках с тетраэдральными элементами разного разрешения (coarse/крупная,

medium/средняя, fine/мелкая) эквивалентной топологии и качества конечных элементов. Построение сеточной модели происходило в стандартном сеточном построителе ANSYS.Fluent от пограничного слоя (с максимально возможным с точки зрения топологии качеством третьего слоя призматических элементов пограничного слоя ввиду наибольшего энергетического вклада этих слоев в формирование картины турбулентности) с дальнейшим умеренным ростом размеров конечных элементов в направлении геометрического центра расчетной области. Для определения требуемых характеристик сетки в пристеночных областях критерий Y^+ определялся согласно методике [16] в серии холодных продувок камеры сгорания для всех расчетных сеток, количество призматических слоев во всех экспериментах принято равным 12 с экспоненциальным ростом толщины.

Результаты расчета на fine-сетке (1,16 млн ячеек)

Линейно интерполированные результаты расчета, а именно среднеинтегральные значения массового расхода, давления, температуры, скорости и концентрации СО в выходном сечении, представлены на рис. 6, 7. Решение на сетке fine не потребовало адаптации стационарного (steady) результата для его последующего использования нестационарным солвером, что позволило возбудить НП на 5-й итерации.

Красная вертикальная линия на рис. 8 указывает на итерацию возбуждения НП – это итерация № 5.

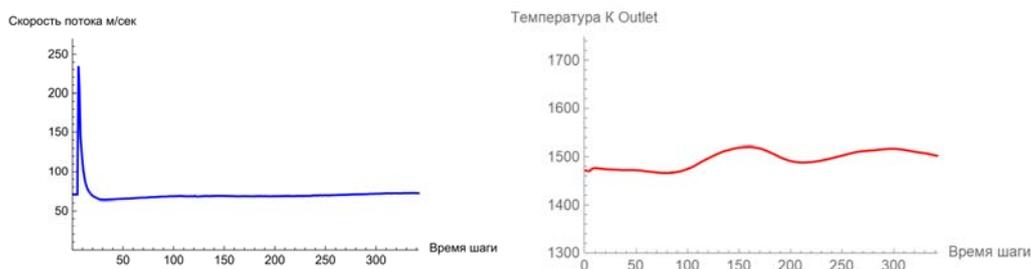


Рис. 7. Сетка fine, скорость потока слева, температура справа
Fig. 7. Fine grid, flow rate on the left, temperature on the right

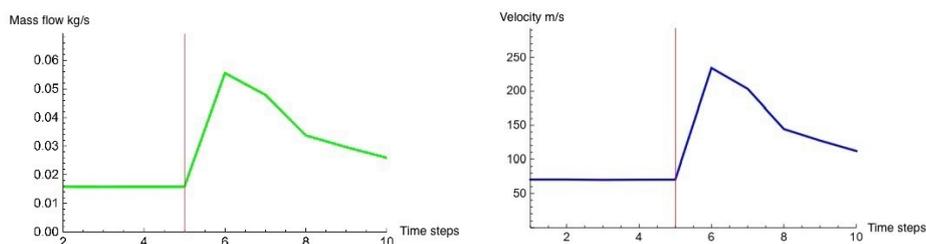


Рис. 8. Сетка fine, итерация возбуждения НП, массовый расход слева, скорость потока справа
Fig. 8. Fine grid, NP excitation iteration, mass flow on the left, flow rate on the right

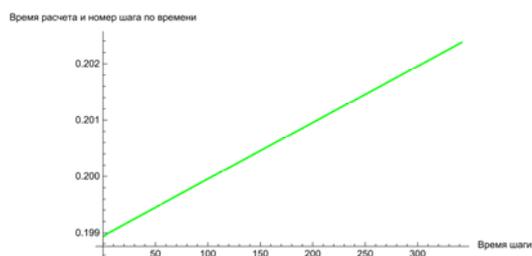


Рис. 9. Сетка fine, время и шаги расчета
Fig. 9. Fine grid, time and calculation steps

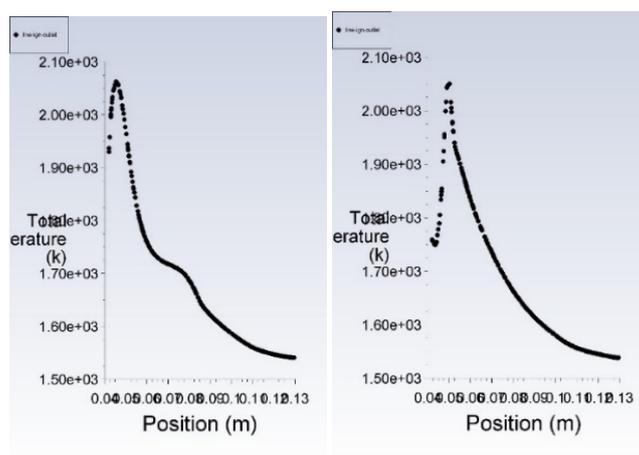


Рис. 10. Сетка fine, температура на «огневой дорожке», итерация № 325 слева, итерация окончания расчета справа
Fig. 10. Fine grid, temperature on the fire path iteration No. 325 on the left, iteration of the end of the calculation on the right

Соответствие времени расчета и шагов по времени (итераций) показано на рис. 9.

Результаты расчета показывают, что в момент времени 0,201965 с (итерация № 325)

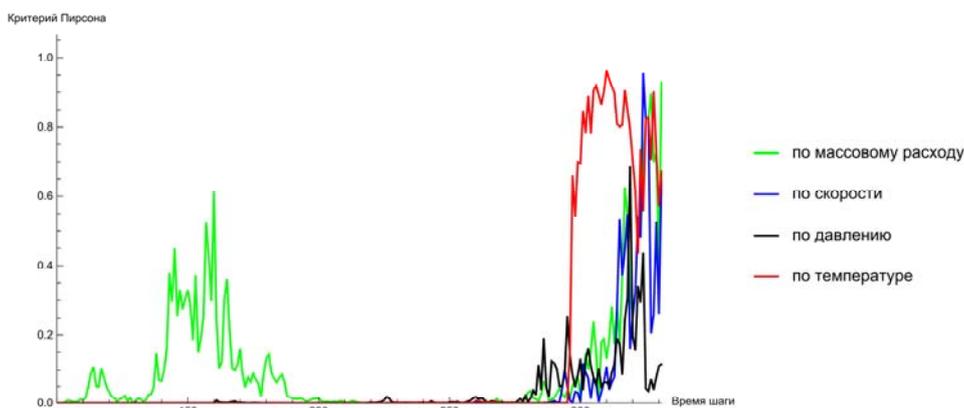


Рис. 11. Сетка fine, критерии Пирсона
Fig. 11. Fine grid, Pearson criteria

с момента начала нестационарных вычислений и до его окончания расчет может быть рассмотрен как имеющий тенденцию к нерасходимости, все колебания примитивных переменных и массового расхода носят преимущественно случайный характер и температура на всей «огневой дорожке» (рис. 10) выше температуры устойчивого горения ТВС.

Результаты расчетов на fine-сетке, представленные выше, позволяют сделать вывод о стабилизации процесса горения ТВС в КС в течение около $3e-3$ с и восстановлении тяги на уровне 99,6 % от момента, предшествующего возбуждению НП. Формальным критерием определения итерации, с которой процесс следует рассматривать нерасходящимся, предлагается считать итерацию, где значение критерия Пирсона для всех наблюдаемых переменных в диапазоне до окончания расчета минус 10 итераций (для возможности принципиального использования статистического математического аппарата) не опускается в область малых положительных значений (не менее 0,2).

Критерии Пирсона достижения стабильности выходного потока показаны на рис. 11.

Результаты расчетов на medium-сетке (668 тыс. ячеек)

Результаты расчета линейно интерполированы, среднеинтегральные значения массового расхода, давления, температуры, скоро-

сти и концентрации CO в выходном сечении представлены на рис. 12, 13. Решение на сетке medium потребовало адаптации стационарного (steady) результата для его использования нестационарным солвером (проведения нестационарного расчета до малых колебаний невязок примитивных переменных на уровне $1e-3$), условия для возбуждения НП были достигнуты на 78-й итерации.

Красная вертикальная линия на рис. 14 указывает на итерацию возбуждения НП – это итерация № 78.

Произведенное моделирование показывает, что на всем его протяжении (715 итераций) расчет не имеет формального признака преимущественно случайных колебаний температуры по критерию Пирсона (рис. 15 справа) и массового расхода (рис. 17), всплеск значения критерия Пирсона по температуре около 700-й итерации обусловлен малым объемом статистической выборки и не является показателем стабилизации. Температура на «огневой дорожке» (рис. 16) выше температуры устойчивого горения ТВС с 450-й итерации, но наблюдаемые при этом промежуточные данные заброса скорости потока ($\approx 1,5$ км/с) и массового расхода после возбуждения НП не позволяют считать этот результат приемлемым.

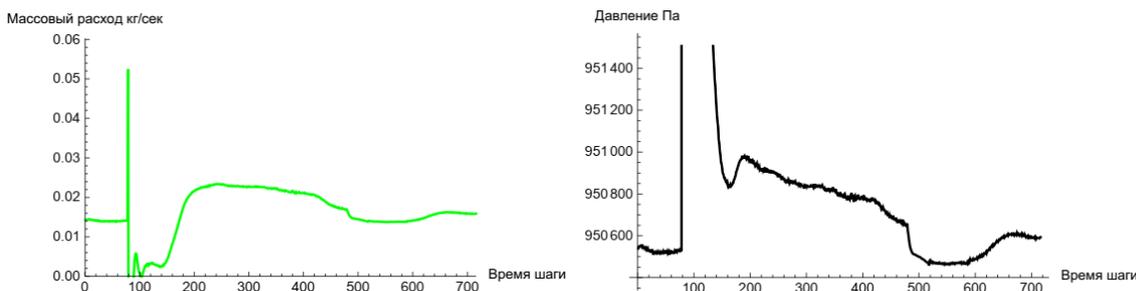


Рис. 12. Сетка medium, массовый расход слева, давление справа
Fig. 12. Medium grid, mass flow on the left, pressure on the right

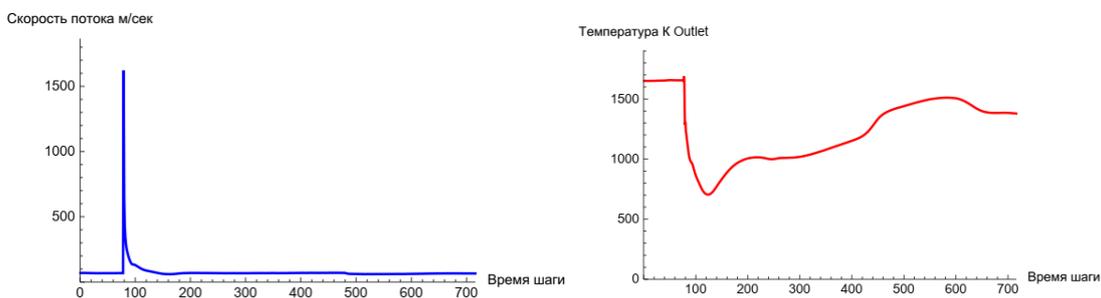


Рис. 13. Сетка medium, скорость потока слева, температура справа
Fig. 13. Medium grid, flow rate on the left, temperature on the right

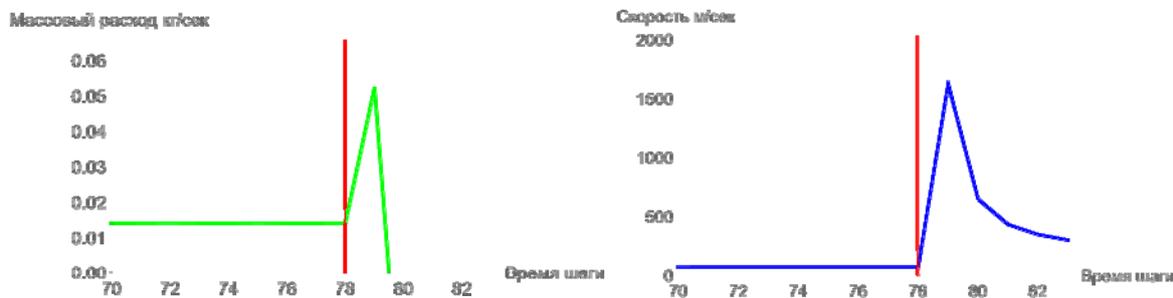


Рис. 14. Сетка medium, итерация возбуждения НП, массовый расход слева, скорость потока справа
Fig. 14. Medium grid, NP excitation iteration, mass flow on the left, flow velocity on the right

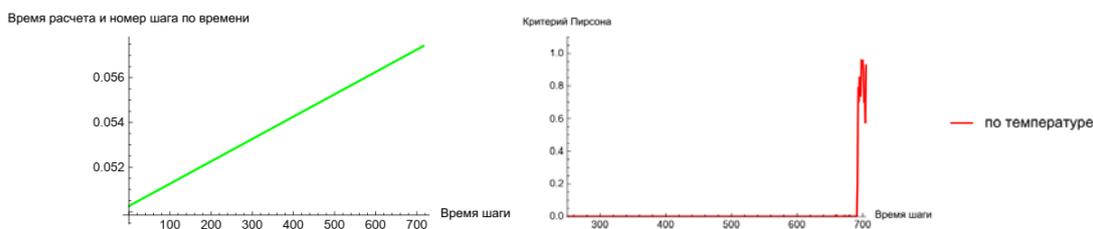


Рис. 15. Сетка medium, время и шаги расчета слева, критерий Пирсона справа
Fig. 15. Grid medium, time and calculation steps on the left, Pearson criterion on the right

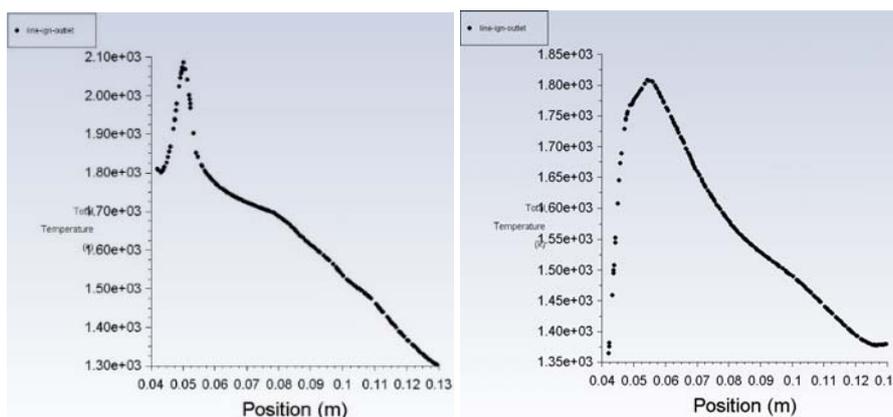


Рис. 16. Сетка medium, температура на «огневой дорожке», итерация № 450 слева, итерация окончания расчета справа
Fig. 16. Medium grid, temperature on the fire path iteration No. 450 on the left, iteration of the end of the calculation on the right

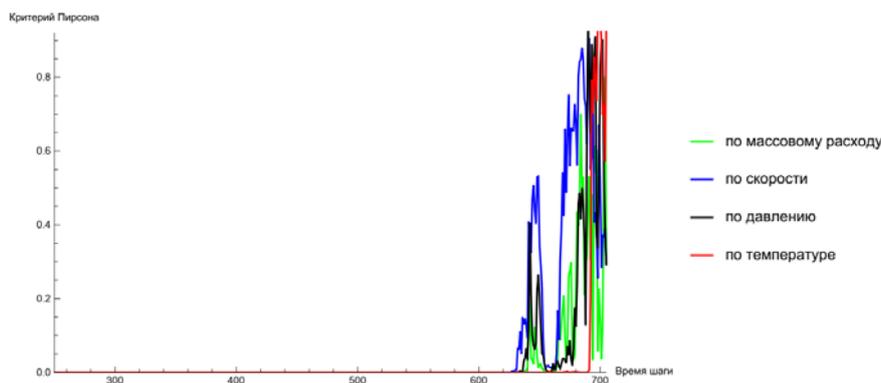


Рис. 17. Сетка medium, критерии Пирсона
Fig. 17. Medium grid, Pearson criteria

Результаты расчетов на coarse-сетке (333 тыс. ячеек)

Результаты расчета линейно интерполированы, среднеинтегральные значения массового расхода, давления, температуры, скорости и концентрации CO в выходном сечении представлены на рис. 18, 19. Решение на сетке coarse потребовало значительной адаптации стационарного (steady) результата для его использования нестационарным солвером, условия для возбуждения НП были достигнуты на 878-й итерации.

Красная вертикальная линия на рис. 20 указывает на итерацию возбуждения НП – это итерация № 878, соответствие времени расчета и итераций расчета представлено на рис. 21.

Проведенный расчет показывает, что температура на «огневой дорожке» (рис. 22) ниже температуры горения ТВС на протяжении всего нестационарного расчета, то есть двигатель тяги не дает. Промежуточные данные заброса скорости потока ≈ 6 км/с и массового расхода $\approx 0,14$ кг/с при массе воздуха в объеме КС = $3,261e-4$ кг после возбуждения НП, а также существенная разница в точке перехода в диапазон значимой величины, критерии Пирсона для самой инертной и, как следствие, самой запаздывающей фиксируемой физической величины (температуры) относительно других переменных (рис. 23) не позволяют считать результат, полученный на сетке coarse, корректным и физическим.

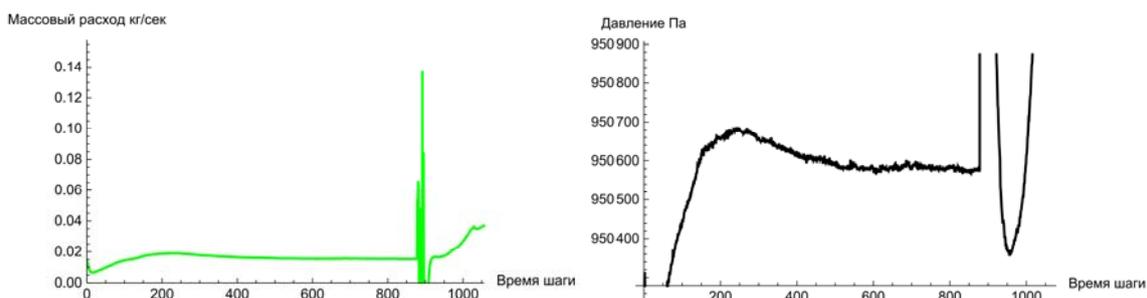


Рис. 18. Сетка coarse, массовый расход слева, давление справа
Fig. 18. Coarse grid, mass flow on the left, pressure on the right

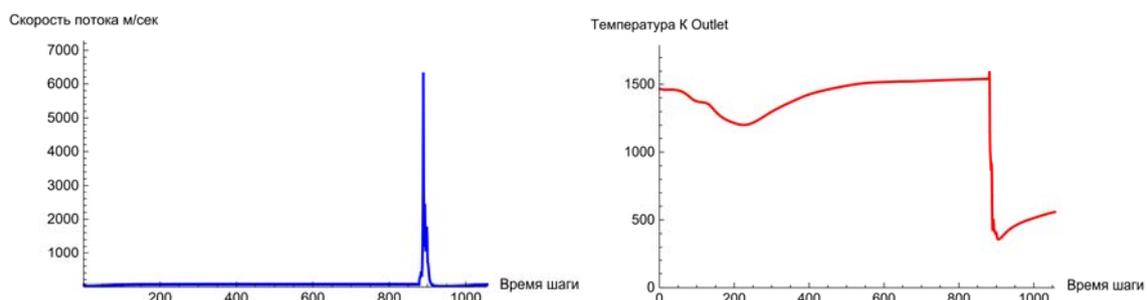


Рис. 19. Сетка coarse, скорость потока слева, температура справа
Fig. 19. Coarse grid, flow velocity on the left, temperature on the right

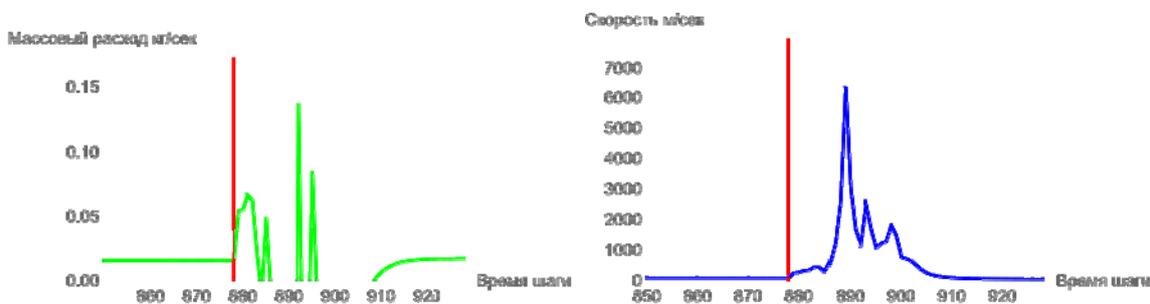


Рис. 20. Сетка coarse, итерация возбуждения НП, массовый расход слева, скорость потока справа
Fig. 20. Coarse grid, NP excitation iteration, mass flow on the left, flow velocity on the right

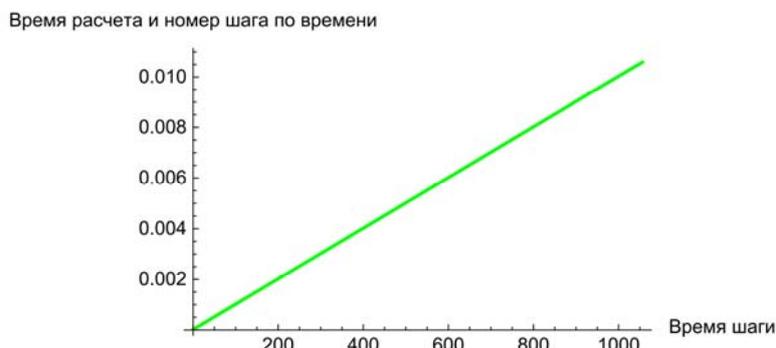


Рис. 21. Сетка coarse, время и шаги расчета
Fig. 21. Coarse grid, time and calculation steps

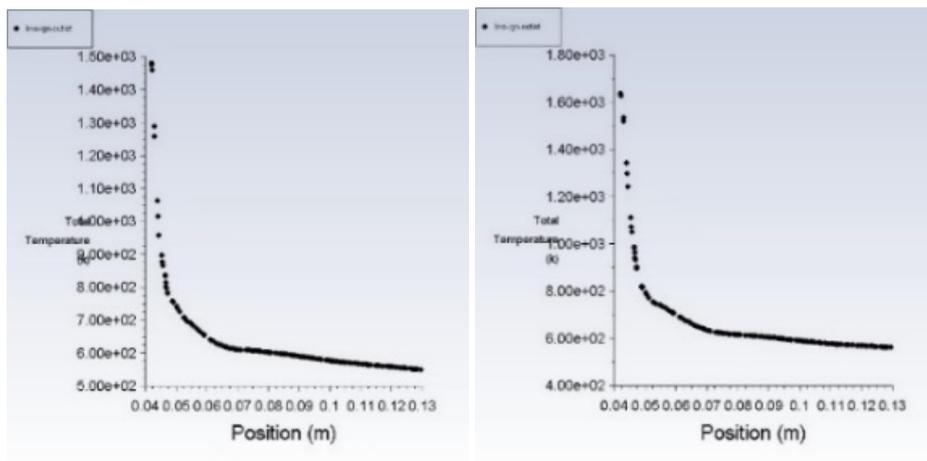


Рис. 22. Сетка coarse, температура на «огневой дорожке», итерация № 1 000 слева, итерация окончания расчета справа

Fig. 22. Coarse grid, temperature on the fire path iteration No. 1000 on the left, iteration of the end of the calculation on the right

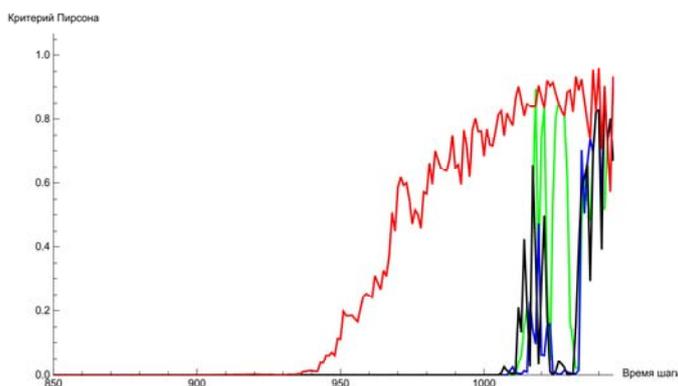


Рис. 23. Сетка coarse, критерии Пирсона
Fig. 23. Coarse grid, Pearson criteria

Обсуждение результатов

Результаты расчетов на сетках различного разрешения:

- fine – 1,16 млн ячеек (высокого);
- medium – 668 тыс. ячеек (среднего);
- coarse – 333 тыс. ячеек (грубого)

показали возможность принципиального применения сеток среднего разрешения с получением значимых результатов. Сетки грубого разрешения выдают нефизические результаты. Сетки высокого разрешения ожидаемо выдают результаты со значительными затратами вычислительных ресурсов.

Размеры расчетной сетки для конкретной задачи необходимо определять серий чис-

ленных экспериментов с эквивалентными начальными условиями и постепенным измельчением сетки до получения слабо отличающихся временных точек начала стабилизации решения по значениям забросов контролируемых параметров на протяжении моделирования всего процесса при условиях, указанных в пункте «Общие параметры серии численных экспериментов».

Заключение

Используемые в настоящее время численные методы, широко применяемые для решения задач газодинамики, позволяют моделировать сложные мультифизические процессы,

происходящие в горящих газовых потоках. При этом все численные методы имеют ограничения, связанные с сеточной чувствительностью, то есть зависимостью результатов расчетов от размера и топологии сетки, на которой они проводятся. Это может привести к ошибкам и неточностям в результатах, особенно если сетка является грубой или ее топология не соответствует особенностям решаемой задачи.

Критерий Пирсона является одним из наиболее распространенных методов проверки гипотез о соответствии эмпирического распределения теоретическому. Он позволяет оценить степень расхождения между наблюдаемыми и ожидаемыми в соответствии с теоретическим распределением.

Предложенная методика расчета критически чувствительна к объему и качеству применяемых сеток и показывает результаты достаточной точности при использовании мелких (fine) и средних (medium) сеток при приемлемых временных затратах и использовании вычислительных ресурсов средней мощности (19,2 GFlops).

Список литературы

1. **Savchuk A.T., Yakovlev A.A.** Method of the numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine [Электронный ресурс] // Journal of Physics Conference Series. 2021. Vol. 1925. ID: 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012009 (дата обращения: 25.08.2024).
2. **Le Sausse P.** CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range / P. Le Sausse, P. Fabrie, D. Arnou, F. Clunet [Электронный ресурс] // EPJ Web of Conferences, 2013. Vol. 45. ID: 01059. DOI: 10.1051/epjconf/20134501059 (дата обращения: 25.08.2024).
3. **Савчук А.Т., Яковлев А.А.** Численное моделирование нестационарных процессов камеры сгорания газотурбинного двигателя // XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2020): материалы конференции. Алушта, 06–13 сентября 2020 г. М.: МАИ, 2020. С. 101–103.
4. **Савчук А.Т., Яковлев А.А.** К вопросам численного моделирования нестационарных процессов камеры сгорания газотурбинного двигателя // XXII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021): материалы конференции. Алушта, 04–13 сентября 2021 г. М.: МАИ, 2021. С. 624–626.
5. **Mangani L., Casartelli E., Mauri S.** Assessment of various turbulence models in a high pressure ratio centrifugal compressor with an object oriented CFD code [Электронный ресурс] // Journal of Turbomachinery. 2012. Vol. 134, no. 6. ID: 061033. DOI: 10.1115/1.4006310 (дата обращения: 25.08.2024).
6. **Pecnik P., Pieringer P., Sanz W.** Numerical investigation of the secondary flow of a transonic turbine stage using various turbulence closures // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005, 2005. Vol. 6. Pp. 1185–1193. DOI: 10.1115/GT2005-68754.
7. **Trébinjac I.** Effect of unsteadiness on the performance of a transonic centrifugal compressor stage / I. Trébinjac, P. Kulisa, N. Bulot, N. Rochuon [Электронный ресурс] // Journal of Turbomachinery. 2009. Vol. 131, no. 4. ID: 041011. DOI: 10.1115/1.3070575 (дата обращения: 25.08.2024).
8. **Ibaraki S.** Aerodynamics of a transonic centrifugal compressor impeller / S. Ibaraki, T. Matsuo, H. Kuma, K. Sumida, T. Suita // ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air. 2002. Vol. 5. Pp. 473–480. DOI: 10.1115/gt2002-30374
9. **Danilishin A.M.** The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station / A.M. Danilishin, Y.V. Kozhukhov, V.V. Neverov, K.G. Malev, Y.R. Mironov [Электронный ресурс] // AIP Conference Proceedings, 2017. Vol. 1876. ID: 020046. DOI: 10.1063/1.4998866 (дата обращения: 25.08.2024).
10. **Elfert M.** Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high-performance radial compressor impeller / M. Elfert, A. Weber, D. Wittrock, A. Peters, C. Voss, E. Nicke [Электронный ресурс] //

Journal of Turbomachinery. 2017. Vol. 139, no. 10. ID: 101007 DOI: 10.1115/1.4036357 (дата обращения: 25.08.2024).

11. Zandsalimy M., Ollivier Gooch C.F. Mesh optimization for improved computational fluid dynamics numerical stability and convergence rate [Электронный ресурс] // AIAA Aviation Forum and Ascend 2024. DOI: 10.2514/6.2024-3615 (дата обращения: 25.08.2024).

12. Zandsalimy M., Ollivier-Gooch C. A novel approach to mesh optimization to stabilize unstructured finite volume simulations [Электронный ресурс] // Journal of Computational Physics. 2022. Vol. 453. ID: 110959. DOI: 10.1016/j.jcp.2022.110959 (дата обращения: 25.08.2024).

13. Sharbatdar M., Ollivier Gooch C.F. Eigenanalysis of truncation and discretization error on unstructured meshes [Электронный ресурс] // 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, 2013. ID: 3089. 25 p. DOI: 10.2514/6.2013-3089 (дата обращения: 25.08.2024).

14. Chen L. Stability analysis and stabilization of unstructured finite volume method [Электронный ресурс] // A thesis Master of Applied Science. University of British Columbia, 2016. 122 p. DOI: 10.14288/1.0300002 (дата обращения: 25.08.2024).

15. Lee C.-M., Kundu K. Simplified Jet-A kinetic mechanism for combustor application [Электронный ресурс] // NASA Technical Memorandum 105940 AIAA-93-0021, 1993. 13 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930006315/downloads/19930006315.pdf> (дата обращения: 25.08.2024).

16. Пугачев П.В., Свобода Д.Г., Жарковский А.А. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2016. 120 с.

References

1. Savchuk, A.T., Yakovlev, A.A. (2021). Method of the numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. *Journal of Physics Confer-*

rence Series, vol. 1925. ID: 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012009 (accessed: 25.08.2024).

2. Le Sausse, P., Fabrie, P., Arnou, D., Clunet, F. (2013). CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range. In: *EPJ Web of Conferences*, vol. 45. ID: 01059. DOI: 10.1051/epjconf/20134501059 (accessed: 25.08.2024).

3. Savchuk, A.T., Yakovlev, A.A. (2020). Numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. In: *XIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po prikladnoy matematike i mekhanike v aerokosmicheskoy otrasli (AMMAI'2020): materialy konferentsii*. Moscow: MAI, pp. 101–103. (in Russian)

4. Savchuk, A.T., Yakovlev, A.A. (2021). On the issues of numerical modeling of unsteady processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. In: *XXII Mezhdunarodnaya konferentsiya po vychislitel'noy mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyim sistemam (VMSPPS'2021): materialy konferentsii*. Moscow: MAI, pp. 624–626. (in Russian)

5. Mangani, L., Casartelli, E., Mauri, S. (2012). Assessment of various turbulence models in a high pressure ratio centrifugal compressor with an object oriented CFD code. *Journal of Turbomachinery*, vol. 134, no. 6. ID: 061033. DOI: 10.1115/1.4006310 (accessed: 25.08.2024).

6. Pecnik, P., Pieringer, P., Sanz, W. (2005). Numerical investigation of the secondary flow of a transonic turbine stage using various turbulence closures. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005*, vol. 6, pp. 1185–1193. DOI: 10.1115/GT2005-68754.

7. Trébinjac, I., Kulisa, P., Bulot, N., Rochuon, N. (2009). Effect of unsteadiness on the performance of a transonic centrifugal compressor stage. *Journal of Turbomachinery*, vol. 131, no. 4. ID: 041011. DOI: 10.1115/1.3070575 (accessed: 25.08.2024).

8. Ibaraki, S., Matsuo, T., Kuma, H., Sumida, K., Suita, T. (2002). Aerodynamics of a transonic centrifugal compressor impeller. *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 5, pp. 473–480. DOI: 10.1115/gt2002-30374

9. Danilishin, A.M., Kozhukhov, Y.V., Neverov, V.V., Malev, K.G., Mironov, Y.R. (2017). The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station. *In: AIP Conference Proceedings*, vol. 1876. ID: 020046. DOI: 10.1063/1.4998866 (accessed: 25.08.2024).

10. Elfert, M., Weber, A., Wittrock, D., Peters, A., Voss, C., Nicke, E. (2017). Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high-performance radial compressor impeller. *Journal of Turbomachinery*, vol. 139, no. 10. ID: 101007 DOI: 10.1115/1.4036357 (accessed: 25.08.2024).

11. Zandsalimy, M., Ollivier Gooch, C.F. (2024). Mesh optimization for improved computational fluid dynamics numerical stability and convergence rate. *In: AIAA Aviation Forum and Ascend 2024*. DOI: 10.2514/6.2024-3615 (accessed: 25.08.2024).

12. Zandsalimy, M., Ollivier-Gooch, C. (2022). A novel approach to mesh optimization to stabilize unstructured finite volume simulations. *Journal of Computational Physics*, vol. 453. ID: 110959. DOI: 10.1016/j.jcp.2022.110959 (accessed: 25.08.2024).

13. Sharbatdar, M., Ollivier Gooch, C.F. (2013). Eigenanalysis of truncation and discretization error on unstructured meshes. *In: 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, ID: 3089, 25 p. DOI: 10.2514/6.2013-3089 (accessed: 25.08.2024).

14. Chen, L. (2016). Stability analysis and stabilization of unstructured finite volume method. *A thesis Master of Applied Science*. University of British Columbia, 122 p. DOI: 10.14288/1.0300002 (accessed: 25.08.2024).

15. Lee, C.-M., Kundu, K. (2013). Simplified Jet-A kinetic mechanism for combustor application. *NASA Technical Memorandum 105940 AIAA-93-0021*, 13 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930006315/downloads/19930006315.pdf> (accessed: 25.08.2024).

16. Pugachev, P.V., Svoboda, D.G., Zhar-kovsky, A.A. (2016). Calculation and design of blade hydraulic machines. Calculation of viscous flow in blade hydraulic machines using the ANSYS CFX: tutorial. St. Petersburg: SPbPU, 120 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Савчук Андрей Годорович, соискатель МГТУ ГА, andrey.sav4uk@yandex.ru.

Москаленко Лада Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, l.moskalenko@mstuca.ru.

Information about the authors

Andrey T. Savchuk, Candidate for a Scientific Degree of the Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, andrey.sav4uk@yandex.ru.

Lada V. Moskalenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, l.moskalenko@mstuca.ru.

Поступила в редакцию 25.11.2024
Одобрена после рецензирования 16.12.2024
Принята в печать 23.01.2025

Received 25.11.2024
Approved after reviewing 16.12.2024
Accepted for publication 23.01.2025