

УДК 533.6.011

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЛЕКТОРА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАВЕРНЕ

© 2017 г. А. П. Дубень^а, Н. С. Жданова, Т. К. Козубская

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

^а*e-mail*: Alexey.Duben@gmail.com

Поступила в редакцию 25.11.2016 г.

Численно моделируется влияние дефлектора на аэродинамические и акустические характеристики турбулентного течения в каверне. Приведено описание вычислительной методики, работающей на неструктурированных сетках. Для моделирования дефлектора использовался метод погруженных граничных условий. Проведена проверка корректности вычислительной методики на примере схожих задач, для которых имеются достоверные экспериментальные данные. Представлены результаты расчетов турбулентного течения вокруг дефлекторов различной геометрической формы, проанализировано их влияние на структуру потока. Рассмотрены также результаты крупномасштабных расчетов течений возле каверны при наличии и отсутствии дефлектора возле передней кромки. На основе полученных численных данных проведен анализ влияния дефлектора на аэродинамические и акустические характеристики течения в полости каверны, в том числе на акустические нагрузки на ее поверхности.

Ключевые слова: турбулентное течение, каверна, дефлектор, метод погруженных граничных условий, численное моделирование, гибридный RANS-LES-метод, DES.

DOI: ...

Задачи исследования физики течения вязкого газа вокруг выемок и зазоров — неотъемлемая часть разработки современных летательных аппаратов. На поверхности летательного аппарата может находиться большое количество различных углублений как технологического, так и случайного происхождения. Такого рода каверны обуславливают появление нестационарных осцилляционных течений. Возникающие при этом высокие уровни пульсаций давления являются причиной повреждения конструкций летательного аппарата и выхода из строя оборудования. Без специальных защитных мероприятий эти осцилляции могут оказаться достаточно сильными, что может стать критичным для конструкции [1]. Особенно опасны — дискретные составляющие в спектре нагрузок. Наиболее остро вопрос снижения повышенного аэроакустического нагружения стоит для открывающихся в полёте отсеков, где размещаются шасси, дополнительное оборудование или сбрасываемые грузы.

Одним из методов снижения акустических нагрузок на стенки каверны является применение дефлектора, устанавливаемого вверх по течению от выемки. Проведенные испытания [2–4] показывают, что проницаемый дефлектор совместно с наклоном задней стенки полости представляется достаточно эффективным средством снижения пульсаций давления на поверхности отсека. Однако определение формы, габаритов дефлектора, размера отверстий в нем и общей площади перфорации осуществляется в основном экспериментальными методами. Это не дает возможности выполнить в полном объеме оптимизацию параметров дефлектора из-за больших временных и материальных затрат на проведение соответствующих лётных экспериментов. В связи с этим возникает потребность в разработке и внедрении в инженерную практику новых технологий и, в частности, метода вычислительного эксперимента, направленного на подбор оптимальной конфигурации дефлектора для разных режимов полета высокоскоростного транспортного средства.

Результаты немногочисленных численных расчетов по данной теме приведены в [5]. Они также подтверждают снижение уровня пульсации давления в каверне при установке дефлектора на ее задней стенке. В настоящей работе проводится более детальное исследование влияния дефлектора на свойства течения вязкого газа с точки зрения возможности снижения акустических нагрузок, возникающих на поверхности каверны. С этой целью разрабатывается и применяется комплексная методика вихреразрешающего численного моделирования турбулентного течения в каверне в присутствии дефлектора на основе полной системы уравнений Навье–Стокса для вязкого сжимаемого газа и их осредненных аналогов. Реализованные в ней методы и подходы позволяют оперативно менять постановку решаемой задачи в части задания геометрической формы и пространственного положения дефлектора, а также обеспечивают повышенную точность численных результатов.

В рамках описываемого здесь исследования решается ряд промышленно-ориентированных задач по численному моделированию турбулентных течений вокруг плохообтекаемых препятствий и (или) вблизи плохообтекаемых твердых тел.

Предварительно в качестве тестов для подтверждения корректности разработанной численной методики, рассматриваются задачи об обтекании модельного дефлектора и проводится моделирование турбулентного течения вокруг каверны M219 [6, 7].

Далее решается серия задач об обтекании изолированного дефлектора (в отсутствие носителя) различных геометрических форм. Моделирование проводится с целью исследования зависимости свойств образующегося вокруг дефлектора течения от его конфигурации.

Итоговый результат работы состоит в численном решении задачи о течении вязкого газа в каверне в присутствии дефлектора и без него. На основании полученных результатов делаются выводы о влиянии дефлектора на течение в каверне в целом.

1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МЕТОДИКА

1.1. Математические модели

Вычислительная методика, используемая для проведения расчетов, основана на полных сжимаемых уравнениях Навье–Стокса. Рассматриваемые течения (за дефлектором и возле каверны) характеризуются образованием обширных отрывных зон и нестационарных турбулентных слоев смешения. Для их воспроизведения здесь используется гибридный незонный RANS-LES-подход DES последней модификации [8]. Выбор данного подхода обусловлен его улучшенным моделированием нестационарных отрывных турбулентных течений. Это обеспечивается введенным в [8] новым, адаптированным к слоям смешения, подсеточным масштабом Δ_{SLA} , использование которого приводит к ускорению “численного” перехода от стационарного RANS к нестационарному LES-решению в слоях смешения. Такой подход существенно улучшает точность воспроизведения течений, важные характеристики которых критически зависят от корректного моделирования развитых слоев смешения. В качестве модели замыкания для проведения расчетов методом DES служит модель Спаларта–Алмараса для турбулентной вязкости [9].

Рассматриваемым течениям свойственны большие числа Рейнольдса и высокий уровень турбулентности набегающего потока. В связи с этим при численном моделировании задач, применяется “полностью турбулентный подход”, при котором предполагается, что ламинарно-турбулентный переход в присоединенных пограничных слоях происходит достаточно быстро, и потому на входных границах отношение турбулентной вязкости к молекулярной ν_t / ν можно задавать равным единице.

Применяется несколько способов задания граничных условий на поверхности обтекаемого тела: алгебраическими соотношениями в узлах сетки, лежащих на границе (наиболее распространенный и известный подход, используемый при численном моделировании задач аэродинамики) и методом погруженных границ [10], точнее его разновидностью – методом Бринкмана штрафных функций [11, 12].

Первый способ определения граничных условий используется на твердых стенках основной конструкции: на пластине, в которую встраивается каверна, и на поверхностях каверны. На этих поверхностях при решении тестовой задачи о течении в каверне M219 ставятся условия прилипания для скорости ($\mathbf{u} = 0$) и адиабатической стенки ($\partial T / \partial n = 0$), турбулентная вязкость полагается равной нулю ($\nu_t = 0$). Для задачи о течении в каверне с установленным дефлектором используется метод пристеночных функций [13, 14].

Для обеспечения выполнения адиабатического граничного условия на поверхности дефлектора применяется метод погруженных границ. Этот метод представляется предпочтительным из-за того, что в рамках исследуемой задачи предполагается многократное изменение геометрической формы дефлектора. Если при этом описывать геометрию дефлектора граничными узлами расчетной сетки, то каждое ее изменение будет требовать перестроения сетки, что, в общем, составляет очень трудоемкую процедуру. При применении метода погруженных границ изменения расчетной сетки не требуется, поскольку в этом случае используется сплошная расчетная сетка, которая покрывает всю область, включая препятствие, а выполнение граничных условий на разделе двух сред обеспечивается добавлением специальных штрафных функций в уравнения газовой динамики, моделирующих турбулентное течение. Штрафные функции при этом “работают” только в точках расчетной сетки, расположенных внутри препятствия.

Следуя методу Бринкмана штрафных функций, система уравнений Навье–Стокса, описывающая течение в области Ω_f вокруг твердого тела Ω_{obst} с границей $\partial\Omega_{obst}$, модифицируется следующим образом [11, 12]:

$$\begin{cases} \partial_t \mathbf{Q} + \nabla \mathbf{F}(\mathbf{Q}) + S_\eta = \nabla \mathbf{F}_v(\mathbf{Q}), & (\mathbf{x}, t) \in \Omega_f \cup \Omega_{obst} \cup \partial\Omega_{obst} \\ S_\eta = \eta^{-1} \chi \begin{pmatrix} 0, & \rho u, & \rho v, & \rho w, & E \end{pmatrix}^T, & \mathbf{Q}(t = 0) = \mathbf{Q}_0(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1.1)$$

где $\mathbf{Q} = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E)$ – вектор безразмерных консервативных переменных, \mathbf{F} и \mathbf{F}_v – конвективные и вязкие потоки, ρ – плотность газа, u, v, w – компоненты скорости, E – полная энергия. Система замыкается уравнением состояния идеального газа: $p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon$, где ε – внутренняя энергия, $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты, а полная энергия определяется соотношением: $E = \rho\varepsilon + 0.5\rho(u^2 + v^2 + w^2)$.

Характеристическая функция χ определяет геометрическое место обтекаемого тела: $\chi = 1$ при $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}_{obst}$, $\chi = 0$ при $\mathbf{x} \in \Omega_f$.

Как видно из (1.1), источниковые члены S_η , называемые штрафными функциями, добавляются только в уравнения импульса и энергии. В точках сетки, где характеристическая функция $\chi \neq 0$ (т.е. внутри препятствия), система трансформируется в модель Бринкмана пористой среды с параметром η , определяющим ее проницаемость $0 < \eta \ll 1$: чем меньше коэффициент η , тем точнее воспроизводятся граничные условия при $\mathbf{x} \in \partial\Omega_{obst}$.

1.2. Численные методы

Для проведения расчетов, представленных здесь, используется вычислительный алгоритм с точным определением переменных в узлах неструктурированной сетки, реализованный в программном комплексе NOISEtte [15]. Корректность работы численной методики, реализующей какой-либо вихреразрешающий подход, применительно к численному моделированию высокорейнольдсовых турбулентных течений в основном определяются точностью аппроксимации конвективных слагаемых уравнений Навье – Стокса. Для их дискретизации в NOISEtte используется EBR-схема [16] повышенной точности. Интегрирование по времени при этом проводится с помощью неявной схемы второго порядка точности с линеаризацией по Ньютону разностной системы уравнений. При проведении численного моделирования рассматриваемых в работе задач число Куранта выбирается таким образом, чтобы в области возмущенного турбулентного взаимодействия (в донной области внутри каверны и в отрывной зоне за дефлекторами) его локальное значение на некотором удалении от твердых стенок не превышает 1. На каждой временной итерации проводится несколько итераций по Ньютону до сходимости по относительной невязке.

Корректность воспроизведения турбулентного течения с помощью вихреразрешающего подхода в области, характеризующейся наличием разрешенных разномасштабных вихревых структур, определяется также количеством привносимой разностной схемой численной диссипации противопоточного характера. Её введение необратимо приводит к сглаживанию решения, подобному работе неявного высокочастотного фильтра. Тем не менее для обеспечения устойчивости алгоритма на основе EBR схемы на неструктурированных сетках, как показывает практика, введение небольшой противопоточной диссипации оказывается необходимым. А при проведении расчетов с помощью гибридного RANS–LES-метода DES в областях слабозамушенного потока и в зонах, где турбулентный пограничный слой моделируется с помощью метода RANS. Использование численной схемы с существенным весом противопоточной аппроксимации даже рекомендуется [17]. Чтобы оптимальным образом

контролировать противопоточную диссипацию, численное моделирование рассматриваемых задач проводится с использованием гибридной EBR-схемы с плавно изменяющимся в зависимости от локальных характеристик течения весовым параметром, определяющим ее величину. Изменение данного параметра управляется специальной функцией, предложенной в [17]. Минимальное значение веса противопоточного вклада в аппроксимацию конвективных потоков при этом берется равным 0.05, что соответствует 5%. При этом 95% приходится на центрально-разностную часть схемы.

2. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОРРЕКТНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕТОДИКИ И ЕЕ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

2.1. Общий подход к тестированию

Достоверность представленных в работе результатов расчетов течения в каверне в присутствии дефлектора подтверждается результатами предварительного тестирования используемой вычислительной методики моделирования. Оно проводится на основе двух характерных задач: задача обтекания отдельно взятой каверны и задача обтекания изолированного дефлектора.

Первая тестовая задача представляет собой известную постановку по трансзвуковому обтеканию каверны M219 [6, 7]. Тестирование проводится путем сравнения результатов расчета с соответствующими экспериментальными данными [6, 7] по нестационарным пульсациям давления на дне каверны.

Методика численного моделирования обтекания изолированного дефлектора основана на применении метода погруженных границ. Ее тестирование можно свести к подтверждению корректности воспроизведения граничных условий этим методом. Ввиду отсутствия доступных экспериментальных данных по ближнему полю течения, формируемому вокруг дефлектора, эта процедура проводится посредством сопоставления результатов моделирования течения вокруг дефлектора с помощью метода погруженных границ с результатами “традиционного” расчета, проведенного на согласованной с границей вычислительной сетке. Достоверность последних результатов можно подтвердить многократным тестированием используемого для их получения комплекса программ NOISEtte на задачах для плохообтекаемых тел. Так, например, сопоставление численных и экспериментальных результатов для задачи об обтекании тандема квадратных цилиндров приводится в деталях в [16]. Сравнение расчета по обтеканию препятствия при помощи метода погруженных границ с “традиционным” расчетом на согласованной с границей препятствия сетке проводится в работе применительно к дефлектору простейшей конфигурации.

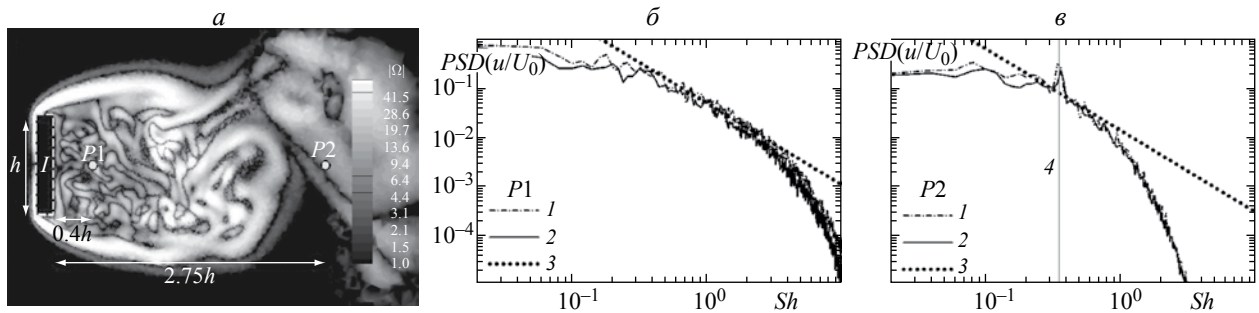
В последующих двух разделах рассматриваются обе относящиеся к тестированию задачи более подробно.

2.2. Проверка корректности использования погруженных граничных условий

Для проверки корректности реализованной в комплексе NOISEtte методики погруженных граничных условий решается задача об обтекании “примитивного” дефлектора, т.е. пластины без перфорации и зубчатости высотой h и толщиной $0.17h$ (см. центральное $z/h = 0$ сечение пластины на фиг. 1, а). Характерное число Рейнольдса специально выбирается равным числу Рейнольдса, взятому из задачи о течении в каверне с дефлектором (разд. 4). Его значение, посчитанное по скорости набегающего потока и высоте каверны H ($h = 0.215H$) составляет $Re_H = 7 \cdot 10^6$. Расчетная область представляет собой параллелепипед, на стенках которого задаются входные и выходные граничные условия. На поверхностях в поперечном направлении (в направлении вдоль оси z) ставятся условия периодичности. Ширина расчетной области составляет $0.5H \cong 2.33h$.

В рамках тестирования проводится два расчета. В одном из них для моделирования граничных условий на твердой поверхности используется согласованная с границей сетка (расчет для получения эталонных данных), в другом – метод погруженных границ. В обоих расчетах используются изотропные тетраэдральные сетки с одинаковым сеточным разрешением в ключевых областях течения. Максимальное сгущение сеток достигается возле поверхности обтекаемой пластины и составляет $8.5 \cdot 10^{-3}h$. Далее сетка плавно продвигается к границам расчетной области. Для корректного моделирования образующегося турбулентного вихревого следа за плохообтекаемым телом (в данном случае за пластиной), в зоне за дефлектором максимальный шаг сетки составляет не более чем $h/30$.

Картины течений, полученные с использованием разных рассматриваемых методик, оказываются схожими. Визуализация мгновенного распределения модуля завихренности представлена на фиг. 1, а из расчета, в котором обтекаемый объект (пластина) моделируется с помощью метода



Фиг 1. Результаты численного моделирования течения возле дефлектора в свободном потоке: 1 – традиционный подход к описанию твёрдого тела, 2 – метод погруженных границ; 3 – закон “-5/3”; 4 – $Sh = 0.35$; I – дефлектор

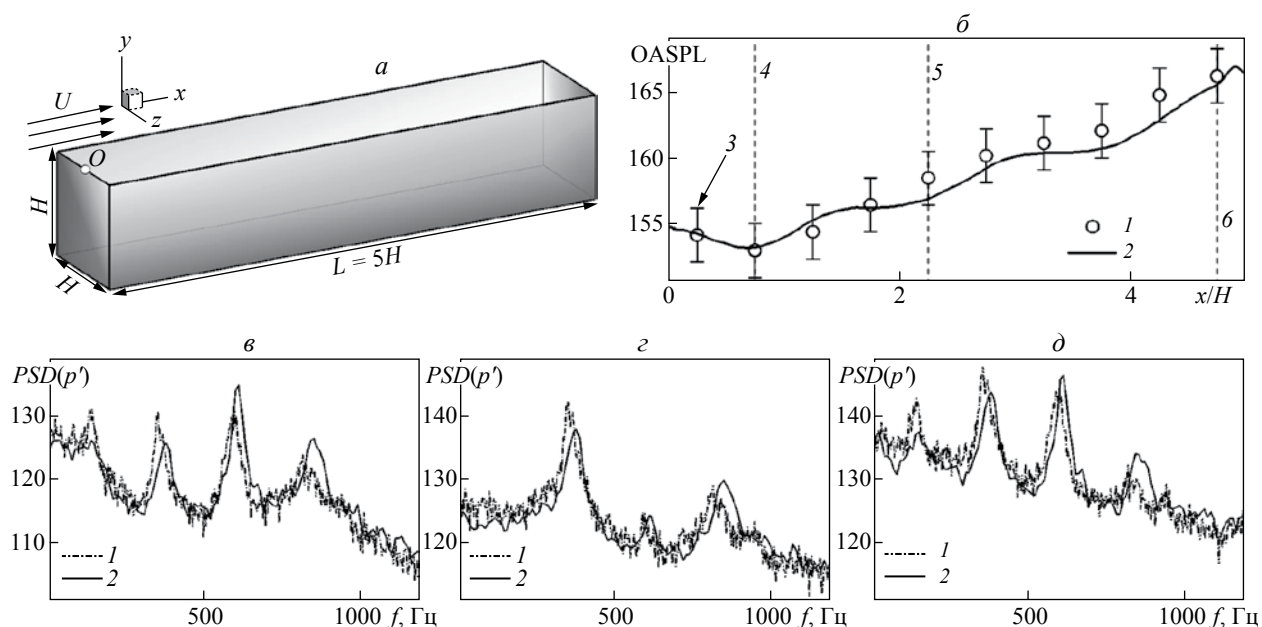
погруженных границ. На фиг. 1, б и в представлено сравнение полученных нестационарных характеристик пульсаций продольной скорости в двух точках, обозначенных как P1 и P2 на фиг. 1, а и находящихся на некотором расстоянии друг от друга в ближнем поле течения. Приведенные графики также демонстрируют близость результатов расчетов, проведенных с помощью двух методик. При этом совпадение наблюдается как по уровням широкополосной составляющей спектров, характеризующей турбулентные структуры из инерционного интервала, так и по частоте, и мощности дискретной составляющей, соответствующей анизотропным вихрям, образующимся при обтекании пластины. Полученные результаты свидетельствуют в пользу корректной работы метода погруженных граничных условий, используемого в статье для воспроизведения плохообтекаемых тел сложной конфигурации (в данном случае, дефлекторов) на сплошной расчетной сетке (т.е. без отслеживания поверхности тела граничными узлами сетки).

2.3. Подтверждение корректности вычислительной методики, используемой для расчета турбулентного течения вокруг каверны

Для подтверждения корректности вычислительной методики, реализующей гибридный RANS–LES–подход–DES [8], выбрана задача о течении возле прямоугольной каверны с открытым типом течения [11, 12], общий вид которой представлен на фиг. 2, а. Общая конфигурация представляет собой каверну, встроенную в пластину. Характерным размером задачи служит глубина каверны H , величина которой составляет 0.1016 м. Параметры свободного потока в эксперименте задаются следующим образом: число Маха $M_\infty = 0.85$, статическое давление $P_\infty = 6.21 \cdot 10^4$ Па, $T_\infty = 266.53$ К. Характерное число Рейнольдса задачи, посчитанное по глубине каверны, берется как $Re_H = 1.37 \cdot 10^6$.

Расчетная область над пластиной представляет собой параллелепипед с размерами $L_x \times L_y \times L_z = 18H \times 16H \times 9H$. На фиг. 2, а обозначена точка $O(0,0,0)$ – начало координат, располагающаяся по центру на передней кромке каверны. Входная граница (вдоль оси X вниз по потоку), на которой задается однородный поток, находится на расстоянии $7.75H$ от нее. При таком значении толщина пограничного слоя в области передней кромки каверны при проведении расчета совпадает с экспериментальным значением. Выходные границы вниз по потоку (вдоль оси X) и поперек потока (вверх вдоль оси Y) ставятся на расстоянии $5.25H$ от задней кромки каверны и $16H$ от поверхности пластины соответственно. В поперечном направлении (вдоль оси Z) на границах $z = -4.5H$ и $z = 4.5H$ используются условия отражения.

Численное моделирование задачи проводится на неструктурированной гексаэдральной сетке, построенной согласно требованиям, предъявляемым к сеткам для расчетов с помощью гибридных RANS–LES–методов [18]. В частности, в зоне основного турбулентного взаимодействия в донной области каверны характерный размер ячейки не превышает $H/33$. Разрешение пограничного слоя на поверхностях, на которых ставятся условия прилипания, достаточно грубое и составляет $10^{-3}H$, при этом безразмерное значение величины первого пристеночного шага в переменных закона стенки Δy^+ не превышает 5 на поверхностях каверны. Коэффициенты разбега размера ячеек варьируются в зависимости от зоны и направления, но не превышают значения 1.25. Общее число узлов итоговой вычислительной сетки при этом составляет 4.05 млн.



Фиг. 2. Общий вид каверны M219 (а) и результаты тестового расчета: общий уровень пульсаций давления в дБ вдоль центрального сечения на дне каверны (б) и спектры пульсаций давления в дБ/Гц в точках с координатами $x/H = 0.75$ (в), 2.25 (г) и 4.75 (д): 1 – эксперимент, 2 – расчёт; 3 – интервал ± 2 дБ; 4, 5 и 6 – $x/H = 0.75, 2.25$ и 4.57

Длина выборки пульсаций давления в эксперименте и численном расчёте составляет 3.4 и 1 с соответственно. Численное моделирование проводилось на суперкомпьютере “Ломоносов” при одновременном задействовании 448 процессорных ядер.

На фиг. 2, б–д представлены результаты расчета задачи в сравнении с соответствующими экспериментальными данными на дне каверны (вдоль линии $y/H = -1, z/H = -0.25$). Что касается общего уровня пульсаций давления (фиг. 2, б), то по всей длине каверны различие относительно экспериментальных значений не превышает 2 дБ, при этом в среднем – не более 0.5 дБ. На фиг. 2, в, г, д представлено распределение уровней по полосам частот в низкочастотном, преимущественно акустическом, диапазоне от 0 до 1200 Гц в точках на дне каверны. Хорошая согласованность формы, частоты пиков и общих уровней расчетных данных с экспериментальными говорят о корректности воспроизводимого с помощью численного моделирования нестационарного процесса внутри полости каверны. Необходимо отметить, что достигаемая точность достаточно высока и в сравнении с результатами, полученными другими авторами с помощью гибридного RANS–LES- метода DES (например, [19]), сопоставима с данными подробного LES-расчета [20].

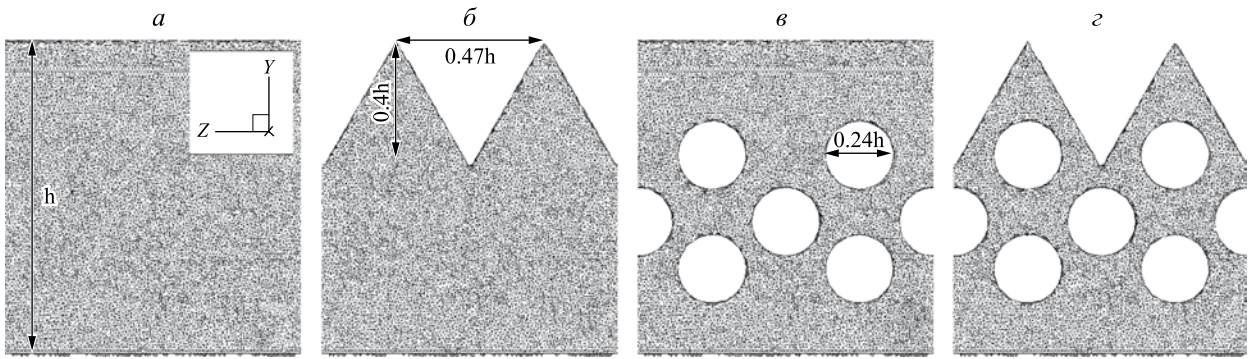
Установленные результаты в целом свидетельствуют о достаточно точном воспроизведении как средних, так и спектральных характеристик образующегося турбулентного течения вокруг каверны. Это даёт основание рассчитывать на правильность моделирования турбулентных течений вокруг выемок в схожих постановках и, в частности, в задачах, рассматриваемых в статье.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ВОЗЛЕ ДЕФЛЕКТОРА РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

3.1. Постановка задачи

Характер влияния дефлектора на свойства течения во многом определяется его геометрической формой, поэтому представляют интерес результаты расчетов обтекания дефлектора различных геометрических конфигураций. Рассмотрение обтекания изолированного дефлектора (без каверны) позволяет использовать достаточно подробную сетку и тем самым исследовать влияние изменения геометрической формы дефлектора на формируемое за ним турбулентное течение.

В работе рассматриваются четыре дефлектора различной геометрической формы, профили которых приведены на фиг. 3. Конфигурация, обозначенная как D4, соответствует одной из форм



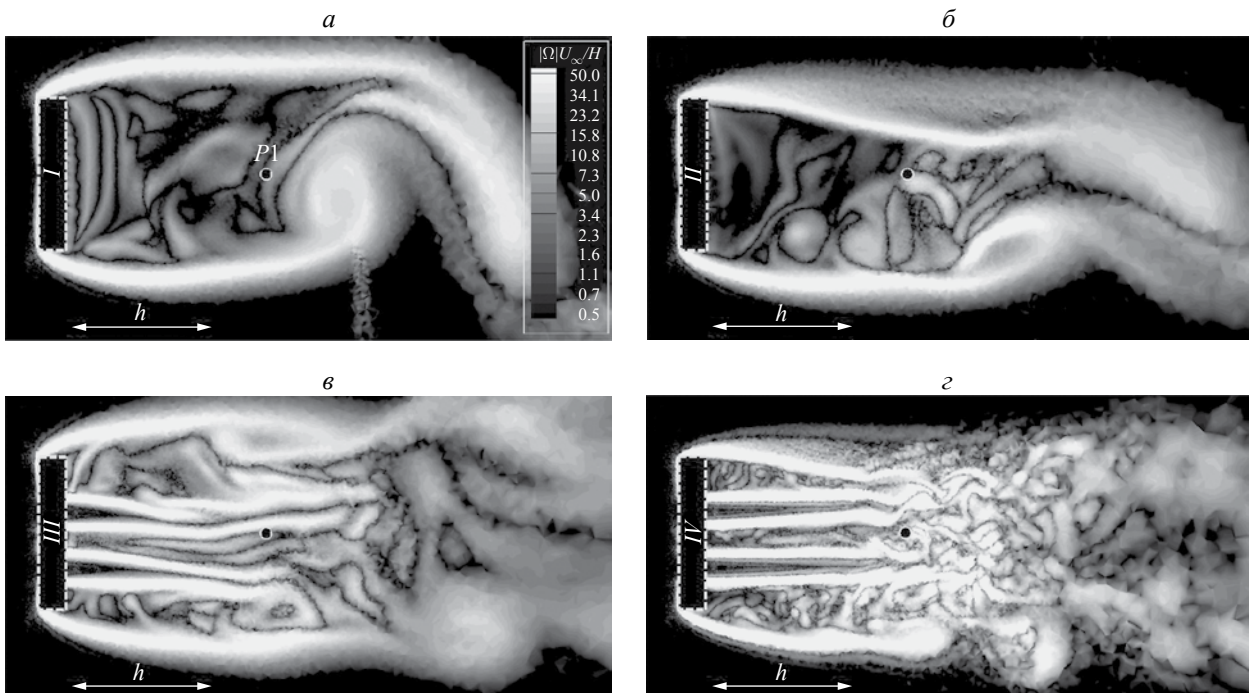
Фиг. 3. Общий вид четырёх рассматриваемых конфигураций дефлектора, обозначенных как D1 (а), D2 (б), D3 (в), D4 (г)

дефлектора, применяемого на практике (выдержаны относительные размеры перфорации и зубьев). Конфигурации D2 и D3 рассматриваются для того, чтобы определить какой вклад в изменение течения вносят перфорация и зубчатая кромка по отдельности.

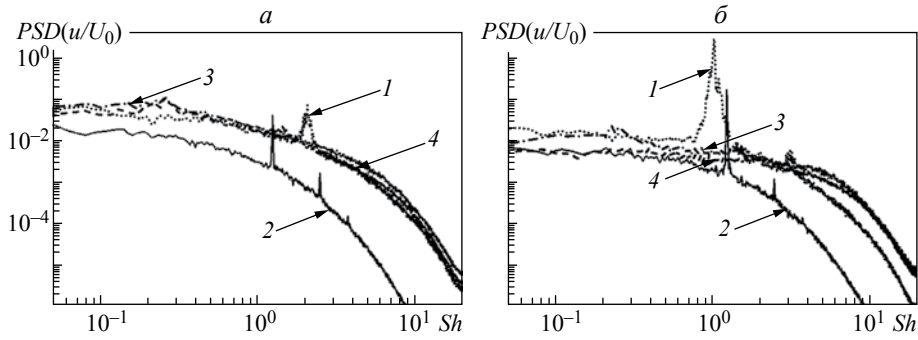
В целом вычислительная постановка и характерные параметры соответствуют задаче, рассмотренной в ходе тестирования и описанной в пункте 2 настоящей статьи. Подчеркнем и тот факт, что моделирование граничного условия на поверхности дефлектора методом погруженных границ позволяет использовать одну ту же вычислительную сетку для всей серии расчетов по обтеканию дефлекторов различной конфигурации. Из фиг. 3 можно судить о подробности сеточного разрешения в области расположения дефлекторов.

3.2. Результаты численного моделирования

На фиг. 4, а–г представлены мгновенные картины течения возле дефлекторов D1–D4 соответственно в некотором поперечном ($z/h = 0$) сечении, изображенные уровнями модуля завихренности. На фиг. 5 изображены спектральные плотности мощности пульсаций компонент скорости



Фиг. 4. Характерные мгновенные картины течения (поля модуля завихренности) возле дефлекторов D1 (а), D2 (б), D3 (в), D4 (г)



Фиг. 5. Графики спектральной плотности мощности пульсаций продольной (а) и поперечной (б) компонент скорости в точке ближнего поля, обозначенной как P1 на фиг. 4 (1–4 – дефлекторы D1–D4)

в точке ближнего поля. Полученные течения можно охарактеризовать следующим образом. Дефлектор без зубьев и перфорации представляет плохообтекаемое тело, за которым образуется характерная вихревая дорожка с доминирующей дискретной частотой, отчетливо видной на фиг. 5, соответствующей анизотропным вихревым структурам. Введение зубчатости в геометрию дефлектора снижает скоррелированность вихрей по поперечному направлению, что приводит к снижению ширины и мощности узкополосной составляющей в спектрах. Это отчетливо видно на графиках (кривые 2 на фиг. 5). Картины течения на фиг. 4, в и г наглядно демонстрируют увеличение турбулизации потока за счет перфорации в дефлекторах. Массы газа, проходящие через отверстия, образуют тонкие взаимодействующие струи за препятствием, что приводит к окончательному “размыванию” анизотропных вихрей. В связи с этим спектры 3 и 4 на фиг. 5 характеризуются более высоким уровнем широкополосной при отсутствии узкополосной составляющей в спектре. Таким образом, дефлектор с зубьями и перфорацией служат своего рода турбулизаторами потока, не внося при этом дополнительных дискретных составляющих высокой мощности, которые могут являться источниками или же инициаторами возникновения новых нежелательных механизмов генерации шума.

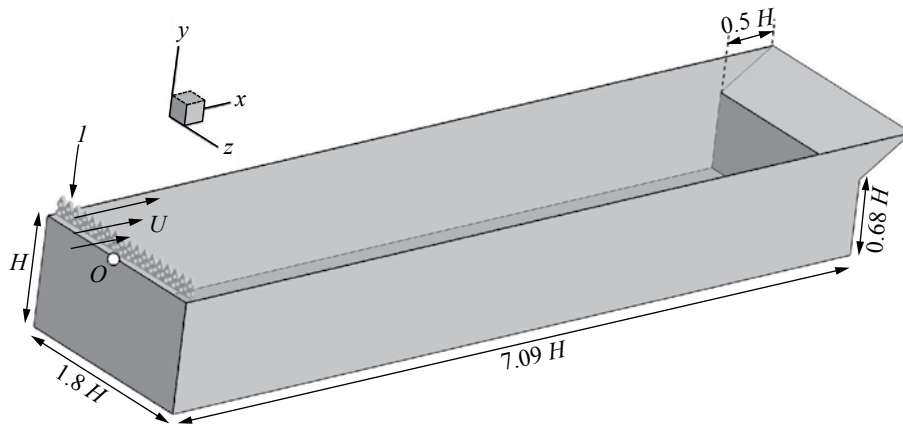
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗЛЕ КАВЕРНЫ ПРИ ОТСУТСТВИИ И С НАЛИЧИЕМ ДЕФЛЕКТОРА

4.1. Постановка задачи

Для исследования влияния дефлектора на особенности течения и шумообразование в полости каверны проводятся два крупномасштабных турбулентных расчета с наличием и отсутствием дефлектора.

Геометрия полости каверны представлена на фиг. 6. В качестве характерного размера берется глубина каверны H . Посчитанное по ней и по скорости набегающего потока, соответствующей числу $M = 0.8$, число Рейнольдса задачи составляет $Re_H = 7 \cdot 10^6$. Конструктивная особенность рассматриваемой каверны – наличие скоса с углом порядка 33° на задней стенке, что регулярно используется в реальных конфигурациях в авиационных приложениях. За счет скоса течение в полости каверны в меньшей степени зависит от колебания угла атаки и других показателей, влияющих на примыкание слоя смещения к задней стенке. Тем самым обеспечивается сохранение общего режима обтекания, обусловленного конструктивными особенностями объекта.

Расчетная область над каверной, как и для тестовой задачи (пункт 2), представляет собой параллелепипед размерами $L_x \times L_y \times L_z$, равными $18H \times 16H \times 9H$. Точка начала координат $O(0, 0, 0)$, обозначенная на фиг. 6, расположена на кромке каверны в центральном поперечном сечении. Входная граница, на которой задаётся однородный поток, располагается на расстоянии $5H$ от точки O вверх по потоку. В результате толщина пограничного слоя в районе передней кромки оказывается достаточно малой по сравнению с размерами каверны и составляет примерно $0.06H$. Остальные свободные границы находятся на достаточном удалении от полости каверны, что делается во избежание влияния возможных паразитных отражений. Дефлектор располагается на расстоянии $0.07H$ от передней кромки каверны.



Фиг. 6. Общий вид каверны с дефлектором 1

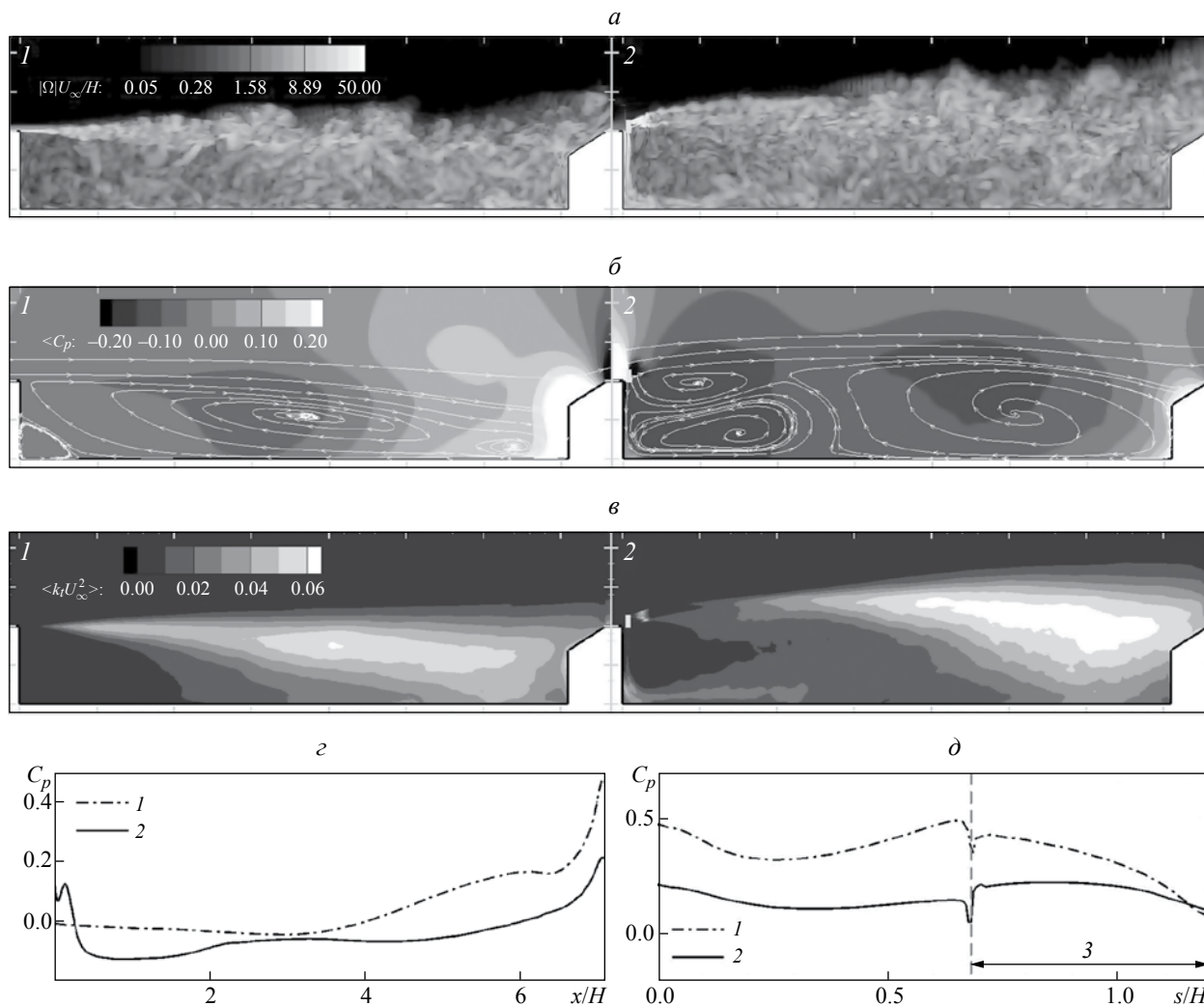
Для проведения расчетов используются две различные вычислительные сетки, параметры которых соответствуют сеткам, на которых моделировалась тестовая задача по обтеканию каверны M219 (разд. 2). Сначала в соответствии с рекомендациями [18] строится гексаэдральная неструктурированная сетка для моделирования течения возле каверны без дефлектора. Возле твердых стенок сеточное разрешение в нормальном направлении составляет $10^{-3} H$, при этом значения параметра y^+ варьируются от 10 до 50. В зоне развитого турбулентного течения, в полости каверны, характерный размер ячеек не превышает $H/30$. Для проведения расчета с наличием дефлектора в области его установки вычислительная сетка адаптируется путем изотропного сгущения с параметрами, аналогичными тестовой задаче из пункта 2 и задаче о дефлекторе в свободном потоке из разд. 3. Размеры таким образом построенных вычислительных сеток для расчетов при отсутствии и с наличием дефлектора составляют 5.07 и 14.08 млн узлов соответственно.

4.2. Результаты численного моделирования

Результаты обоих расчетов, без дефлектора и с дефлектором, представлены на фиг. 7 и 8. На первой из них изображены мгновенные и осредненные картины течения в центральном поперечном сечении ($z/H = 0$). Обе мгновенные картины течения (фиг. 7, а) демонстрируют интенсивное вихреобразование в полости каверны, индуцированное возникновением неустойчивости возле передней кромки каверны и развитием трёхмерного турбулентного слоя смешения с последующим его примыканием к задней стенке. Отметим, что в обоих расчетах практически отсутствует затягивание “численного” перехода к турбулентности в оторвавшемся слое смешения, что представляет достаточно распространенную проблему при использовании гибридного RANS–LES-метода и моделировании отрывных турбулентных течений вообще. Этот факт обеспечивает возможность адекватного сопоставления результатов обоих расчетов. Как видно из фиг. 7, а, установка дефлектора приводит к более интенсивной турбулизации течения и расширению области развитого слоя смешения, а также толщины соответствующего тангенциального разрыва в целом. Это отражается на увеличении уровней кинетической энергии турбулентности, что отчетливо видно на фиг. 7, в. Возрастание кинетической энергии турбулентных структур приводит к оттоку энергии набегающего потока, что, в свою очередь, ведёт к ослаблению нагрузок на поверхность обтекаемой конструкции. Это подтверждается, в частности, приведёнными далее результатами.

Линии тока, изображенные на фиг. 7, б, свидетельствуют об усложнении структуры течения в случае наличия дефлектора: в полости каверны образуется уже несколько зон рециркуляции вместо одной большой при его отсутствии. Точка примыкания потока при этом немного сдвигается вверх, перемещаясь на скошенный участок задней стенки.

Распределение осредненного коэффициента давления в среднем сечении (фиг. 7, б) и особенно значения этой величины вдоль центральной линии на дне каверны и на ее скошенной задней стенке (фиг. 7, г и д соответственно) наглядно показывают, что установка дефлектора ведёт к заметному снижению давления на поверхности обтекаемой каверны. На фиг. 7, а–в (2) также можно увидеть появление дополнительных токов, проходящих через зазор между кромкой каверны и дефлектором, что естественным образом влияет на общую структуру течения в полости. В частности, это

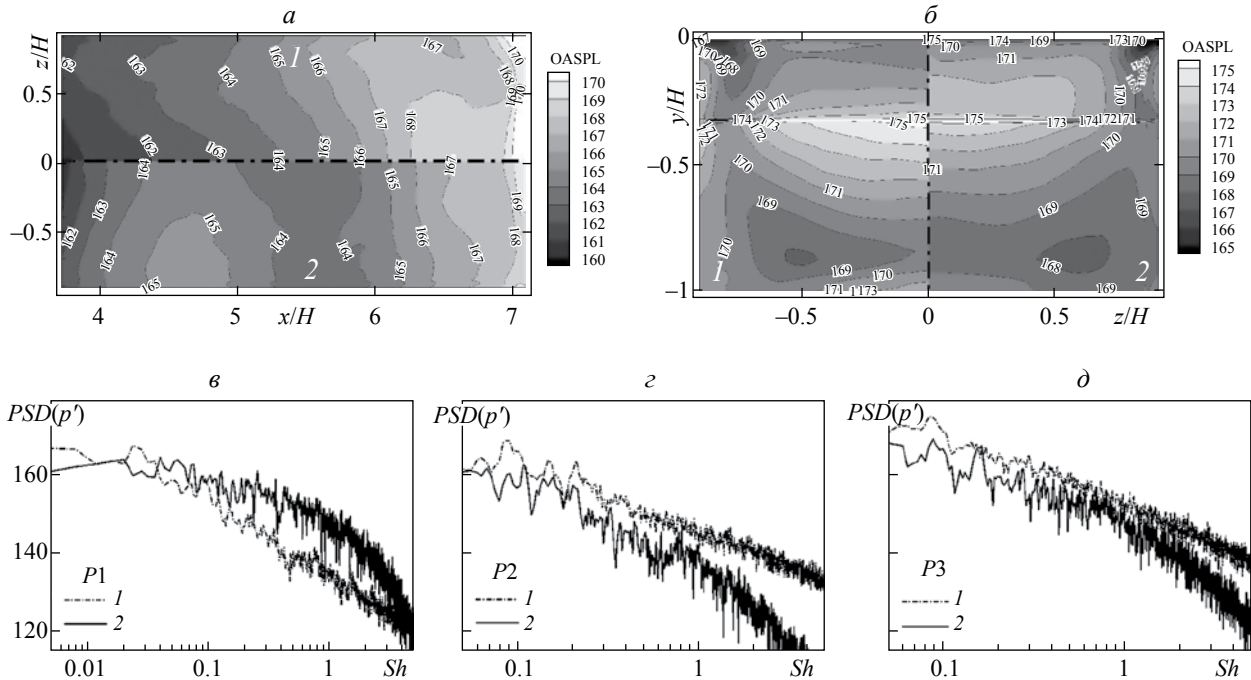


Фиг. 7. Результаты численного моделирования течения возле каверны при отсутствии (1) и наличии (2) дефлектора, s/H – расстояние вдоль контура задней стенки каверны, 3 – область склона задней стенки

проявляется в возрастании осреднённого коэффициента давления на участке дна, примыкающего к передней стенке (фиг. 7, в).

Наличие дефлектора оказывает заметное влияние и на акустические нагрузки на стенки каверны. На фиг. 8 изображено распределение общего уровня пульсаций давления (OASPL в дБ) на дне каверны (фиг. 8, а) и на её задней стенке (фиг. 8, б). Видно, что дефлектор снижает акустические нагрузки на дне выемки, на участке примыкания к задней стенке, а также практически на всей задней стенке. На отдельных участках (в частности, в районе точки примыкания) разница в общем уровне пульсаций давления составляет от 2 до 5 дБ. Аналогичную картину можно наблюдать на графиках спектральной плотности, приведенных на фиг. 8, в–д в точках, лежащих на дне каверны вдоль центральной линии. При наличии дефлектора пульсации давления оказываются более интенсивными лишь в первой точке (фиг. 8, в), лежащей на дне близко от передней кромки, что происходит, по всей видимости, из-за сильного воздушного стока из зазора между дефлектором и передней кромкой. Отметим, что мощность такого затекания, вероятно, можно регулировать параметрами установки дефлектора, а также конфигурацией его нижней кромки.

Анализируя полученные численные результаты, логично предположить, что к еще большему снижению акустических нагрузок на поверхности каверны может способствовать некоторое



Фиг. 8. Акустические нагрузки на поверхности: на дне каверны (а) и на задней стенке каверны со скосом (б); в, з, д – графики спектральной плотности пульсаций давления в точках с координатами $x/H = 1, 3$ и 6 , лежащих на дне каверны вдоль центральной линии; 1 и 2 как в фиг. 7

увеличение высоты дефлектора, которое могло бы отодвинуть точку примыкания дальше от излома на скошенном участке задней стенки¹.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика численного моделирования течения вязкого сжимаемого газа вокруг каверны в присутствии дефлектора позволяет проводить расчеты аэродинамических и акустических характеристик самолётного отсека с возможностью оперативного изменения пространственного расположения и геометрической формы дефлектора. Аналогичным образом, а именно с использованием метода погруженных границ, можно описывать и другие конструктивные детали отсека или иного обтекаемого фрагмента поверхности летательного аппарата. Такой подход представляется особенно удобным, если эти детали могут часто менять свою конфигурацию в процессе разработки и двигаться относительно основной обтекаемой конструкции.

Для имитации влияния дефлектора на течение, образующееся в каверне, применен метод погруженных границ. Он позволил менять форму и пространственное положение дефлектора, не перестраивая при этом расчетную сетку. Использование данного подхода сделало разработанную методику экономичной для решения задач по оптимизации формы с дефлектором (с точки зрения временных и вычислительных затрат).

Разработанная методика применена для исследования эффективности дефлектора, устанавливаемого на входе в каверну с целью снижения аэроакустического нагружения на её поверхности. Для этого проведено численное моделирование обтекания изолированных дефлекторов разной геометрической формы, а также турбулентного течения вблизи протяженной каверны с установленным на передней кромке дефлектором и без него. Показано, что установка дефлектора на передней кромке в начале каверны заметно снижает средний коэффициент давления на дне каверны и на ее задней стенке, а также общий уровень пульсаций давления на этих же участках поверхности выемки.

¹ Данное предположение было подтверждено Б. Н. Даньковым (ЦНИИМаш) при обсуждении с ним численных результатов.

Дальнейшее развитие представленной численной методики будет вестись в направлении её обобщения на задачи с движущимися конструктивными деталями. С этой целью предполагается внедрить экономный метод динамической адаптации неструктурированной сетки к поверхности движущегося объекта, а также технику расчёта на подвижных сетках.

Работа по адаптации метода погруженных граничных условий к моделированию турбулентных течений на основе гибридного RANS–LES-подхода семейства DES выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект 16-11-10350). Расчёты проводились на суперкомпьютерах “10П” (МСЦ РАН), “Ломоносов” (МГУ им. М. В. Ломоносова), а также на суперкомпьютере РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tracy M. B., Plentovich E. B.* Cavity Unsteady-Pressure Measurements at Subsonic and Transonic Speeds // NASA-TP-3669. 1997.
2. *Абдрашитов Р. Г. и др.* Оценка эффективности дефлекторов в основных грузовых отсеках об. Т-50-2 // Отчет о НИР. М., 2013. № Т-50-2-006-31.
3. *Даньков Б. Н. и др.* Расчётно-экспериментальные исследования и выработка конструктивных решений по снижению акустического нагружения в открытых полостях // Отчет о НИР. М.: ФГУП ЦНИИмаш, 2006. № 112-2121-2006-5.
4. *Абдрашитов Р. Г., Архиреева Е. Ю., Даньков Б. Н., Меньшов И. С., Северин А. В., Семенов И. В., Трубунских Т. В., Чучкалов И. Б.* Механизмы нестационарных процессов в протяженной каверне // Учен. зап. ЦАГИ. 2012. Т. 43. № 4. С. 39–56.
5. *Попов О. Ю., Абдрашитов Р. Г.* Снижение акустического нагружения открытых отсеков высокоскоростных самолетов // Сб. науч. тр. конф. XXVII сессия Рос. акуст. общ-ва. С.-Петербург, 2014. 20 с.
6. *de Henshaw M.J.C.* M219 cavity case: Verification and validation data for computational unsteady aerodynamics // Tech. Rep. RTO-TR-26, AC/323 (AVT) TP/19. UK: QinetiQ, 2002. P. 453–472.
7. *Peshkin D. A.* TurMMAC application challenge test case specification: M219 cavity // Tech. Rep. QinetiQ/TST/CAT/WR020905. 2002.
8. *Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A.* An Enhanced Version of DES with Rapid Transition from RANS to LES in Separated Flows // Flow Turb. Comb. 2015. V. 95. № 4. P. 709–737.
9. *Spalart P. R., Allmaras S. R.* A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // AIAA Paper. 1992. № 92-0439.
10. *Peskin C. S.* Flow patterns around heart valves: a numerical method // J. Comput. Phys. 1972. V. 10. P. 252–271.
11. *Абалакин И. В., Жданова Н. С., Козубская Т. К.* Реализация метода погруженных границ для моделирования задач внешнего обтекания на неструктурированных сетках // Матем. моделирование. 2015. Т. 27. № 10. С. 5–20.
12. *Boiron O., Chiavassa G., Donat R.* A high-resolution penalization method for large Mach number flows in the presence of obstacles // Comput. Fluids. 2009. V. 38. № 3. P. 703–714.
13. *Волков К. Н.* Формулировка граничных условий на стенке в расчетах турбулентных течений на неструктурированных сетках // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2014. Т. 54. № 2. С. 2336–351.
14. *Knopp T., Alrutz Th., Schwaborn D.* A grid and flow adaptive wall-function method for RANS turbulence modelling. // J. Comput. Phys. 2006. V. 220. P. 19–40.
15. *Абалакин И. В., Бахвалов П. А., Горобец А. В., Дубень А. П., Козубская Т. К.* Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычисл. методы программирования. 2012. Т. 13. Вып. 3. С. 110–125.
16. *Abalakin I. V., Bakhvalov P. A., Kozubskaya T. K.* Edge-based reconstruction schemes for prediction of near field flow region in complex aeroacoustic problems // Int. J. Aeroacoustics. 2014. V. 13. № 3–4. P. 207–234.
17. *Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P. R.* Physical and numerical upgrades in the Detached-Eddy Simulation of complex turbulent flows // Fluid Mech. Appl. 2004. V. 65. P. 239–254.
18. *Spalart P. R.* Young-Person’s Guide to Detached-Eddy Simulation Grids. // NASA-CR-2001-211032. 2001.
19. *DESider – A European Effort on Hybrid RANS-LES Modelling / Ed. Haase W., Braza M., Revell A. – Springer, 2009.*
20. *Larcheveque L., Sagaut P., Le Th.-H., Comte P.* Large-eddy simulation of a compressible flow in a three-dimensional open cavity at high Reynolds number // J. Fluid Mech. 2004. V. 516. P. 265–301.