

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 532.517

МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РАСЧЕТАХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Гусенцова Я.А.¹, Красногрудов А.В.², Родыгина М.М.³, Высоцкая Н.Д.

¹⁻³ФБГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля»
291034, Луганская Народная Республика, г.о. Луганский, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А
E-mail: ¹gusentsova@gmail.com, ²krasnogrudov@mail.ru, ³sunsara_06@mail.ru

³ ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Агротехнологическая академия»
295492, Республика Крым, г. Симферополь, п. Аграрное,
E-mail: natali.v-v@mail.ru

Аннотация. Проведен обзор наиболее распространенных в инженерных расчетах моделей турбулентности, которые позволяют приближенно описывать турбулентные потоки, используя уравнения движения Рейнольдса, показаны их области применения. Для расчета турбулентных течений путем решения уравнений Рейнольдса, принимается гипотеза замыкания уравнений турбулентного движения для вихревых или «кажущихся» турбулентных напряжений и связь с другими переменными, входящими в уравнения.

Отмечено, что одной из основных рассматривается гипотеза Буссинеска, которая подтверждается экспериментальными исследованиями турбулентности, утверждающая, что турбулентный поток характеризуется наличием каскада передачи энергии от больших масштабов к меньшим.

Кроме того, авторами рассмотрена полуэмпирическая теория Прандтля, основанная на предположении, что турбулентное движение состоит из бесконечного числа вихрей различных масштабов, которые взаимодействуют друг с другом и переносят энергию от больших масштабов к меньшим; модели специально адаптированные к конкретному типу задачи, (GDT, Generalized Theory of Turbulence), которая является теорией, разработанной для описания и моделирования например, LES для моделирования взаимодействия турбулентных потоков; обобщенная теория развитой турбулентности турбулентных потоков в различных технических устройствах.

Обосновано, что одним из наиболее распространенных подходов является использование моделей с различными уровнями детализации, начиная с более простых моделей и переходя к более сложным, если это необходимо для достижения требуемой точности. Такой подход называется методом «лестницы моделей» или RANS/LES.

Предмет исследования: модели турбулентности для расчета аэродинамических характеристик газовых потоков.

Материалы и методы: основой выполненных исследований является ряд научных работ отечественных и зарубежных исследователей в данной области и результаты, полученные авторами в процессе выполнения работы.

Использован системный подход, означающий рассмотрение и изучение объекта исследования как интегрированной системы, состоящей из множества взаимосвязанных элементов.

Результаты: авторы отмечают, что одним из наиболее распространенных подходов является использование моделей с различными уровнями детализации, начиная с более простых моделей и переходя к более сложным, если это необходимо для достижения требуемой точности. Такой подход называется методом «лестницы моделей» или RANS/LES.

Выводы: выбор модели турбулентности для конкретных случаев зависит от ряда факторов, включая характеристики потока, доступные данные, требования к точности и вычислительные возможности. К критериям выбора относятся: физические свойства и режим потока; степень точности расчетов и расчетные возможности.

Ключевые слова: турбулентность, модель турбулентности, области применения, k-epsilon модель, модель Буссинеска, «лестница моделей».

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование турбулентности является важной задачей во многих областях науки и техники, таких как аэродинамика, гидродинамика, климатология, и многие другие.

Турбулентность – это сложное движение жидкости или газа, которое характеризуется непредсказуемыми колебаниями скорости и давления в пространстве и времени. Эти колебания могут быть очень малыми и быстрыми, что делает их невозможными для точного измерения или расчета на макроскопическом уровне. Поэтому, для

моделирования турбулентности необходимо использовать математические модели [4].

Модели турбулентности позволяют приближенно описывать турбулентные потоки, используя уравнения Рейнольдса [9]. Эти модели могут быть классифицированы как линейные и нелинейные, и могут использоваться в различных приложениях в зависимости от степени точности, необходимой для решения задачи.

Исходя из этого, целью исследования в представленной работе является анализ существующих моделей турбулентности для расчетов конкретных случаев течения газовых потоков.

Среди задач можно выделить следующие: анализ наиболее распространенных в практике расчетов моделей аэродинамических характеристик газовых потоков, таких как, гипотеза Буссинеска, полуимперическая гипотеза Прандтля, обобщенная теория развитой турбулентности (GDT, Generalized Theory of Turbulence), модель k-epsilon и некоторые другие.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из основных применений моделей турбулентности является проектирование и оптимизация инженерных систем, таких как автомобили, самолеты, корабли, турбины др. Использование моделей турбулентности позволяет инженерам и проектировщикам более точно оценивать производительность систем и определять наиболее эффективные их конфигурации [6].

Кроме того, моделирование турбулентности имеет важное значение для исследования атмосферных явлений, таких как циклоны и ураганы, а также для моделирования течения воды в реках и океанах. Эти приложения помогают улучшить понимание природных явлений и предоставляют ценную информацию для принятия решений в различных областях, включая экологию и гидрологию.

Таким образом, использование моделей турбулентности является необходимым для более точного моделирования и понимания сложных турбулентных потоков, что в свою очередь позволяет улучшить производительность и эффективность инженерных систем и улучшить наше понимание природных явлений.

Аэродинамика потоков в различных технических устройствах оказывает существенное влияние на их надежность и экономичность. На базе основных уравнений аэродинамики была решена задача о приточных и вытяжных воздуховодах. К числу аналитически решаемых вопросов следует в первую очередь отнести вопросы о закономерностях развития свободных приточных изотермических и неизотермических струй, конвективных струй, о взаимодействии их между собой и с набегающим на них потоком воздуха, о стеснении струй твердыми стенками и вопрос о затихании скоростей во всасывающих факелах [3].

Подчеркнем еще раз, что при разработке моделей течения важной задачей в расчетах аэродинамических характеристик различных аэродинамических и гидравлических систем является выбор модели для дополнительных

турбулентных напряжений при замыкании уравнений движения.

В литературе [1, 2, 4, 5] достаточно широко представлены подходы к определению турбулентных напряжений, как на основе теоретических гипотез, так и с использованием полуэмпирических зависимостей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основой выполненных исследований является ряд научных работ отечественных и зарубежных исследователей в данной области и результаты, полученные авторами в процессе выполнения работы.

В контексте исследований использован системный подход, означающий рассмотрение и изучение объекта исследования как интегрированной системы, состоящей из множества взаимосвязанных элементов. Этот подход позволяет учитывать множество факторов, которые могут влиять на результаты исследования, и обеспечивает более полное и точное понимание исследуемых явлений.

В данном случае системный подход включал следующие этапы:

1. Анализ модели и ее компонентов.
2. Определение взаимосвязей между компонентами модели.
3. Оценка воздействия каждого компонента на модель в целом.
4. Оценка результатов исследования.

Применение системного подхода в данном случае позволило получить более точные и полные результаты, а также учитывать множество факторов, которые могут повлиять на результаты исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В представленной работе дан обзор наиболее распространенных в практике инженерных расчетов модели турбулентности, описаны области их применения и даны рекомендации по использованию их в расчетах аэродинамических характеристик систем промышленного назначения. Базовыми уравнениями, описывающими стационарное турбулентное течение без учета массовых сил в декартовой системе координат, являются уравнения движения Рейнольдса [1, 4, 9]:

$$\begin{aligned} & \rho \left(\langle u_x \rangle \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial x} + \langle u_y \rangle \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial y} + \langle u_z \rangle \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial z} \right) = \\ & = \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 \langle u_x \rangle}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \langle u_x \rangle}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \langle u_x \rangle}{\partial z^2} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho \langle u_x' u_x' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\rho \langle u_x' u_y' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\rho \langle u_x' u_z' \rangle \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\langle u_x \rangle \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial x} + \langle u_y \rangle \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial y} + \langle u_z \rangle \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial z} \right) = \\ & = \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 \langle u_y \rangle}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \langle u_y \rangle}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \langle u_y \rangle}{\partial z^2} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho \langle u_y' u_x' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\rho \langle u_y' u_y' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\rho \langle u_y' u_z' \rangle \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\langle u_x \rangle \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial x} + \langle u_y \rangle \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial y} + \langle u_z \rangle \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial z} \right) = \\ & = \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 \langle u_z \rangle}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \langle u_z \rangle}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \langle u_z \rangle}{\partial z^2} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho \langle u_z' u_x' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\rho \langle u_z' u_y' \rangle \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\rho \langle u_z' u_z' \rangle \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle u_x \rangle, \langle u_y \rangle, \langle u_z \rangle$ – осредненные проекции скорости;

$\langle p \rangle$ – осредненное давление;

u_x', u_y', u_z' – пульсационные проекции скорости;

$\langle u_x' u_x' \rangle, \langle u_x' u_y' \rangle, \dots$ – осредненные значения произведения двух пульсационных скоростей;

μ – динамическая вязкость среды.

Уравнения движения дополняются уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Система уравнений движения и неразрывности (1) – (4) содержит десять неизвестных и, следовательно, незамкнута. Чтобы рассчитать турбулентные течения путем решения уравнений Рейнольдса, необходимо принять гипотезу замыкания для «кажущихся» турбулентных напряжений и другими переменными, входящими в уравнения.

Все существующие гипотезы и основанные на них модели турбулентности имеют недостатки. Окончательная модель турбулентности еще не

создана. Работы многих исследователей [2, 7,10] в области турбулентных течений посвящены поиску моделей, которые имеют приемлемую точность в ограниченном диапазоне условий течения.

Гипотеза Буссинеска (также известная как гипотеза каскадной турбулентности) является фундаментальной концепцией в изучении турбулентности. Она была предложена в 1941 году французским физиком Жоржем Буссинеском.

Согласно гипотезе Буссинеска, турбулентное движение состоит из бесконечной иерархии вихрей

различных масштабов, которые образуются за счет неустойчивости потока. Большие вихри переносят энергию от более крупных масштабов к меньшим, пока энергия не расходуется на молекулярную диффузию. Каждый вихрь имеет свой масштаб и время жизни, которые зависят от величины и скорости потока.

Гипотеза Буссинеска подтверждается экспериментальными исследованиями турбулентности, которые показывают, что турбулентный поток характеризуется наличием каскада энергии от больших масштабов к меньшим. Эта гипотеза также используется в моделировании

турбулентности в различных инженерных приложениях, включая аэродинамику, гидродинамику, климатологию и др.

Однако, несмотря на то, что гипотеза Буссинеска считается важной теоретической концепцией в изучении турбулентности, она не является полностью универсальной и может быть улучшена или дополнена в зависимости от конкретной задачи и условий потока.

Согласно гипотезе Буссинеска [4, 6, 11] турбулентное напряжение определяется по формуле, аналогичной для касательного напряжения при ламинарном течении. Например,

$$\tau_{xy}^t = -\rho \langle u_x' u_y' \rangle = \rho \nu_\epsilon \left(\frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial x} \right), \quad (5)$$

а для прямолинейного вдоль оси x сдвигового течения:

$$\tau_{xy}^t = -\rho \langle u_x' u_y' \rangle = \rho \nu_\epsilon \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial y}. \quad (6)$$

Коэффициент ν_ϵ носит название кинематического коэффициента турбулентной (вихревой или «кажущейся») вязкости и имеет размерность $[m^2/c]$. Если предположить или установить из опыта определенный вид зависимости ν_ϵ от координат, то решается задача отыскания связи турбулентного напряжения и усредненной скорости.

Полуэмпирическая теория Прандтля (также известная как классическая теория турбулентности) разработана Людвигом Прандтлем в начале XX века [3, 6]. Она основана на предположении, что турбулентное движение состоит из бесконечного числа вихрей различных масштабов, которые взаимодействуют друг с другом и переносят энергию от больших масштабов к меньшим.

Согласно теории Прандтля, существует универсальный закон, называемый «законом движения Прандтля», который описывает статистические характеристики турбулентного потока. Этот закон утверждает, что интенсивность турбулентного потока пропорциональна средней скорости потока и обратно пропорциональна линейному размеру потока. Также предполагается, что турбулентность описывается двумя параметрами: кинетической энергией и масштабом.

Теория Прандтля позволяет описывать многие экспериментальные данные, например, зависимость среднеквадратичного отклонения скорости от расстояния до стенки трубы, но она не способна описать все турбулентные явления, поскольку не учитывает эффекты сжимаемости, разрыва потока и другие особенности турбулентности в сложных потоках.

Тем не менее, теория Прандтля по-прежнему является важным инструментом для изучения турбулентности и используется во многих областях науки и техники.

Согласно этой теории модуль касательного турбулентного напряжения для прямолинейного вдоль оси x сдвигового течения имеет вид:

$$|\tau_{xy}^t| = \left| \rho \langle u_x' u_y' \rangle \right| = \rho l_\tau^2 \left(\frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial y} \right)^2, \quad (7)$$

где l_τ – длина пути перемешивания.

Используя (6) и (7), устанавливается связь между кинематическим коэффициентом вихревой вязкости и длиной пути перемешивания:

$$\nu_\epsilon = l_\tau^2 \left| \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial y} \right|. \quad (8)$$

Как видно, гипотеза Буссинеска и гипотеза Прандтля сводит задачу отыскания связи турбулентных касательных напряжений с полем усредненных скоростей к другой задаче – определению некоторой функции координат ν_ϵ и l_τ , характерной для турбулентного потока. Решение этой второй задачи основано или на экспериментальных данных, или на дополнительных гипотезах.

Обобщенная теория развитой турбулентности (GDT, Generalized Theory of Turbulence) является теорией, разработанной для описания и моделирования турбулентных потоков в различных физических системах, в таких отраслях, как

аэродинамика, гидродинамика, теплообмен и др. [3, 9].

GDT основывается на предположении, что турбулентные потоки состоят из взаимодействующих вихрей различных масштабов, и что энергия передается от больших масштабов к меньшим в результате этого взаимодействия. В результате, GDT использует статистический подход для описания турбулентных потоков, в котором параметры потока, такие как скорость и давление, рассматриваются как случайные величины.

Основной элемент GDT – это уравнение Колмогорова-Захарова (KZ), которое описывает спектр энергии турбулентного потока в зависимости от масштаба [7].

$$k = \frac{1}{2} (\langle u_x'^2 \rangle + \langle u_y'^2 \rangle + \langle u_z'^2 \rangle) \quad (9)$$

и скорости ее диссипации (форма записи представлена по Шлихтингу [1, 2, 4]:

$$\begin{aligned} \varepsilon = \nu & \left[2 \left\langle \frac{\partial u_x'}{\partial x} \right\rangle^2 + 2 \left\langle \frac{\partial u_y'}{\partial y} \right\rangle^2 + 2 \left\langle \frac{\partial u_z'}{\partial z} \right\rangle^2 + \right. \\ & + \left\langle \left(\frac{\partial u_x'}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y'}{\partial x} \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left(\frac{\partial u_x'}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z'}{\partial x} \right)^2 \right\rangle + \\ & \left. + \left\langle \left(\frac{\partial u_y'}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z'}{\partial y} \right)^2 \right\rangle \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Одной из наиболее распространенных моделей турбулентности является модель k-epsilon. Она основана на предположении о том, что в турбулентных потоках энергия перемещается между макроскопическими структурами течения и мелкими вихрями, которые обладают большей диссипацией энергии. Модель k-epsilon позволяет описывать эти процессы и прогнозировать распределение скорости и турбулентной энергии в течении газа.

Согласно такому подходу построены модификации k-epsilon модели, в которых турбулентные напряжения рассчитываются на основании концепции вихревой вязкости:

$$\tau_{ij}^t = \rho \nu_a \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k, \quad (11)$$

где символы Кронекера

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Оно описывает, как энергия более высоких масштабов передается к меньшим, и как она диссипируется на малых масштабах.

Основные достоинства GDT включают ее универсальность и способность описывать турбулентные потоки в широком диапазоне условий, в том числе в наиболее сложных и неоднородных системах. Кроме того, GDT может быть использована для моделирования турбулентных потоков в различных инженерных приложениях.

В основе теории [3, 6, 11] положен анализ изменения кинетической энергии турбулентного пульсационного движения:

или более простым образом:

$$\tau_{ij}^t = \rho \nu_a \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right). \quad (12)$$

Выражение (12) упрощает определение только нормальных напряжений.

Кинематический коэффициент вихревой вязкости устанавливается по «связке» Прандтля-Колмогорова:

$$\nu_a = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (13)$$

где C_ν – эмпирическая константа.

Кинетическая энергия турбулентного пульсационного движения и скорость ее диссипации связываются системой уравнений, где дополнительно рассматривается скорость генерации турбулентности:

$$\begin{aligned}
 G = & \tau_{xx}^t \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial x} + \tau_{yy}^t \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial y} + \tau_{zz}^t \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial z} + \\
 & + \tau_{xy}^t \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial y} + \tau_{yx}^t \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial x} + \tau_{xz}^t \frac{\partial \langle u_x \rangle}{\partial z} + \\
 & + \tau_{zx}^t \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial x} + \tau_{yz}^t \frac{\partial \langle u_y \rangle}{\partial z} + \tau_{zy}^t \frac{\partial \langle u_z \rangle}{\partial y}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

По стандартной k-epsilon модели уравнения, определяющие кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации, имеют вид [9]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho \langle u_x \rangle k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \langle u_y \rangle k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \langle u_z \rangle k)}{\partial z} = G - \rho \varepsilon + \\
 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho(v+v_a)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho(v+v_a)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho(v+v_a)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right); \\
 \frac{\partial(\rho \langle u_x \rangle \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \langle u_y \rangle \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \langle u_z \rangle \varepsilon)}{\partial z} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_3 \frac{G^2}{\rho k} + \\
 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho(v+v_a)}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho(v+v_a)}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho(v+v_a)}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right).
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где типовые значения эмпирических констант $C_v = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_1 = 1,43$, $C_2 = 1,92$, $C_3 = 0$ (в модифицированной модели $C_3 = 0,25$).

Модель k-epsilon турбулентности уже достаточно апробирована для решения широкого круга задач. Такая модель использовалась для расчета отрывных турбулентных пограничных слоев в задачах внешнего обтекания, для течений в круглых каналах с теплопередачей, для плоских и круглых струй.

Можно с уверенностью сказать, что данная модель наиболее широко применяется в инженерных расчетах по сравнению с остальными. Для большинства турбулентных течений результаты расчетов с использованием k-epsilon модели дают наиболее точные результаты, благодаря учету предыстории течения при определении параметров турбулентного потока.

Кроме упомянутых моделей турбулентности также существуют так называемые модели рейнольдсовых напряжений (иногда их называют моделями с уравнением для напряжений), в которых не предполагают, что турбулентные напряжения пропорциональны средней скорости деформации. В настоящее время эти модели широко используются скорее как инструмент или предмет в исследованиях турбулентности, нежели как средство решения инженерных задач.

В моделях рейнольдсовых напряжений отсутствует ограничение, накладываемое принятием гипотезы Буссинеска о связи

турбулентных напряжений со средней скоростью деформации, зато они содержат наибольшее количество уравнений и констант. На данный момент эти модели находятся еще в стадии разработки, и нуждаются в усовершенствовании для использования в инженерных расчетах.

Таким образом, в настоящее время наиболее обоснованной для расчета аэродинамических характеристик технических систем является k-epsilon модель, как с точки зрения точности получаемых результатов, так и возможности применения в практических расчетах с использованием численных методов.

Примером может быть моделирование течения в вентиляционных системах, где также может использоваться метод «лестницы моделей» и модели k-epsilon и RSM для учета турбулентных потоков внутри вентиляционных каналов [6, 8].

Другой распространенной моделью является модель Reynolds Stress. Она основана на уравнениях Навье-Стокса, которые учитывают момент, массу и энергию течения газа, но с добавлением уравнения Reynolds Stress, т.е. тензора, который описывает взаимодействие между турбулентными вихрями и средним течением газа.

Существуют другие модели, такие как модель каскада Ричардсона-Колмогорова, модель Large Eddy Simulation (LES) и др. Каждая модель имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретной задачи и условий ее решения.

Также можно применять модели, специально адаптированные к конкретному типу задачи, например, LES для моделирования взаимодействия турбулентных потоков и пламени при горении или модель SST (Shear Stress Transport) для моделирования течений с высокими градиентами скорости.

Некоторые модели могут быть более подходящими для определенных условий, например, модель Reynolds Stress может быть более эффективной при моделировании течений с высокими градиентами скорости, тогда как модель k-epsilon может быть лучшим выбором для низких градиентов скорости.

Выбор модели турбулентности зависит от многих факторов, таких как тип задачи, характеристики течения, доступность вычислительных ресурсов и точность, которую необходимо достичь. Некоторые модели более точны, но требуют большего объема вычислительных ресурсов, в то время как другие менее точны, но могут быть использованы на менее мощных компьютерах.

Одним из наиболее распространенных подходов является использование моделей с различными уровнями детализации, начиная с более простых моделей и переходя к более сложным, если это необходимо для достижения требуемой точности, т.е. методом «лестницы моделей» или RANS/LES [3, 6].

В целом, выбор модели турбулентности требует анализа специфики конкретной задачи и сравнения различных моделей в зависимости от требуемой точности, доступных ресурсов и времени расчета.

ВЫВОДЫ

Выбор теории турбулентности для конкретных случаев зависит от ряда факторов, включая характеристики потока, доступные данные, требования к точности и вычислительные возможности. Вот некоторые критерии, которые могут помочь выбрать подходящую теорию турбулентности:

Режим потока: для низкоскоростных потоков с малыми градиентами давления можно использовать простые модели турбулентности, такие как модель k-epsilon. Для высокоскоростных потоков с большими градиентами давления может потребоваться более сложная модель турбулентности, например, модель Reynolds Stress.

Физические свойства потока: некоторые теории турбулентности могут быть более подходящими для определенных типов потоков, например, теория развитой турбулентности может быть более эффективной для неоднородных потоков с большим числом масштабов.

Доступные данные: для некоторых приложений может быть доступно ограниченное количество экспериментальных данных. В таких случаях может потребоваться использование моделей турбулентности, которые могут быть более

простыми и менее точными, но имеют меньшую чувствительность к данным.

Точность: в некоторых приложениях может потребоваться высокая точность, например, в аэродинамике для расчета аэродинамических характеристик летательных аппаратов. В таких случаях может потребоваться использование более сложных моделей турбулентности, которые могут обеспечить более точные результаты.

Вычислительные возможности: для расчетов больших потоков с большим числом масштабов может потребоваться использование параллельных вычислительных систем и более быстрых алгоритмов. В таких случаях может быть необходимо использование более простых моделей турбулентности или использование адаптивных сеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т.2. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 392 с.
3. Аэрогидромеханика / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, Ю.И. Осенин и [др.]. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. – 516 с.
4. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение / П. Брэдшоу. – М.: Мир, 1974. – 279 с.
5. Зимин В.Д. Турбулентная конвекция / В.Д. Зимин, П.Г. Фрик. – М.: Наука, 1988. – 173 с.
6. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 735 с.
8. Основы механики сплошных сред / Недопекин Ф.В., Коваленко А.А., Соколов В.И., Андрийчук Н.Д., Гусенцова Я.А. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010. – 377 с.
9. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях Пер. с англ./ А. Дж. Рейнольдс. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
10. Соколов В.И. Аэродинамика газовых потоков сложных вентиляционных систем/ В.И. Соколов. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 1999. – 200 с.
11. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория / И.О. Хинце. – Москва.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 680 с.
12. Batchelor G.K. The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge University Press, 1982. – 212 p.

REFERENCES

1. Abramovich G.N. Teoriya turbulentny`x struj / G.N. Abramovich - M.: E`KOLIT, 2011. - 720 s.
2. Anderson D. Vy`chislitel`naya gidromexanika i teploobmen. T.2. / D. Anderson, Dzh. Tannexill, R. Pletcher. – M.: Mir, 1990. – 392 s.
3. Ae`rogidromexanika / A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, Yu.I. Osenin i [dr.]. – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalya, 2009. - 516 s.
4. Bre`dshou P. Vvedenie v turbulentnost` i ee izmerenie / P. Bre`dshou. - M.: Mir, 1974. - 279 s.
5. Zimin V.D. Turbulentnaya konvekciya / V.D. Zimin, P.G. Frik. - M.: Nauka, 1988. - 173 s.
6. Idel`chik I.E. Ae`roginodinamika texnologicheskix apparatov (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov) / I.E. Idel`chik. □ M.: Mashinostroenie, 1983. - 351 s.
7. Lojczyanskij L.G. Mexanika zhidkosti i gaza / L.G. Lojczyanskij. – M.: Nauka, 1978. – 735 s.
8. Osnovy` mexaniki sploshny`x sred / Nedopekin F.V., Kovalenko A.A., Sokolov V.I., Andrijchuk N.D., Gusenczova Ya.A. - Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalya, 2010. - 377 s.
9. Rejno`ds A.Dzh. Turbulentny`e techeniya v inzhenerny`x prilozheniyax Per. s angl./ A. Dzh. Rejno`ds. – M.: E`nergiya, 1979. – 408 s.
10. Sokolov V.I. Ae`roodinamika gazovy`x potokov slozhny`x ventilyacionny`x sistem/ V.I. Sokolov. – Lugansk: Izd-vo VNU im. V.Dalya, 1999. – 200 s.
11. Xince I.O. Turbulentnost`. Ee mexanizm i teoriya / I.O. Xince. - Moskva.: Gosudarstvennoe izdatel`stvo fiziko-matematicheskoy literatury`, 1963. - 680 s.
12. Batchelor G.K. The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge University Press, 1982. - 212 p.

TURBULENCE MODELS IN CALCULATIONS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF GAS FLOWS

Gusentsova¹ Ya., Krasnogradov² A., Rodygina³ M., Vysotskaya N.¹⁻³Lugansk Vladimir Dahl State UniversityE-mail: ¹gusentsova@gmail.com, ²krasnogradov@mail.ru, ³sunsara_06@mail.ru³V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 295492, Republik of Crimea, Simferopol.

E-mail: natali.v-v@mail.ru

Abstract. The review of the most common turbulence models in engineering calculations, which allow approximate description of turbulent flows using the Reynolds equations of motion, is carried out, and their areas of application are shown. To calculate turbulent flows by solving the Reynolds equations, a closure hypothesis is adopted for apparent turbulent stresses and other variables included in the equations.

It is noted that Businex is considered one of the main ones, which is confirmed by experimental studies of turbulence, which show that the turbulent flow is characterized by the presence of an energy cascade from large to smaller scales.

In addition, the authors considered: the semi-empirical Prandtl theory based on the assumption that turbulent motion consists of an infinite number of vortices of various scales that interact with each other and transfer energy from large scales to smaller ones, models specially adapted to a specific type of problem, for example, LES for modeling the interaction of turbulent flows, a generalized theory of developed turbulence (GDT, Generalized Theory of Turbulence), which is a theory, developed for the description and simulation of turbulent flows in various technical devices.

It is proved that one of the most common approaches is to use models with different levels of detail, starting with simpler models and moving on to more complex ones, if necessary to achieve the required accuracy. This approach is called the "ladder of models" or RANS/LES method.

Subject of research: turbulence models for calculating aerodynamic characteristics of gas flows.

Materials and methods: the basis of the performed research is a number of scientific works of domestic and foreign researchers in this field and the results obtained by the authors in the course of the work.

A systematic approach is used, meaning consideration and study of the object of research as an integrated system consisting of many interrelated elements.

Results: The authors note that one of the most common approaches is to use models with different levels of detail, starting with simpler models and moving on to more complex ones if necessary to achieve the required accuracy. This approach is called the "ladder of models" or RANS/LES method.

Conclusions: The choice of a turbulence model for specific cases depends on a number of factors, including flow characteristics, available data, accuracy requirements and computational capabilities. The selection criteria include: physical properties and flow mode; the degree of accuracy of calculations and calculation capabilities.

Key words: turbulence, turbulence model, fields of application, k-epsilon model, Besinesk model, "ladder of models".