

УДК 532.517.4: 621.1.016.4

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ, АЛГОРИТМОВ
И СЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ПРИ РАСЧЕТЕ
ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ
В КАВЕРНЕ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТОВ
ПРОГРАММ VP2/3 И FLUENT.
ЧАСТЬ 2. ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ***

С.А. ИСАЕВ¹, П.А. БАРАНОВ¹, Н.А. КУДРЯВЦЕВ¹, Д.А. ЛЫСЕНКО¹, А.Е. УСАЧОВ²

¹*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

²*ГНЦ ЦАГИ им.Н.Е. Жуковского, Москва*

На основе решения известной тестовой задачи о циркуляционном течении вязкой несжимаемой жидкости в квадратной каверне с подвижной границей проводится совместное тестирование специализированного (VP2/3) и универсального (FLUENT) пакетов прикладных программ гидродинамического и теплофизического профиля. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса решаются с помощью неявных факторизованных расчетных процедур. Дается детальная оценка адекватности выбранных одно-, двух-, четырехпараметрических полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности.

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МОДЕЛИ SA**

Для объяснения рассогласования величин интегрального параметра ψ_m , полученных с использованием традиционной и скорректированной версий модели SA в первой части статьи [1], целесообразно проанализировать локальные характеристики отрывного течения в каверне (рис. 1 и 2).

Сравнение самоорганизующихся в квадратной каверне крупномасштабных вихревых структур, рассчитанных на сетках различного типа с использованием традиционной и скорректированной модели SA, показывает существенное влияние на картину течения поправки на отличие модуля тензора скоростей деформации от модуля завихренности. Традиционная, используемая по умолчанию в пакете программ FLUENT, модель SA приводит к существенному занижению интенсивности циркуляционного движения и уменьшению размеров угловых вторичных вихрей (см. рис. 1, *b*). В то же время скорректированная версия SA позволяет во многом уточнить численные прогнозы, хотя и отмечается некоторое влияние на полученные результаты типа расчетной сетки. Последнее обстоятельство выражается в занижении расхода (примерно 10 %) возвратного потока в каверне на неструктурированной сетке и различиях в конфигурациях третичных отрывных зон.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 04-02-81005, 05-02-16184 и 05-01-00162).

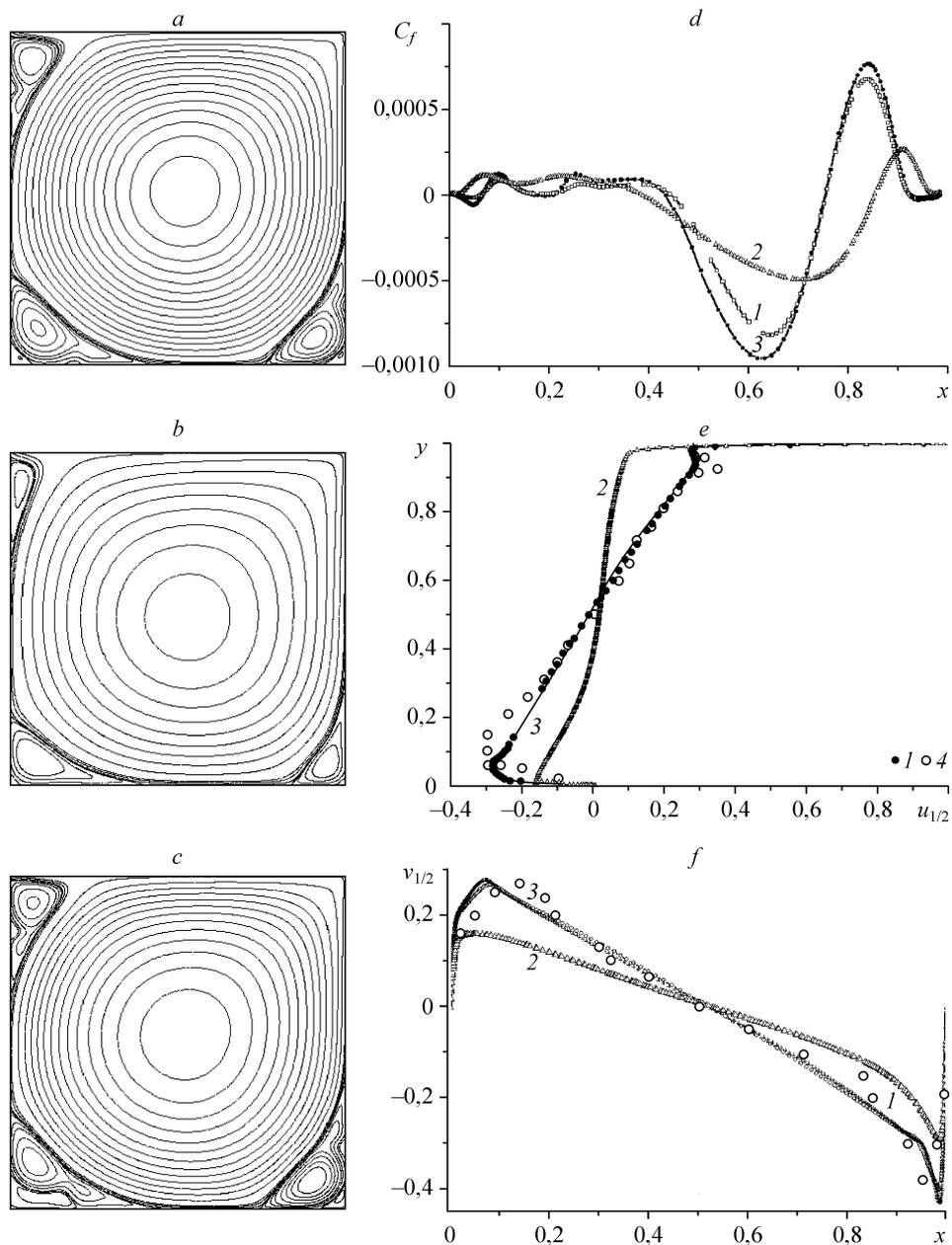


Рис. 1. Сравнение картин течения (а–с), распределений коэффициента трения по дну (d) и профилей составляющих скорости в срединных сечениях каверны (e, f), рассчитанных на структурированной (а, с, 1, 3) и неструктурированной (b, 2) сетках.

1, 2 — FLUENT(b, c); 3 — VP2/3(a); 4 — эксперимент [3]; 1, 3 — скорректированная версия SA; 2 — традиционная версия SA. Здесь и далее на рисунках в качестве линий тока наносятся изолинии, соответствующие значениям $\psi = -0,12; -0,115; -0,11; -0,105; -0,1; -0,095; -0,09; -0,085; -0,08; -0,075; -0,07; -0,065; -0,06; -0,055; -0,05; -0,045; -0,04; -0,035; -0,03; -0,025; -0,02; -0,015; -0,01; -0,005; -0,001; -0,0005; -0,0001; 0; 0,0001; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005$.

Падение интенсивности возвратно-циркуляционного течения при использовании обычной версии SA также обуславливает уменьшение трения на дне каверны (см. рис. 1, d) и полуторное снижение экстремальных значений составляющих скорости в срединных сечениях (см. рис. 1, e, f). Сравнение расчетных профилей составляющих

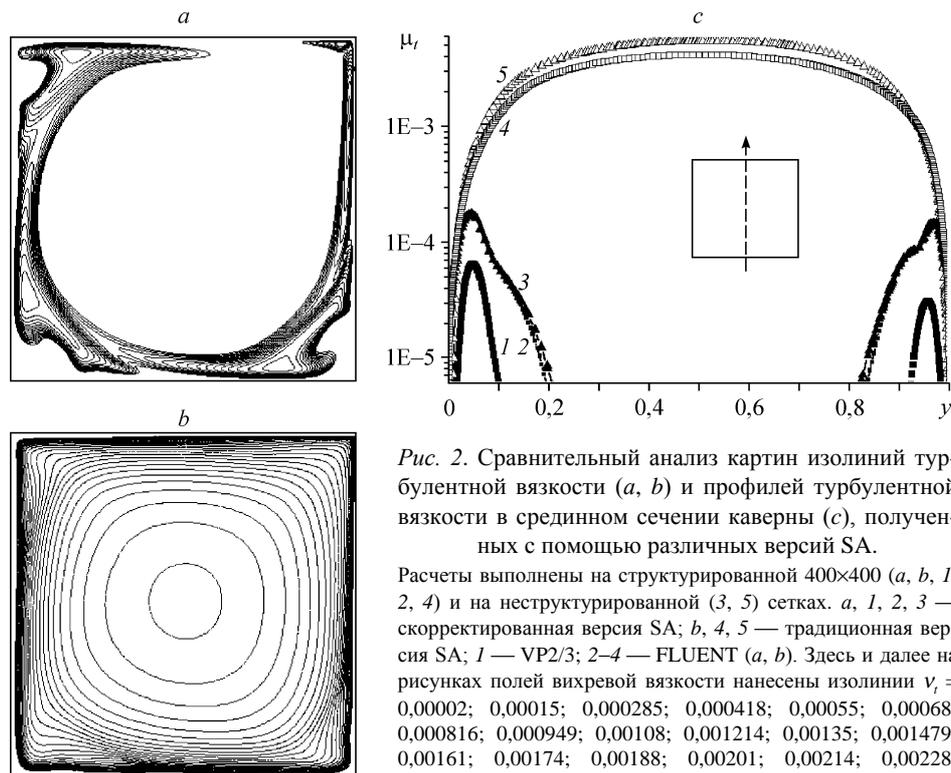


Рис. 2. Сравнительный анализ картин изолиний турбулентной вязкости (*a*, *b*) и профилей турбулентной вязкости в срединном сечении каверны (*c*), полученных с помощью различных версий SA.

Расчеты выполнены на структурированной 400×400 (*a*, *b*, 1, 2, 4) и неструктурированной (3, 5) сетках. *a*, 1, 2, 3 — скорректированная версия SA; *b*, 4, 5 — традиционная версия SA; 1 — VP2/3; 2–4 — FLUENT (*a*, *b*). Здесь и далее на рисунках полей вихревой вязкости нанесены изолинии $\nu_t = 0,00002; 0,00015; 0,000285; 0,000418; 0,00055; 0,00068; 0,000816; 0,000949; 0,00108; 0,001214; 0,00135; 0,001479; 0,00161; 0,00174; 0,00188; 0,00201; 0,00214; 0,00228; 0,002408; 0,00254; 0,00267; 0,00281; 0,00294; 0,00307; 0,0032; 0,00334; 0,00347; 0,0036; 0,003735; 0,00387; 0,004$ (31 линия по логарифмической шкале от 0,0005 до 0,004).

скорости с экспериментальным аналогом показывает их весьма близкое согласование в случае скорректированной версии SA, причем профили для различных типов сетки практически совпадают.

Падение интенсивности отрывного течения в каверне при выборе стандартной версии модели SA легко объясняется поведением турбулентной вязкости (см. рис. 2). Куполообразное распределение μ_t в первичном крупномасштабном вихре демонстрирует накачку в нем вихревой вязкости (до величин порядка $5 \cdot 10^{-3}$), что и предопределяет тормозящее влияние вязкости на возвратное течение. Аналогичное поведение μ_t отмечалось в проведенном методическом исследовании [2] при использовании стандартной k - ϵ -модели. Такой характер распределения вихревой вязкости представляется ошибочным, поскольку ядро первичного вихря в каверне должно оставаться эффективно невязким. Действительно, введение поправок на кривизну линий тока в [2] “съедает” ложный купол и μ_t генерируется исключительно в пристеночных сдвиговых и пограничных слоях. Именно такое поведение демонстрируется на рис. 2, *a–c* при введении коррекции в модель SA и использовании различных структурированных и треугольной сеток. Следует подчеркнуть, что ядро циркуляционного течения в каверне оказывается невязким. Представленные результаты показывают близость распределений вихревой вязкости, рассчитанных с помощью пакетов VP2/3 и FLUENT и их независимость от типа сетки. Можно заключить, что коррекция модели SA аналогична введению поправки на кривизну линий тока в выражение для определения турбулентной вязкости.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МОДЕЛИ МЕНТЕРА

На рис. 3 и 4 представлены распределения локальных характеристик, аналогичные приведенным на рис. 1, 2. Картины отрывного течения в квадратной камере (см. рис. 3, *a-c*) демонстрируют, что конфигурации первичного, вторичных и третичных вихрей, рассчитанных на различных сетках и с помощью разных пакетов, очень близки. Определенные на основе FLUENT распределения C_f по дну и профили

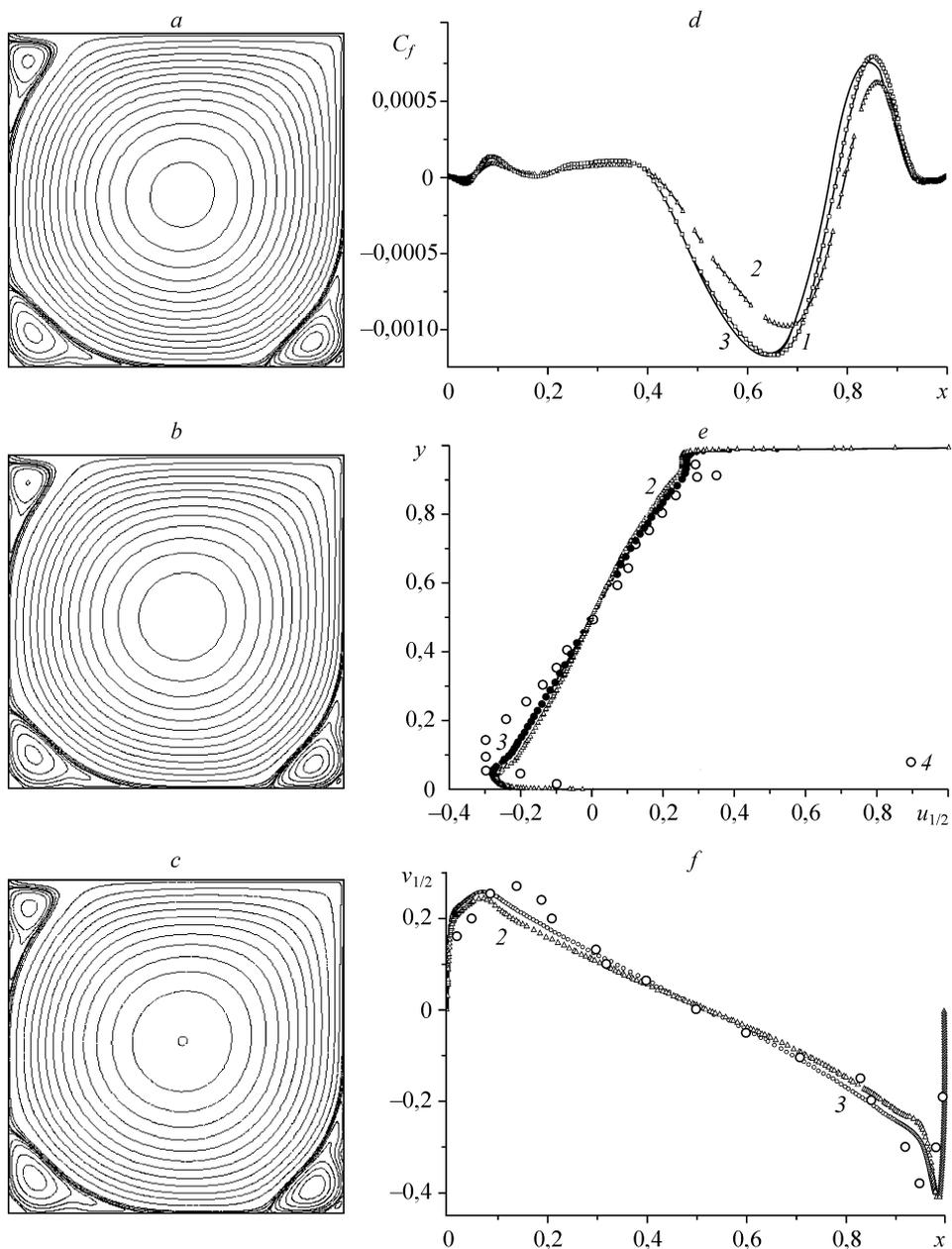


Рис. 3. Сопоставление картин отрывного течения (*a-c*), распределений коэффициента трения по дну (*d*) и профилей составляющих скорости в срединных сечениях камеры (*e, f*), рассчитанных на структурированной (*a, c, 1, 3*) и неструктурированной (*b, 2*) сетках с использованием модели Ментера.

1, 2 — FLUENT (*b, c*), 3 — VP2/3 (*a*), 4 — эксперимент [3].

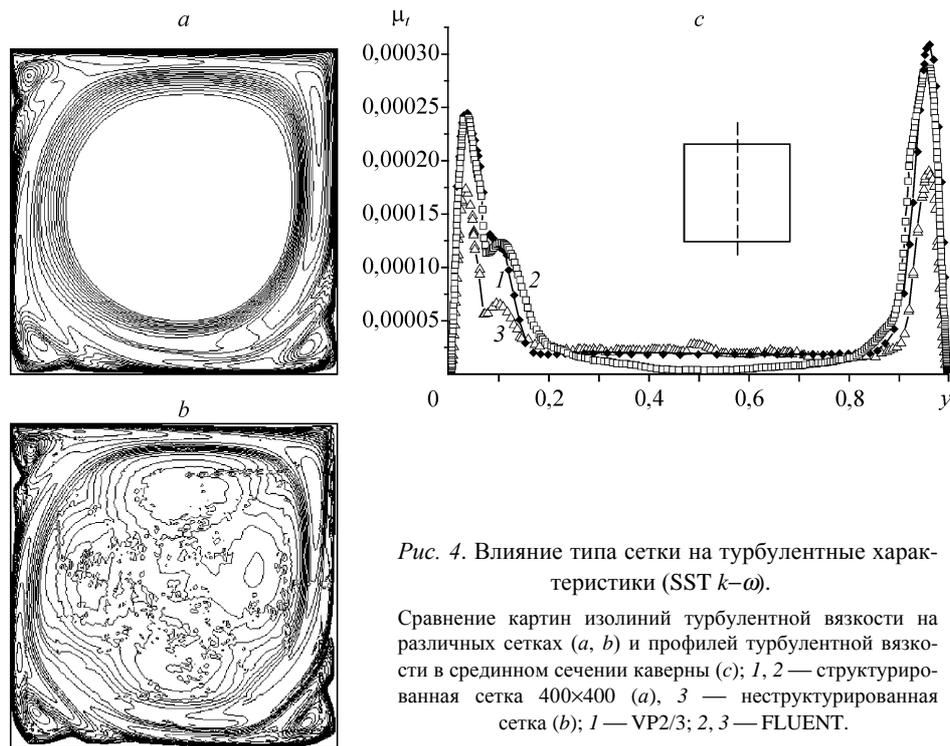


Рис. 4. Влияние типа сетки на турбулентные характеристики (SST $k-\omega$).

Сравнение картин изолиний турбулентной вязкости на различных сетках (a , b) и профилей турбулентной вязкости в срединном сечении каверны (c); 1, 2 — структурированная сетка 400×400 (a), 3 — неструктурированная сетка (b); 1 — VP2/3; 2, 3 — FLUENT.

составляющих скорости в срединных сечениях практически совпадают и не слишком отличаются от прогнозов, полученных на структурированной сетке с использованием VP2/3 (см. рис. 3, $d-f$). При этом расчетные профили $u_{1/2}(y)$ хорошо согласуются с экспериментальным аналогом [3]. Все это свидетельствует в пользу тестируемой модели переноса сдвиговых напряжений.

Анализ полей и распределений турбулентной вязкости в целом подтверждает сделанный вывод. Так, профили $\mu_{t1/2}(y)$, посчитанные на сетках различного типа с помощью VP2/3 и FLUENT (см. рис. 4, c), удовлетворительно согласуются между собой. В то же время поля турбулентной вязкости, определенные на структурированной (a) и треугольной (b) сетках, несмотря на хорошее, в целом, согласование в пристеночных зонах, существенно отличаются по своему поведению в ядре первичного вихря. В принципе ядро вихря должно быть практически невязким, и на структурированной сетке в нем поле μ_t однородное, с фоновым фиксированным значением. В расчетах по FLUENT на неструктурированной сетке в ядре отмечаются локальные осцилляции μ_t , своеобразные “брызги”, являющиеся следствием выбранной сеточной структуры. Этот интересный факт безусловно должен привлечь внимание к качеству прогнозирования сложных течений на весьма популярных в расчетной практике неструктурированных сетках. Еще раз подтверждается известный в вычислительной гидродинамике (CFD) вывод о принципиальном влиянии выбранной топологии сетки на решение задачи. Однако если анализировать интегральные и локальные параметры потока, то, конечно, проведенные расчеты демонстрируют не слишком сильную зависимость полученных результатов от типа сетки.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

На рис. 5–8 представлены некоторые результаты численных прогнозов, полученные на основе выбранных моделей турбулентности. Следует отметить, что из всех данных, рассчитанных с помощью моделей SA (с коррекцией) и Ментера,

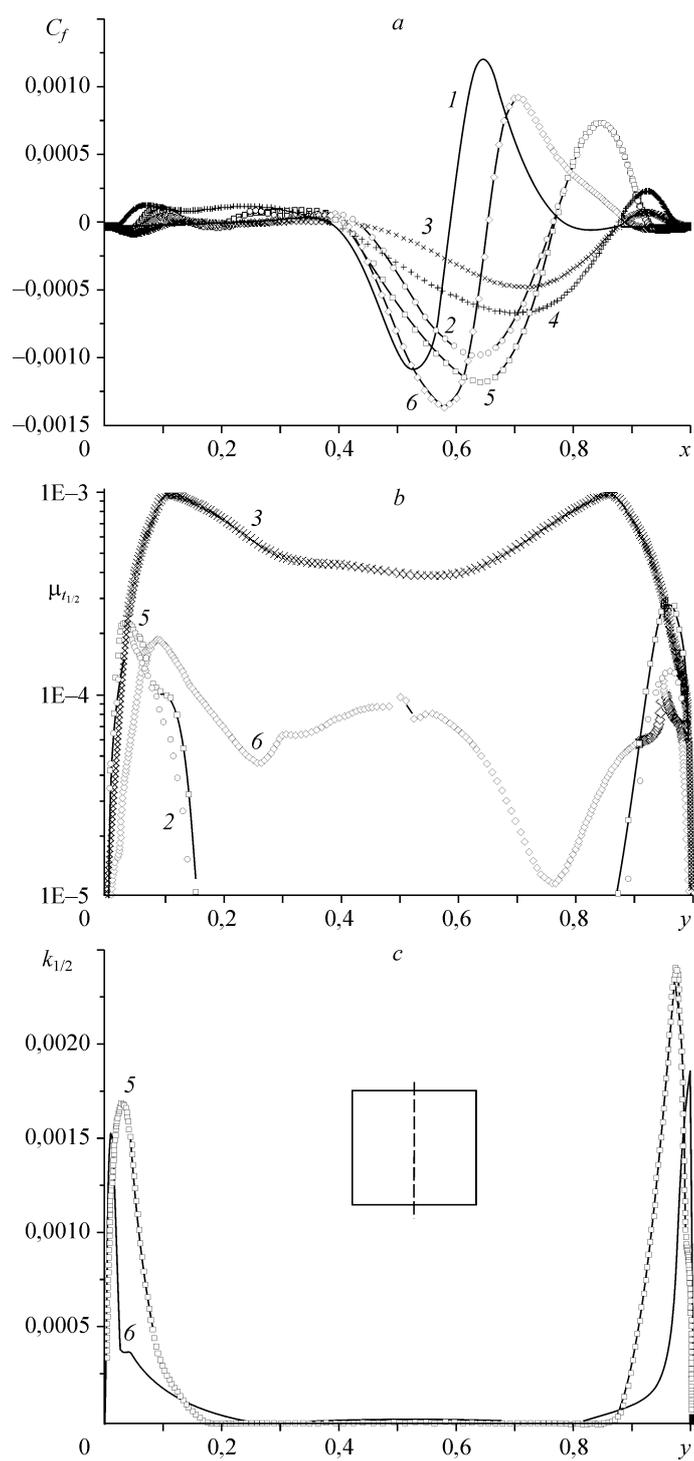


Рис. 5. Сравнительный анализ моделей турбулентности по распределениям коэффициента трения на дне каверны (а), профилям турбулентной вязкости (b) и энергии турбулентности (с) в срединном сечении каверны.

1 — ламинарный режим, модели: 2 — SA на структурированной сетке, 3 — RNG $k-\epsilon$, 4 — Realizable $k-\epsilon$, 5 — SST $k-\omega$ на структурированной сетке; 6 — V2F.

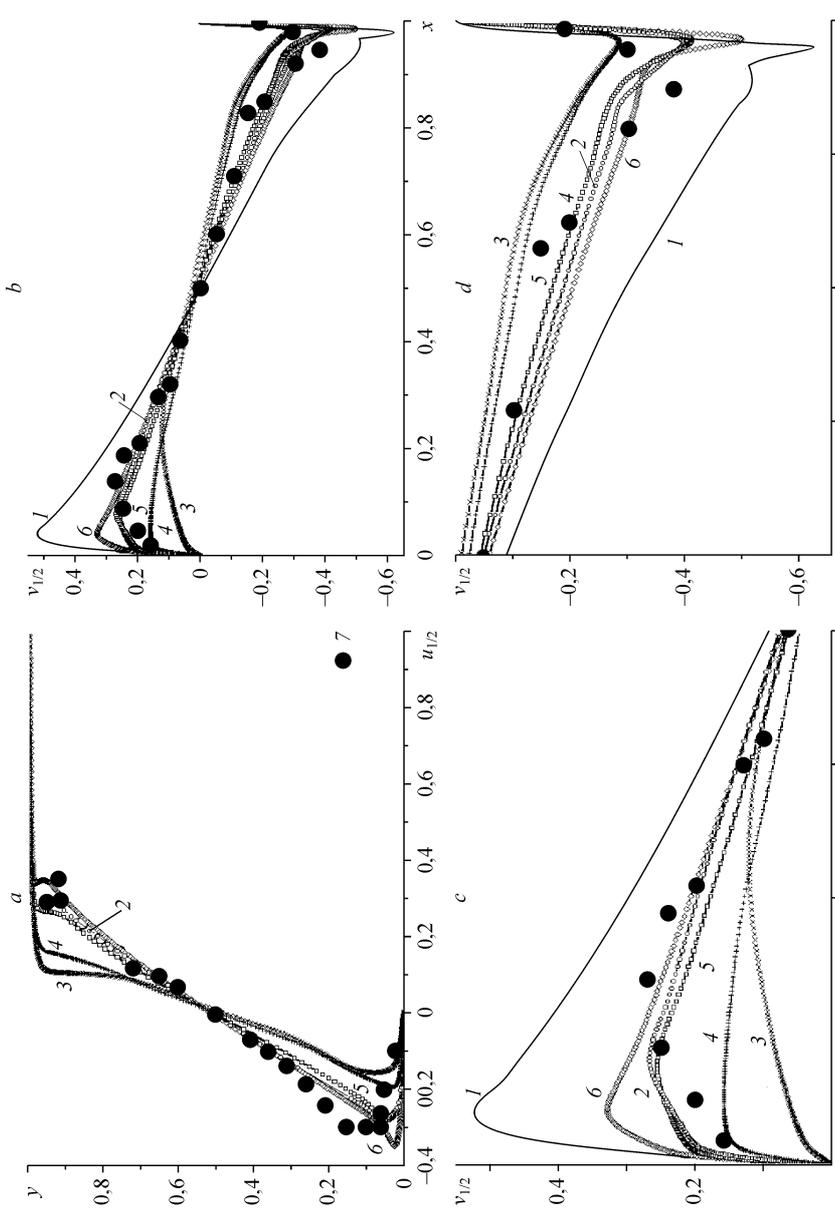


Рис. 6. Сравнительный анализ моделей по профилям продольной (а) и вертикальной (б-д) составляющих скорости в средних сечениях каверны. 1 — ламинарный режим, модели: 2 — SA на структурированной сетке; 3 — RNG $k-\epsilon$; 4 — Realizable $k-\epsilon$; 5 — SST $k-\omega$ на структурированной сетке; 6 — V2F; 7 — эксперимент [3].

для сравнительного анализа привлекаются поля характеристик, определяемые только на структурированной сетке с помощью пакета VP2/3. В то же время данные по другим моделям получаются на основе пакета FLUENT.

Как и при рассмотрении табл. 1 в первой части работы [1], на основе анализа профилей коэффициента трения C_f на дне каверны (см. рис. 5, а) все модели можно распределить на три группы. В первую входят модели типа $k-\epsilon$ и для них характерно более чем двукратное отличие по максимальным величинам от второй группы, в которую входят скорректированная модель SA и модель Ментера. Особенно сильное различие профилей $C_f(x)$ имеет место в правом нижнем углу каверны, где модели типа $k-\epsilon$ прогнозируют очень слабые вторичные отрывные зоны. Результаты расчетов по модели V2F, как отмечалось ранее, стоят несколько особ-

няком от второй группы и очень близки по характеру к профилю $C_f(x)$ для ламинарного режима течения. Расслоение результатов в определенной степени объясняется распределениями турбулентной вязкости в срединном сечении каверны (см. рис. 5, *b*). Модели типа $k-\varepsilon$ резко завышают вихревую вязкость в зоне первичного вихря, аналогично тому, как это было выявлено при расчете течения с помощью стандартной модели SA. Вызывают интерес распределения турбулентных характеристик в срединном сечении (см. рис. 5, *b, c*), определенные на основе считающейся весьма перспективной четырехпараметрической модели V2F. Как видно, зависимость $\mu_{t1/2}(y)$ для этой модели не отвечает ожидаемому поведению турбулентной вязкости в вихре. При использовании модели V2F прогнозируемые пограничные слои также получаются весьма тонкими и существенно отличаются от рассчитанных в рамках модели Ментера. Полученные результаты не свидетельствуют в пользу совершенства модели V2F и, по меньшей мере, говорят о целесообразности продолжения ее углубленного тестирования.

Выполненное группирование рассмотренных полуэмпирических моделей подтверждается также анализом профилей декартовых составляющих скорости в срединных сечениях каверны (см. рис. 6). Заниженная интенсивность отрывного течения, прогнозируемая моделями типа $k-\varepsilon$ без их коррекции на влияние кривизны линий тока или закрутку потока, иллюстрируется сильным отклонением профилей $u_{1/2}(y)$ и $v_{1/2}(x)$ от рассчитанных с помощью других моделей и от экспериментальных данных. Особенно значительным представляется рассогласование для модели RNG $k-\varepsilon$. В то же время, как отмечалось ранее, модели второй группы, содержащей SA и SST $k-\omega$, дают вполне удовлетворительные, а главное, коррелируемые между собой прогнозы, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными [3]. Рассчитанные по модели V2F профили $u_{1/2}(y)$ и $v_{1/2}(x)$, также как и $C_f(x)$ на дне каверны, имеют тенденцию сближения с профилями для ламинарного течения, хотя, конечно, являются менее наполненными, чем последние. Согласование их с экспериментальными профилями гораздо хуже, чем у профилей второй группы, особенно по толщинам пограничного слоя. Следовательно, из рассмотренных только модели SA (с коррекцией) и SST $k-\omega$ способны адекватно прогнозировать характеристики отрывного течения при умеренных числах Рейнольдса.

На рис. 7 и 8 приведен сравнительный анализ картин вихревого течения и профилей турбулентной вязкости, полученный для различных моделей турбулентности. Как видно на рис. 7, все модели удовлетворительно предсказывают влияние турбулизации течения в каверне на структуру крупномасштабных вихрей. Генерирование вихревой вязкости при турбулизации почти “съедает” третичные угловые вихри (см. рис. 7, *a*) и приводит к уменьшению интенсивности первичного и угловых вторичных вихрей. При этом в структуре отрывного течения даже при использовании моделей типа $k-\varepsilon$ сохраняется вторичный вихрь в левом верхнем углу каверны. Однако конфигурация и размеры вихрей в зависимости от выбора модели турбулентности оказываются различными. Для моделей с низким уровнем турбулентной вязкости, к которым принадлежат модели SA (с коррекцией) и SST $k-\omega$, прогнозируемые вихри оказываются более развитыми, чем при использовании других тестируемых моделей. Интересно отметить, что правый угловой вихрь, который в ламинарном режиме течения является наиболее крупным из вторичных вихрей, претерпевает самые сильные изменения при турбулентном режиме. В то же время левый угловой вихрь испытывает гораздо меньшие трансформации.

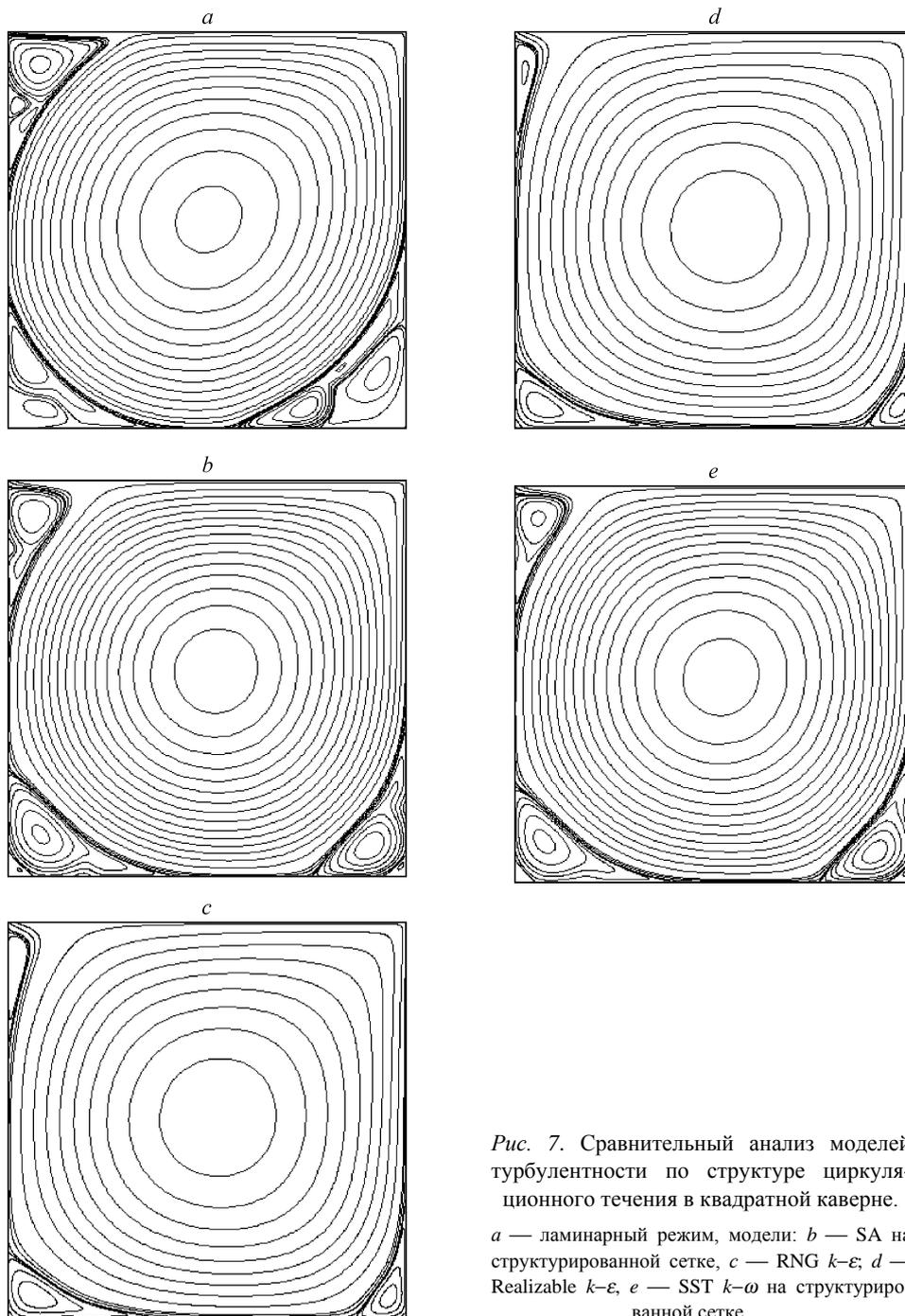


Рис. 7. Сравнительный анализ моделей турбулентности по структуре циркуляционного течения в квадратной камере.

a — ламинарный режим, модели: *b* — SA на структурированной сетке, *c* — RNG $k-\varepsilon$; *d* — Realizable $k-\varepsilon$, *e* — SST $k-\omega$ на структурированной сетке.

Как отмечалось ранее, прогнозирование замедленного отрывного течения при использовании моделей типа $k-\varepsilon$ справедливо связывается с предсказанием полей турбулентных характеристик и, в частности, турбулентной вязкости. На рис. 8 этот вывод иллюстрируется картинками изолиний турбулентной вязкости μ_t , из которых следует нефизичное поведение вихревой вязкости в ядре циркуляционного

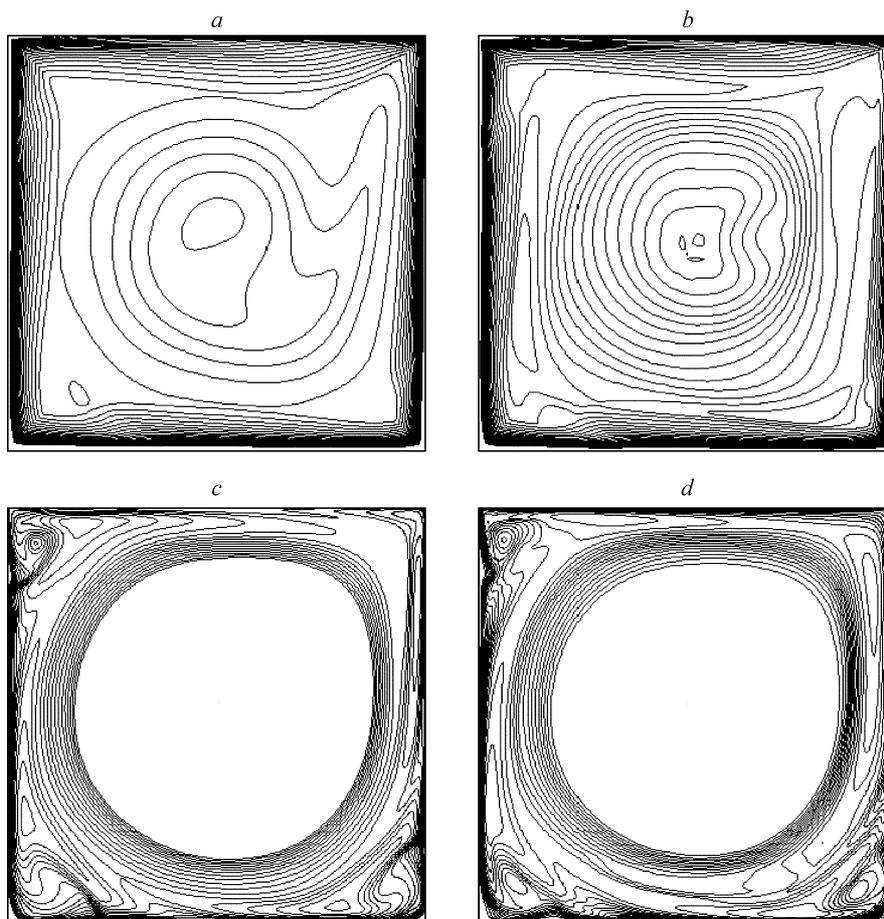


Рис. 8. Сравнительный анализ моделей по картинам изолиний турбулентной вязкости.
 Модели: *a* — RNG $k-\varepsilon$, *b* — Realizable $k-\varepsilon$, *c* — SA, *d* — SST $k-\omega$.

течения. Недостаток, свойственный стандартной модели $k-\varepsilon$ [1], оказался неустраненным и в новых ее модификациях. Это свидетельствует о неприемлемости любых $k-\varepsilon$ -моделей для расчета отрывных течений без модификаций, учитывающих влияние кривизны линий тока на турбулентные характеристики.

Модели SA (с коррекцией) и SST $k-\omega$, напротив, довольно точно улавливают структуру вихревого течения, предсказывая эффективно вязкое ядро и окружающий его вихревой турбулентный пристеночный слой. В принципе, как и в ламинарном режиме, подтверждается известная гипотеза Дж. Бетчелора [4], хотя угловые вихри, обусловленные прямоугольной формой области, конечно, не исчезнут даже в пределе при $Re \rightarrow \infty$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численный анализ турбулентного течения в квадратной камере с подвижной границей, проведенный с помощью пакетов VP2/3 и FLUENT на основе широкого спектра полуэмпирических моделей и сеток различной топологии, показал:

1. Модели типа $k-\varepsilon$ (версии RNG и Realizable) без поправок на кривизну линий тока существенно занижают интенсивность отрывного течения из-за прогнозирования ложного поля вихревой вязкости (с накачкой турбулентной вязкости в ядре первичного вихря);

2. Традиционная, используемая по умолчанию в пакете FLUENT, модель Спаларта — Аллмареса, приводит к результатам, аналогичным применению моделей типа $k-\varepsilon$, что делает ее неприменимой для расчета отрывных течений;

3. Скорректированная модель SA по численным прогнозам параметров осредненного течения практически эквивалентна модели переноса сдвиговых напряжений (SST $k-\omega$) Ментера;

4. Прогнозы по моделям SA (с коррекцией) и SST $k-\omega$ хорошо согласуются с экспериментальными данными по профилям декартовых составляющих скорости в срединных сечениях каверны, что свидетельствует о приемлемости их для расчетов отрывных турбулентных течений;

5. Предсказания по четырехпараметрической модели Дурбина V2F обнаруживают завышение интенсивности циркуляционного течения и занижение толщин пограничного слоя, что показывает неудовлетворительное применение указанной модели;

6. Расчеты с использованием структурированных и комбинированных прямоугольно-треугольных сеток продемонстрировали слабую зависимость параметров потока от типа сеток и их некоторое влияние на характеристики турбулентности;

7. Вполне удовлетворительное согласование численных прогнозов с помощью пакетов различного профиля (специализированного VP2/3 и универсального FLUENT) на различных сетках, а также с использованием моделей SA (с коррекцией) и SST $k-\omega$ иллюстрирует их приемлемость для расчета отрывных течений.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

L — длина стороны квадратной области, м,	ε — скорость диссипации турбулентной энергии, в долях U^3/L ,
x, y — горизонтальная и вертикальная координаты, м,	ω — удельная скорость диссипации турбулентной энергии, в долях U/L ,
ρ, μ, U — плотность, кг/м^3 , вязкость, Па·с и скорость движения границы, м/с,	Re — число Рейнольдса, $Re = \rho UL/\mu$,
C_f — коэффициент трения, безразмерный по скоростному напору, в долях $\rho U^2/2$,	ψ — функция тока, в долях UL .
u, v — декартовые составляющие скорости, соответствующие x, y , в долях U ,	Индексы нижние:
k — энергия турбулентных пульсаций, в долях U^2 ,	$1/2$ — параметры в срединном сечении каверны,
	t — турбулентные параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Л.А., Усачов А.Е. Комплексный анализ моделей турбулентности, алгоритмов и сеточных структур при расчете циркуляционного течения в каверне с помощью пакетов программ VP2/3 и Fluent. Часть 1. Влияние схемных факторов // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 4. — С. 587–608.
2. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. — Л.: Судостроение, 1989. — 256 с.
3. Методы расчета турбулентных течений / Под ред. В. Колльмана. — М.: Мир, 1984. — 464 с.
4. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки / Под ред. А.В. Ермашина и С.А. Исаева. — М., 2003. — 360 с.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2005 г.