УДК 532.517.4

КРУГОВАЯ ОБДУВКА ПРОФИЛЯ NACA0012 ПРИ RE=40000: ПАРАДОКСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ АЭРОДИНАМИКЕ

Исаев С.А.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№11-01-00039 и 12-08-90001) и ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» №14.740.11.0880.

АННОТАЦИЯ

Показано, что парадоксальное отличие численных прогнозов интегральных характеристик профиля NACA0012 при круговой обдувке в турбулентном режиме обтекания от экспериментальных оценок, послужившее выводом о неприемлемости подхода Рейнольдса для расчета нестационарных отрывных течений, на самом деле обусловлено различием двумерной и пространственной моделей обтекания. Параметрические расчеты нестационарного обтекания профиля при фиксированном числе Рейнольдса 40000 выполнены на нескольких многоблочных пересекающихся сетках разного масштаба и густоты, охватывающих расчетные области различной протяженности, в том числе содержащих весь дальний след. Сравниваются решения, полученные с помощью моделей переноса сдвиговых напряжений Ментера и вихревой вязкости Спаларта-Аллмареса, а том числе модифицированных с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подхода Смирнова-Ментера.

ВВЕДЕНИЕ

Известно существенное количественное отличие численных решений двумерных нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), замкнутых с помощью полуэмпирических моделей турбулентности, от теоретико-экспериментальных оценок осредненных интегральных характеристик профиля NACA0012 при круговой обдувке, приведенных в [1,2]. Оно послужило основанием для вывода в [3] о неприемлемости подхода Рейнольдса к моделированию нестационарных отрывных течений и введения альтернативного подхода на базе модели отсоединенных вихрей. Парадокс заключается в том, что двумерный подход URANS оказался вполне приемлемым для расчета нестационарного обтекания кругового цилиндра в до- и закритических режимах обтекания [4-7]. Чтобы разрешить его, в данной работе проводятся аккуратные, детальные расчеты на различных сетках с использованием многоблочных вычислительных технологий [8,9] нестационарных отрывных течений около профиля NACA0012 при фиксированном числе Рейнольдса 40000 и делается сравнение результатов, полученных с использованием разных полуэмпирических моделей, с вышеуказанными экспериментальными оценками. Однако главное, что физический эксперимент [10] фактически подверждает искомое, а именно: применимость двумерного подхода к описанию турбулентных отрывных течений.

ОБЪЕКТ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Профиль NACA0012 является классическим симметричным профилем с аналитическим заданием координат в точках на верхней и нижней дужках [11] в связанной системе (xo,yo), начало которой привязано к середине хорды профиля, а xo отсчитывается вдоль хорды по

направлению от носика к задней кромке. Длина хорды L выбирается в качестве масштаба обезразмеривания.

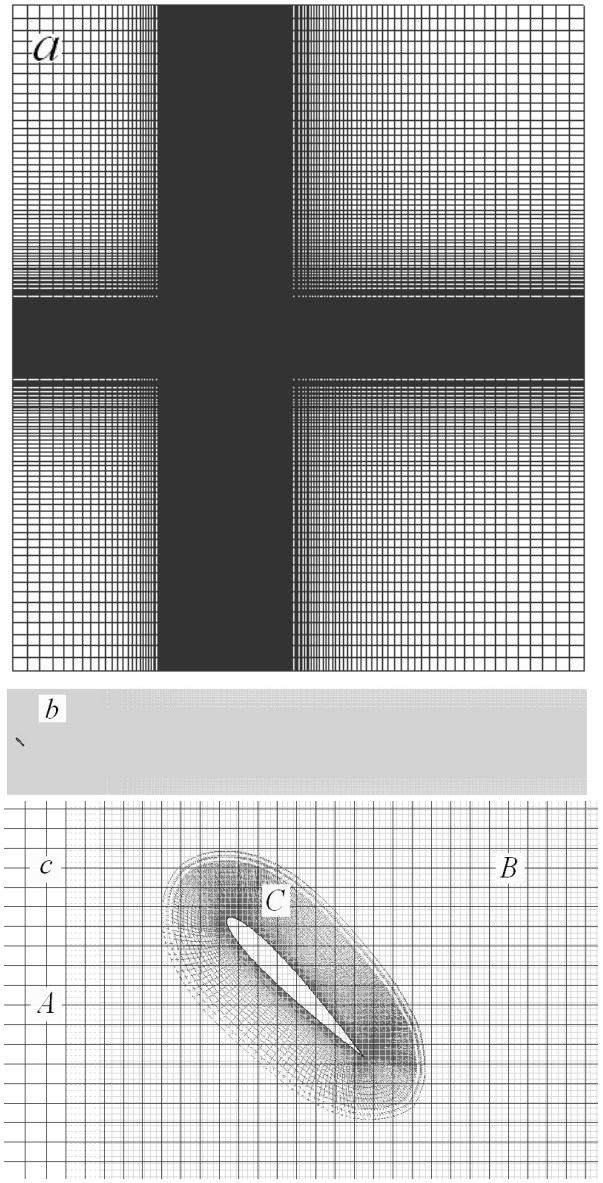


Рис.1 Фрагменты многоблочной сетки: внешняя декартовая A (a), внутренняя декартовая B для отображения дальнего следа (b) и наложение декартовых сеток A,B и цилиндрической сетки C в ареале профиля под углом атаки 45°.

Решение задачи производится в поточной системе координат (x,y), также имеющей начало в середине хорды, а ось x ориентирована по направлению невозмущенного потока. Наклон профиля по отношению к вектору скорости невозмущенного потока U задается углом атаки α. Задача обтекания несжимаемой вязкой жидкостью профиля NACA0012 обычно решается в прямоугольной расчетной области, границы которой располагаются довольно далеко от профиля, причем входная граница перпендикулярна скорости U. В начальный момент времени считается, что профиль, движущийся со скоростью U, внезапно тормозится и в дальнейшем происходит процесс постадийного формирования режима его обтекания в зависимости от числа Рейнольдса, определенного по U, L и кинематической вязкости среды (см., например, [8]).

В отличие от использования для решения задачи моноблочных или неструктурированных сеток, как, например, в [3], в данной работе развивается альтернативный подход на основе многоблочных сеток, объединяющих вводимые априори разнообразные по типу и масштабу структурированные сетки простой топологии (близкие к ортогональным), накладываемые друг на друга с пересечением. Каждая из сеток нацелена на отображение соответствующего элемента гидродинамической структуры обтекания профиля. Так, на рисунке 1 внешняя декартовая сетка A согласовывается с границами расчетной области, расположенными достаточно далеко (на несколько сотен хорд) от профиля (его даже не видно на картинке a). Нестационарный дальний след за профилем аккуратно воспроизводится на внутренней декартовой сетке B (на картине b можно рассмотреть профиль). Весьма подробная цилиндрическая сетка, согласованная с омываемой поверхностью профиля, заточена на отображение сравнительно тонких пограничных и сдвиговых слоев. Наложение этой криволинейной сетки C на декартовые сетки A и B разной густоты показано на рисунке 1,c.

Важным методическим шагом исследования представляется сравнительный анализ результатов, полученных с использованием полуэмпирических моделей турбулентности различного типа (одно- и двухпараметрических). Кроме того, помимо ставшей популярной стандартной версии модели переноса сдвиговых напряжений Ментера применяется ее модификация, учитывающая влияние кривизны линий тока на характеристики турбулентности в рамках подхода Смирнова-Ментера [12]. Следует подчеркнуть необходимость такого комплексного подхода к моделированию нестационар-

ного обтекания профиля, нацеленность его на отображение дальнего вихревого следа.

Большое методологическое значение имеет сохранение в расчетной области разгонного вихря, особенно интенсивного при больших углах атаки. Именно это обстоятельство предопределило выбор значительных размеров расчетной области. Таким образом время решения задачи подбирается так, чтобы весь вихревой след располагался внутри сетки А.

Фиксирование числа Рейнольдса в расчетах не связано с методическими ограничениями, а также с экономий затрачиваемых вычислительных ресурсов. В значительной мере, оно обусловлено необходимостью тщательной обработки огромного объема информации по нестационарным процессам обтекания профиля. Хотя нельзя не отметить, что для числа Рейнольдса 4×10^4 существенно снижают требования к выбору величины пристеночного шага.

Как уже указывалось, обработка результатов расчета нестационарных характеристик течения представляет особую проблему, причем она связана не только со значительными массивами данных. В данной работе продолжается развитие подхода, ранее использованного в работах [5-7] и связанного с выходом на периодический режим изменения характеристик обтекания профиля (ранее это был цилиндр). Обычно расчеты нестационарных течений приводят к хаотическим колебательным процессам, обработка которых проводится статическими методами. Здесь мы получаем изменение характеристик на периоде колебаний интегрального параметра, например, подъемной силы. Понятно, что осреднение процесса происходит по этому периоду и одновременно изучение поведения решения на этом временном отрезке позволяет детально проанализировать нестационарный режим течения с акцентом на динамику вихревых структур.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МЕТОД И ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ

Задача турбулентного нестационарного обтекания несжимаемой вязкой жидкостью профиля под углом атаки решается в расчетной прямоугольной области с фиксированными входными условиями.

Продольная компонента скорости u=1, а вертикальная v=0, степень турбулентности 1% (как в рабочей части аэродинамической трубы), масштаб турбулентности 1.В качестве масштабов обезразмеривания заданы скорость потока на входе U и размер хорды L. На выходных проточных границах задаются условия продолжения решения. Условие прилипания ставится на омываемой поверхности профиля. Расчет характеристик турбулентности у стенки проводится аналогично методологии [9].

Решение нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) проводится в рамках метода коррекции давления, основанного на концепции расщепления по физическим процессам и связанного с заменой уравнения неразрывности на уравнение для поправки давления.

Нестационарный подход Рейнольдса к описанию турбулентности позволяет, как и в стационарном случае, перейти к осредненному течению и описывающих корреляции составляющих пульсаций скорости полям вводимых турбулентных характеристи.

Однако в этом случае осредненное течение может изменяться во времени. Как уже отмечалось, ищется периодическое решение задачи с циклическим изменением интегральных характеристик, в частности, действующей на профиль подъемной силы.

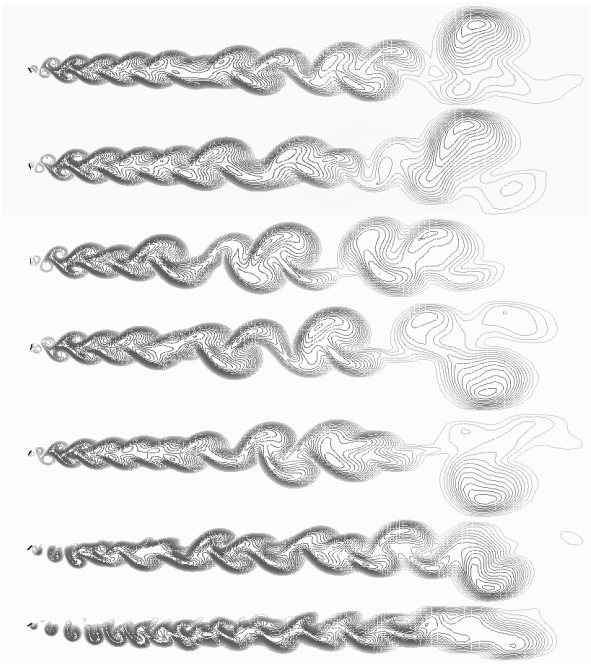
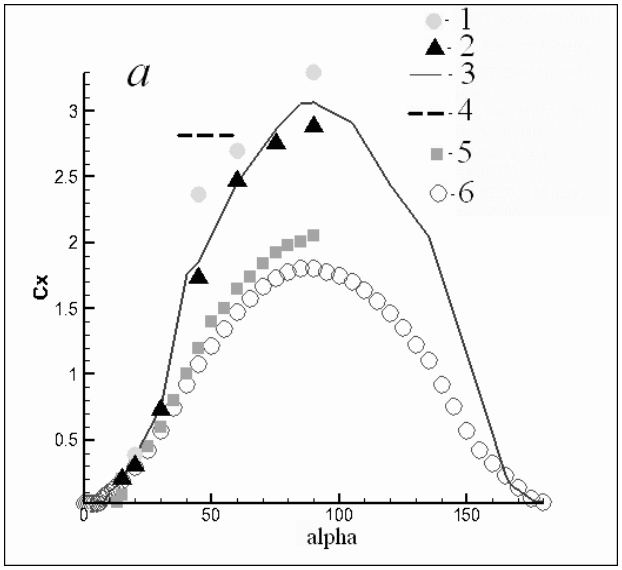


Рис.2 Сравнение картин вихревой вязкости, полученных в момент t=100 при обтекании профиля NACA0012 для углов атаки, изменяющихся в диапазоне от 60° до 150° с шагом 15°. Расчеты получены с помощью MSST.



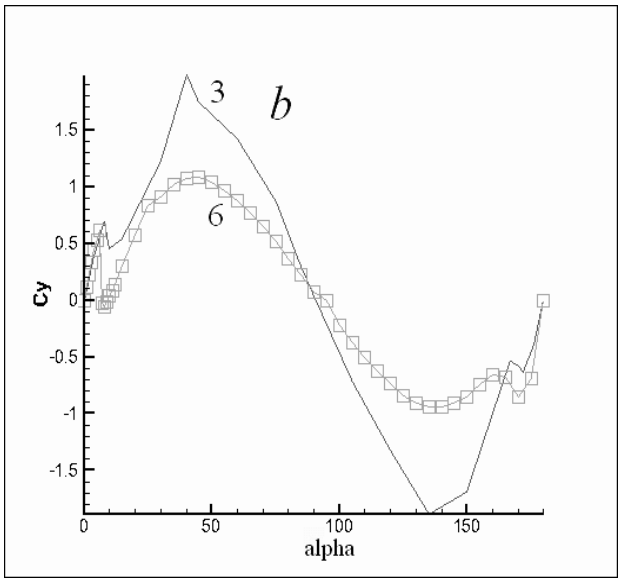


Рис.3 Сравнение рассчитанных (1,2,3), измеренных (4) и оцененных (5,6) Cx (a) и Cy (b). 1 (MSST), 2 (SA) – [3]; 3 – данный расчет; 4 – [10]; 5 – [1]; 6 – [2].

Подобно [8,9], обобщенное уравнение переноса записывается в приращениях зависимых переменных, причем явная часть дискретизируется по схемах высокого (не ниже второго) порядка аппроксимации (противопоточная схема с квадратичной интерполяцией Леонарда для конвективных членов уравнений количества движения, схема TVD для конвективных членов уравнений характеристик турбулентности и центральноразностная схема для диффузионных членов), а неявная часть представляется с помощью противопоточной схемы с односторонними разностями.

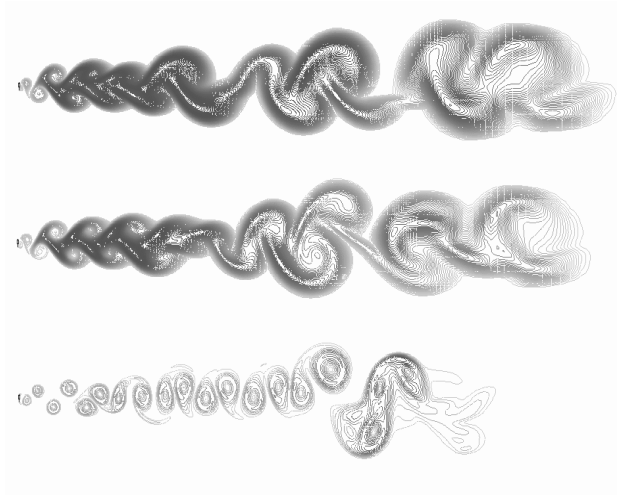


Рис.4 Сравнение картин вихревой вязкости, полученных с помощью стандартной и модифицированной MSST, а также SA (сверху вниз) в момент t=100 для α=90°.

Нестационарный член записывается в источниковый член и решение на каждом временном шаге находится глобальными итерациями. Использование центрированных сеток с размещением зависимых переменных в центрах расчетных ячеек приводит к необходимости монотонизации поля давления за счет введения корреции Рхи-Чоу с специально подобранным из тестов ([8,9]) сомножителем, равным 0.1. Расчеты проводятся на многоблочных сетках (см., например, рисунок 1). Внешняя сетка построена в области размером 300×200 с центром координатной системы, удаленным от входной границы на 100 хорд. Ячейки сгущаются по мере приближения в зоне расположения профиля. Минимальные шаги внешней сетки равны 0.1. Количество узлов сетки 672×201. Внутренняя сетка близка к равномерной с шагом 0.03 по обеим координатам, содержит 633×164 ячейки и охватывает пространство протяженностью порядка 60 хорд. Цилиндрическая сетка согласовывается с профилем. Шаг сетки в носике - 0.001, шаг у задней кромки – 0.001 (радиус скругления задней кромки – 0.002). Шаг в районе спинки – 0.01. Пристеночный шаг - 8×10^{-5}. Сетка содержит 329×62 ячейки. Временной шаг выбирается равным 0.01.

ТЕСТИРОВАНИЕ. ВЕРИФИКАЦИЯ. ПАРАДОКСЫ

Задача турбулентного нестационарного обтекания несжимаемой вязкой жидкостью профиля NACA0012 при варьировании углом атаки от 0° до 180° решается при фиксированном числе Рейнольдса 4×10^4 на различных сетках, с использованием разных моделей турбулентности. В ходе временного процесса за профилем формируется вихревая дорожка, протяженность которой монотонно увеличивается по мере роста t (рис.2). Интенсивность сходящих вихрей зависит от угла атаки, причем она тем выше, чем ближе положение профиля к нормальному, т.е. к $\alpha=90°$. По мере развития дорожка приобретает так называемый протекторный вид с выходом аэродинамических нагрузок на режим автоколебаний с периодом, связанным с α. Число Струхаля для углов атаки порядка 90° порядка 0.1, т.е. вдвое ниже, чем для кругового цилиндра. Следует также отметить изменение формы ближнего следа при углах α свыше 130°, когда дорожка приобретает вид отсоединенных вихрей.

Сравнение осредненных по периоду колебаний подъемной силы аэродинамических коэффициентов Cx и Cy представлено на рисунке 3. Расчетные результаты 1 и 2 взяты из пособия [3] и получены при $Re=10^5$ с помощью стандартных моделей MSST и SA соотвественно. Данные измерений Игараши получены при $Re=5\times10^4$. Оценочные результаты 4,5 из [1,2] не являются экспериментальными данными, причем 5 относятся к $Re=10^5$, 6 – к выбранному в исследовании $Re= 4\times10^4$. Как уже отмечалось, парадокс возник при трактовке рассогласования результатов на рисунке 3, причем в [3] существенное (более полутора раз) расхождение численных прогнозов с данными [5] (там α изменяется от 0° до 90°) является основанием для обвинения в неадекватности подхода URANS (подчеркну, вопрос о размерности вообще не рассматривается). Проведенные здесь расчеты в целом подтвердили прогнозы [3], несмотря на разницу в вычислительных технологиях и сеточных реализациях. Таким образом, URANS дает повторяющиеся результаты и неясным является вопрос об адекватности двумерного подхода. Эксперимент Игараши [4] выполнен с целью анализа взаимодействия нестационарного следа с раположенной ниже по потоку нормально расположенной поперечной пластинкой, важно подчеркнуть, что тщательно моделируется именно двумерный след за протяженным телом. Сравнение сравнительно толстой пластинки с профилем NACA0012 при их расположении поперек потока представляется правомочным, поскольку формируются близкие по структуре вихревые картины. Близость коэффициентов лобового сопротивления свидетельствует, прежде всего, об адекватности именно двумерного подхода URANS, что подвергалось сомнению в [3]. Таким образом, рассогласование численных прогнозов с оценочными данными скорее всего связано с трехмерным характером обтекания профиля в работах [1,2] и вполне понятной неспособности двумерных моделей предсказывать такие процессы. Интересно проанализировать влияние моделей замыкания на результаты расчета нестационарного обтекания профиля. Как видно из рис.3, модель вихревой вязкости Спаларта-Аллмареса дает близкие прогнозы к аналогичным результатам по двухпараметрической модели Ментера. На рисунке 4 сравниваются вихревые структуры течения в момент t=100, полученные по различным моделям. Важно отметить, что картины вихревой вязкости для стандартной и модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока MSST довольно близки, как, впрочем, и интегральные аэродинамические характистики. А вот картины вихревой вязкости для модели SA весьма отличны (например, по длине вихревого следа), причем уровень максимальных величин вязкости примерно в четыре раза ниже, чем для MSST.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование круговой обдувки классического профиля NACA0012 обнаружило парадокс, основанный на существенном (более полутора раз) расхождении прогнозов с оценочными данными [1,2]. В [3] сделан вывод о неприемлемости подхода URANS, что противоречит его успешному применению для моделирования обтекания кругового цилиндра [5-7]. В данном исследовании парадокс нашел объяснение в сравнении уточненных численных прогнозов с экспериментальными данными Игараши [4]. Установлено, что двумерный URANS вполне адекватен, а причина расхождения с оценочными данными [1,2] для профиля видится в трехмерном характере обтекания, который естественно не воспроизводится в рамках двумерного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoerner S.F. Fluid-dynamic lift. Hoerner Fluid Dynamics. Brick Town. NJ, 1975. – P.4 – 19.
2. Sheldahl R.E., Klimas P.C. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of vertical axis wind turbines // Sandia National Lab. Energy report. SAND80-2114. 1981. – 120 P.
3. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Учебное пособие. – СПб: Из-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 С.
4. Isaev S.A., Zhdanov V.L., Niemann H.-J. Numerical study of the bleeding effect on the aerodynamic characteristics of a circular cylinder // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2002. – Vol. 90. – Issue 11 – P. 1217 – 1226.
5. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Жукова Ю.В. Численное моделирование нестационарного теплообмена при турбулентном обтекании кругового цилиндра. Часть 1. Методическое исследование // Теплофизика и аэромеханика. 2005. – Т.12. – №1. – С. 27 –39.
6. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Жукова Ю.В. Численное моделирование нестационарного теплообмена при турбулентном обтекании кругового цилиндра. Часть 2. Анализ автоколебательного режима // Теплофизика и аэромеханика. 2005. – Т.12. – №2. С. 271 – 283.
7. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Сравнительный анализ пакетов VP2/3 и FLUENT при расчете нестационарного обтекания кругового цилиндра с использованием моделей турбулентности Спаларта-Аллмареса и Ментера // Инженерно-физический журнал. 2005. – Т.78. – №6. – С. 148 – 162.
8. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под редакцией А.В. Ермишина и С.А. Исаева. М.: МГУ, 2003. – 360С.
9. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб, Судостроение, 2005. – 398С.
10. Igarashi T., Terachi N. Drag reduction of flat plate normal to airstream by flow control using a rod // Expanded abstracts of 4th Int. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Application. – Bochum: Ruhr- University Bochum, 2000. – P. 635 – 638.
11. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т.2. М.: Мир, 1991. – 552С.
12. Smirnov P.E., Menter F. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term // Proc. ASME Turbo Expo Conf., 2008. N GT2008-50480. – 10 P.

© Исаев С.А.