

УДК 62.165+621.438

И.Г. ГОГОЛЕВ¹, В.Г. СОЛОДОВ², Ю.В. СТАРОДУБЦЕВ²

¹Брянский государственный технический университет «БИТМ», Россия

²Национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВХОДНОМ ОТСЕКЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НАДДУВА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

Експериментально й чисельно досліджені особливості в'язкої турбулентної течії у вхідному відсіку газової турбіни, що складається з вхідного патрубку і каналів ступеня.

Введение

Данные экспериментальных исследований входных патрубков турбомашин [1] указывают на сложный пространственный характер течения со значительной неравномерностью параметров, потерями полного давления. Дискретный подвод рабочего тела через подводящие трубы патрубка создает на входе в 1-ю ступень в окружном направлении крупномасштабную по сравнению с шагом решетки неравномерность газодинамических параметров, при этом отдельные каналы ступени работают на нерасчетных режимах, что снижает экономичность и надежность всего турбоагрегата [1, 2]. Поиск путей снижения потерь энергии вызывает необходимость моделирования течения в отсеке, составленном из входного патрубка и ступени.

Одним из авторов в начале 90-х годов предложен экономичный подход к моделированию взаимодействия турбинной ступени и патрубка в рамках модели невязкого газа [3]. Развитие подхода на основе модели вязкого течения во входном отсеке подробно описано авторами в [4]. В данной работе проведено тестирование разработанного подхода и выполнен анализ трехмерной структуры течения на примере входного отсека одноступенчатой газовой турбины.

Экспериментальные данные получены в испытаниях модели входного отсека в БИТМе [1, 2]. Численный анализ аэродинамики входного отсека проведен с использованием программного комплекса *MTFS*[®] [5].

Физическое и численное моделирование

Схема проточной части входного отсека одноступенчатой газовой турбины наддува судового дизеля дана на рис. 1. Отношение площадей входа и выхода патрубка $A_{\text{вх}} / A_{\text{вых}} = 0.92$. Лопаточный аппарат ступени закручен по закону $rc_u = \text{const}$, высота лопаток $\bar{l}_1 = 0.892$, $\bar{l}_2 = 1.54$, относительные шаги $\bar{t}_1 = 0.694$, $\bar{t}_2 = 0.673$, геометрические углы сопловой лопатки $\alpha_0 = 84^\circ$, $\alpha_{1\text{э}} = 17^\circ 36'$. Подробное геометрическое описание отсека и методика измерений даны в [2].

Наиболее общий подход к газодинамическому моделированию отсека «патрубок-ступень» подразумевает сквозной счет течения через отсек при задании полных параметров на входе в подводящие трубы и противодавления на удалении за ступенью. Такая постановка математически и физически обоснована, однако вследствие разномасштабности взаимодействующих частей отсека ее прямое решение требует

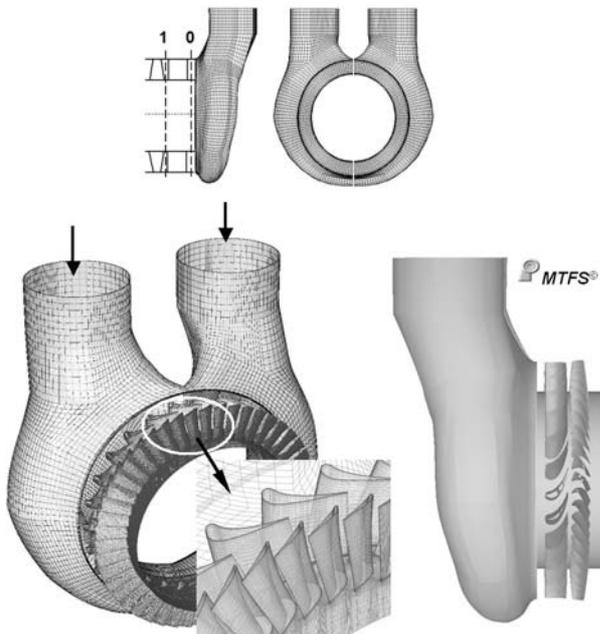


Рис. 1 Схема расчетной области и сечения замеров

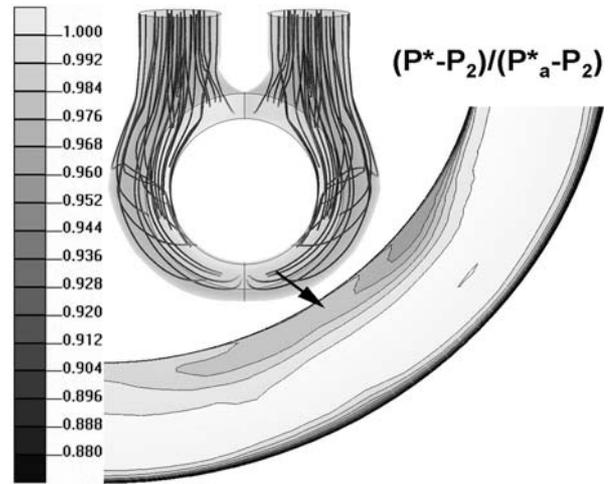


Рис. 2 Структура течения в патрубке и полное давление в сечении выхода патрубка

значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для экономичного расчета течения в отсеке целесообразно применение секторного подхода[4], который основан на малости окружных градиентов параметров за патрубком. Подход обладает общностью в применении к течениям в разномасштабных, аэродинамически взаимодействующих проточных частях, размеры секторов интерфейса адаптируемы к градиентам параметров.

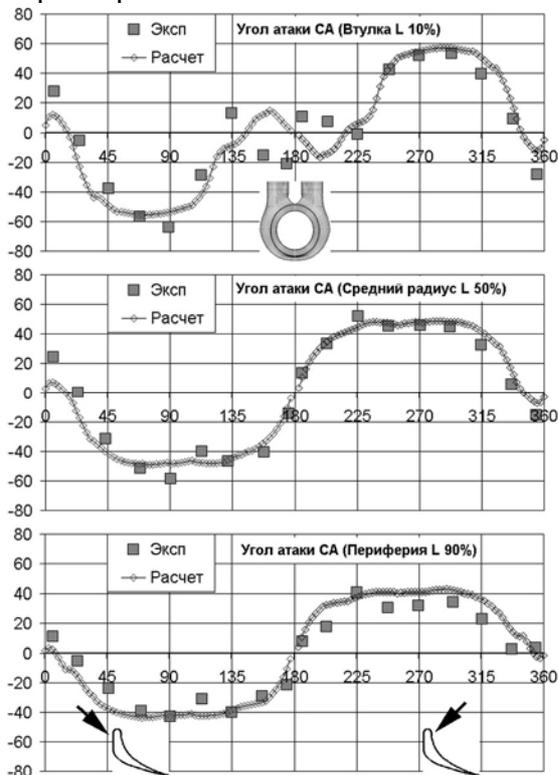


Рис. 3 Углы атаки лопаток диафрагмы в зависимости от окружной координаты

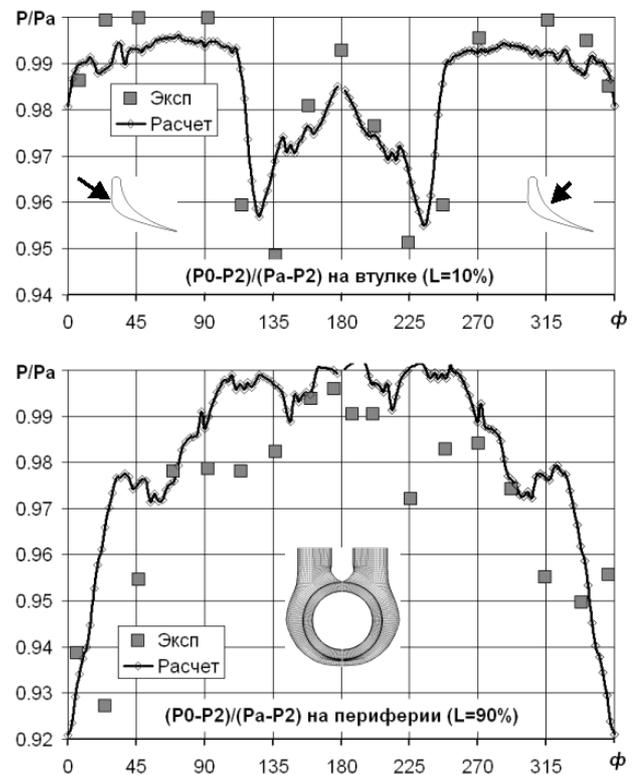


Рис. 4 Полное давление в сечении выхода из патрубка

Течение в каждой расчетной подобласти описывается полной системой уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Используются неструктурированные гексаэдральные сетки мощностью около 1,5 млн. ячеек для патрубков; 0,2 млн. ячеек для каждого соплового канала; разрешение пограничного слоя $y^+ \leq 3$. Солвер использовал неявную разностную ENO схему 2-го порядка точности [6]. В расчетах применялась стационарная модель ступени. Турбулентные эффекты учитывались комбинированно с помощью дифференциальных моделей турбулентности Спаларта-Аллмараса (область патрубков) и SST Ментера (каналы ступени). Расчетный комплекс *MTFS*[®] описан и тестирован в [7]. Расчеты выполнены на кластере, составленном из узлов Intel[®] P4-3.06, при затратах оперативной памяти 0.58К/яч.

Анализ расчетных и экспериментальных данных

Сопоставления и исследования отсека проводились в диапазоне значений $u/c_0 = 0.5 \div 0.7$ изменением угловой скорости при перепаде $P_{\text{вхл}}/P^* = 1.12$ на отсек. Некоторые результаты сопоставления данных представлены на рис.2-10.

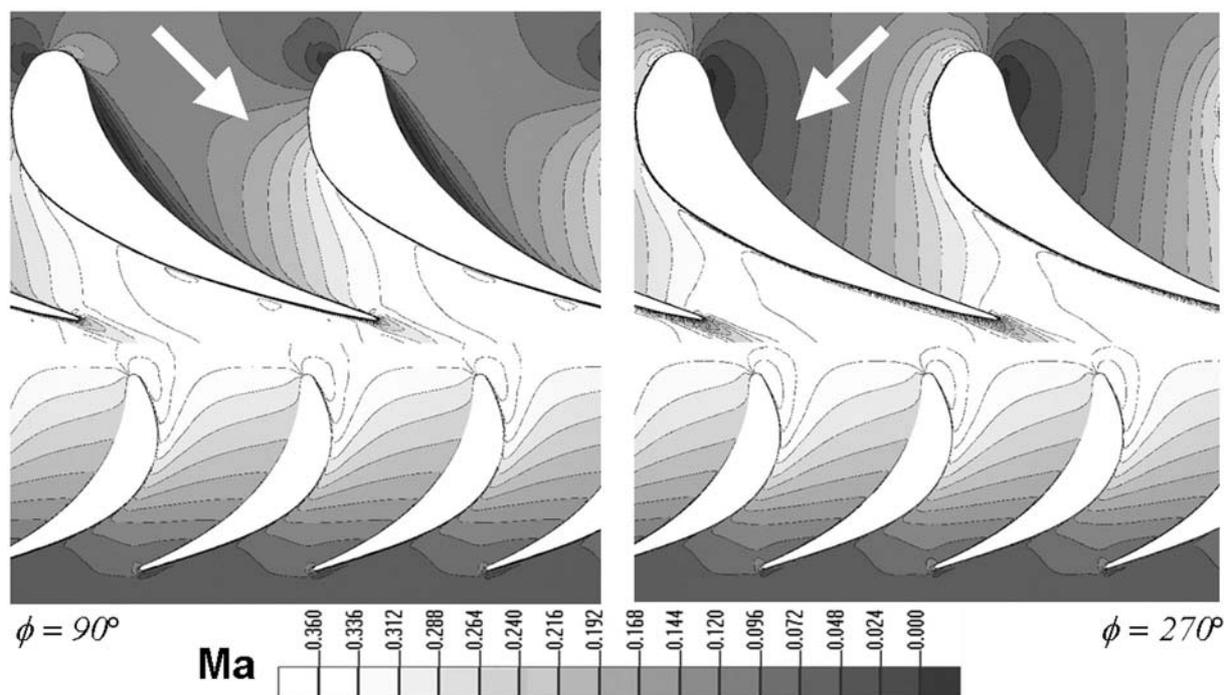


Рис. 5 Поле скорости в абсолютном движении на среднем радиусе в секторах $\phi = 90^\circ, 270^\circ$

Течение в пространстве патрубков на режиме $u/c_0 = 0.61$ реализуется при скоростях $M < 0.1$. На выходе из патрубков (сеч.0-0) скорости достигают значений $M_0 = 0.15 \div 0.16$, числа Рейнольдса, рассчитанные по высоте лопатки, характеризуются значениями $Re_0 = 1 \div 2e + 5$. Значения расходов через обе половины подводов патрубков практически не различаются. Нарушение симметрии течения в патрубке из-за несимметричного сопротивления ступени в расчетах слабее, нежели отмечается в опытах (рис. 2-4). Потери энергии в проточной части патрубков при работе в составе отсека и в изолированных условиях близки и составляют в диапазоне режимов около 2 % теплоперепада на отсек.

Распределения углов выхода потока из патрубков (рис. 3) демонстрируют хорошее количественное совпадение с данными опытов и слабо зависят от режима. Отличия в

корневом поясе вблизи угла 180° предположительно вызваны нестационарностью течения из-за столкновения струй у нижней перегородки (рис. 2).

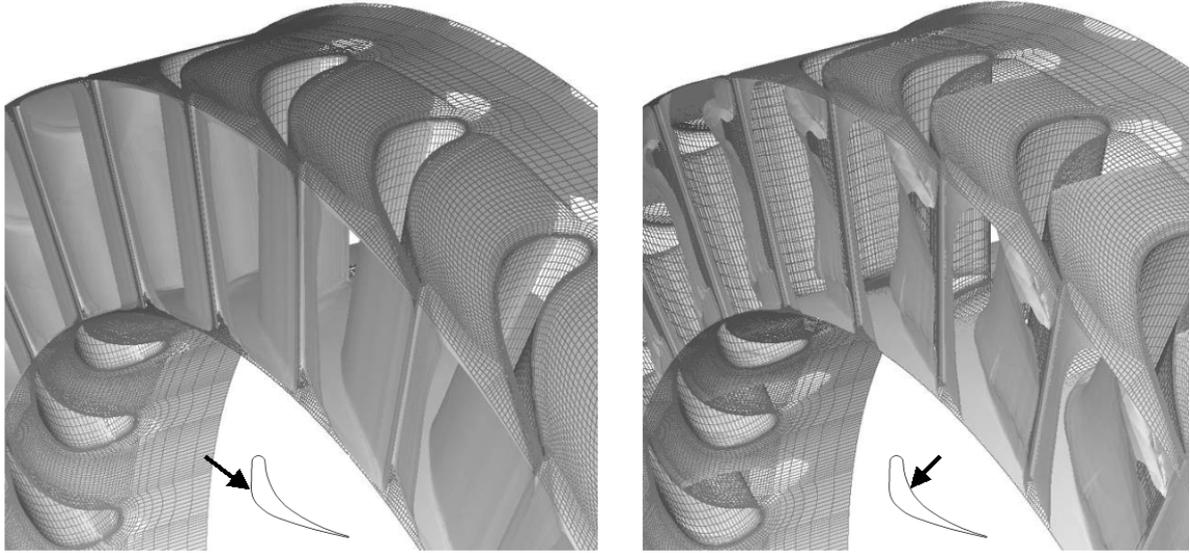


Рис. 6 Изоповерхности полей полного давления $0.99P^*$ на выходе из сопел в секторах вблизи $\phi = 90$ и $\phi = 270^\circ$

Максимальная завихренность и наибольшие потери полного давления в выходном сечении патрубка в расчетах отмечены на дугах вблизи углов 135° и 225° (рис. 2) и вызваны отражением линий тока от нижней перегородки (180°), что отмечается также в распределениях полного давления на выходе в корневом поясе (рис. 4).

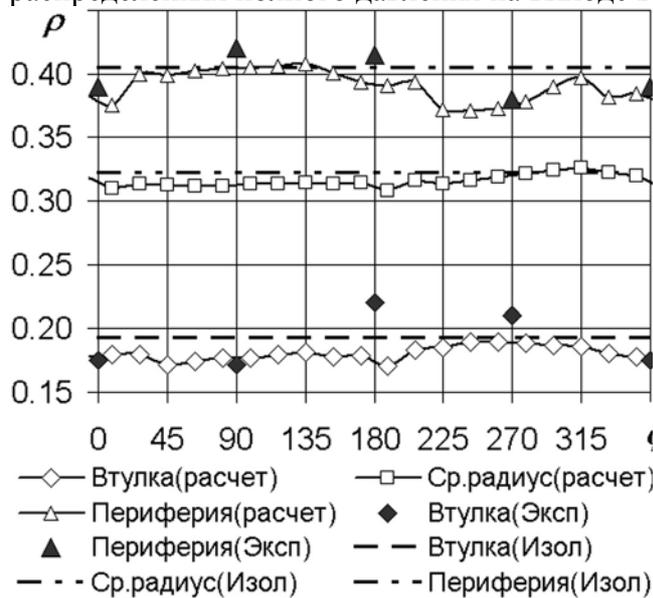


Рис. 7 Реактивность вдоль окружности для изолированной ступени и для ступени в составе отсека на режиме $u/c_0 = 0.61$

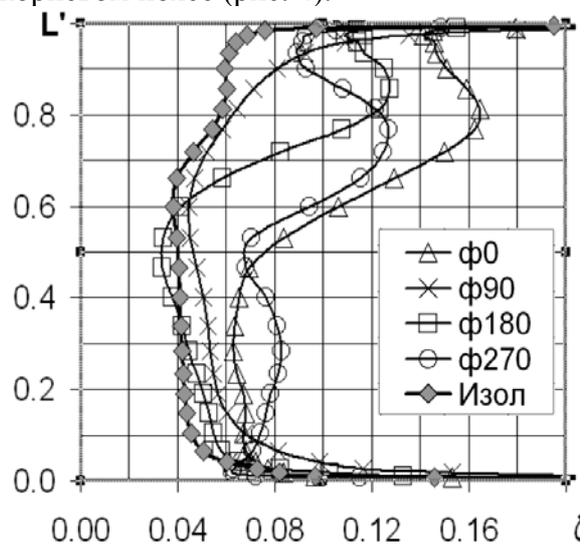


Рис. 8 Осредненные по шагу потери кинетической энергии в сопловых каналах ступени вдоль радиуса для разных секторов подвода ($u/c_0 = 0.61$)

На рис. 7 приведено распределение реактивности ступени в корневом ($10\%L$), среднем и периферийном ($90\%L$) поясах и их сопоставление с данными эксперимента, а также с реактивностью изолированной ступени. Для секторов с ударом в спинку отмечаются удовлетворительные совпадения с экспериментальными данными.

Расхождения с экспериментом в точке корневого пояса вблизи угла 180° могут быть объяснены нестационарностью вследствие столкновения струй у перегородки патрубка.

Интенсивность завихренности и связанных с ней потерь полного давления в прикорневом поясе в опытах выше, чем в расчете. Нерегулярность и существенная асимметрия кривых полного давления у втулки и, особенно, на периферии выходного сечения указывают на нестационарность течения в этих поясах патрубка, хотя при этом распределения углов потока заметно регулярнее, и имеют в основном симметричную структуру. Перечисленные характеристики течения указывают на набухший пограничный слой и локальный отрыв потока в упомянутых поясах на входе в сопловые каналы диафрагмы.

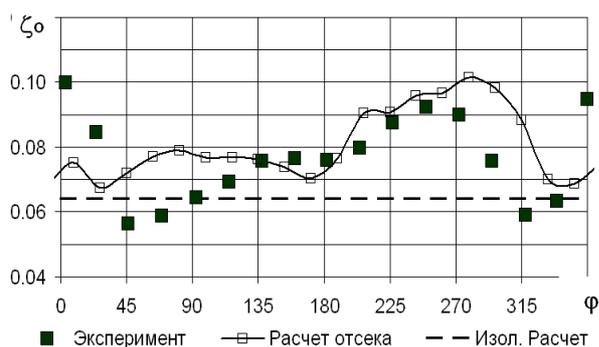


Рис. 9 Потери кинетической энергии за сопловым аппаратом входного отсека

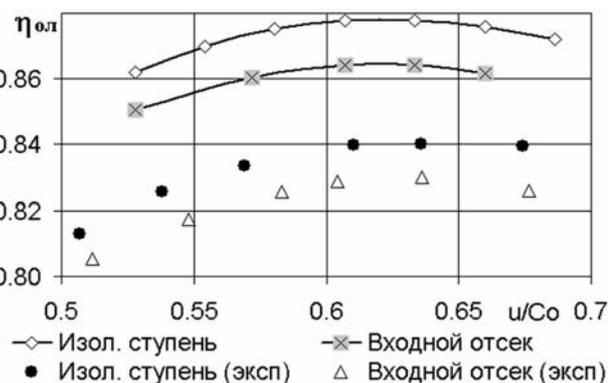


Рис. 10 КПД отсека и изолированной ступени в диапазоне режимов по u/C_0

Вследствие одностороннего подвода углы атаки сопловых лопаток достигают $\pm 60^\circ$, провоцируют развитие вторичных течений в каналах статора. Диапазон изменения углов атаки, по-видимому, характерен [4] для односторонних двухтрубных подводов независимо от их аэродинамического совершенства. В зависимости от знака и величины углов атаки сопловых лопаток, структуры течения в каналах ступени существенно различаются (рис. 5, 6). Именно, удар в вогнутую сторону сопловой лопатки вызывает существенное повышение потерь кинетической энергии (рис.8), усиление интенсивности вторичных течений, приводит к развитию канального вихря. Удар в спинку профиля приводит к заметно меньшему росту потерь кинетической энергии в соплах. Сравнение с аналогичным распределением потерь для изолированной ступени (рис.8) подчеркивает влияние углов атаки диафрагмы.

Сопоставление опытных и расчетных данных по потерям энергии в патрубке и сопловом аппарате ступени (рис. 9) демонстрирует удовлетворительное соответствие за исключением дуг непосредственно под трубами подвода.

На рис.10 представлены также кривые относительного лопаточного КПД с учетом потерь с выходной скорости для ступени в составе отсека и в изолированной постановке в исследуемом диапазоне u/c_0 и экспериментальные данные [1]. Расхождения определяются существованием уступа за диафрагмой и надбандажной протечкой, которые в данной работе численно не моделировались.

Заключение

Проведен анализ сопоставления экспериментальных и расчетных данных о структуре и параметрах течения во входном отсеке газовой турбины. Для моделирования течения в многосвязных разномасштабных областях отсека

использован секторный подход. Сопоставления показывают хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных по углам натекания на сопловые лопатки и удовлетворительное соответствие по полному давлению.

Показано влияние угла натекания и неосевого подвода на потери кинетической энергии в каналах ступени. Снижение уровня потерь может быть достигнуто применением меридионального профилирования, предложенного в [8].

Развитие данного исследования в направлении учета ступенчатого диффузора за диафрагмой и создания модели надбандажной щели для учета периферийных тангенциальных перетеканий готовится к опубликованию.

Подход к трехмерному моделированию отсека могут быть применены к разнообразным газодинамическим задачам турбиностроения: к оптимальному проектированию подвода для снижения потерь кинетической энергии ступени; для решения задачи о парциальном подводе; для анализа течения в околоотборных ступенях; для оценки оборотной составляющей сил на лопатках; для численного моделирования течения в одноступенчатых турбинах.

Авторы выражают благодарность д-ру Б.И. Фролову (GE ETEC, Москва) за полезные обсуждения при выполнении работы.

Литература

1. Гоголев И.Г., Дьяконов Р.И., Заикин И.Д. Исследование совместной работы турбинной ступени с входным патрубком. – Изв.вузов СССР. Сер. Энергетика, 1975, №11. – С.66-71
2. Гоголев И.Г., Дроконов А.М. Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков турбин.- Брянск: Грани, 1995. – 257с.
3. Solodov V.G., Gnesin V.I. Nonstationary 3D Numerical Model of Last Turbine Stage-Exhaust Hood Aerodynamical Interaction // VDI Berichte. – Nr.1185. – P.359-373
4. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Численное моделирование вязкого турбулентного течения во входном отсеке ЦНД мощной паровой турбины. I. Постановка задачи и секторный подход к моделированию // Соверш. турбоустановок методами мат. и физ. моделирования: Сб. научн. трудов ИПМаш НАНУ. – 2003. – С.230-235.
5. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. Сертификат гос. регистрации авт. прав, УГААСП, №5921, 16.07.2002
6. Yang J.Y., Lombard, C.K. Uniformly Second Order Accurate ENO Schemes for Euler Equations of Gas Dynamics. AIAA Paper 87-1166, 9 p., 1987.
7. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Опыт моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений во входных и выходных устройствах турбомашин. Пробл. машиностроения. – 2002. – 5, №1. – С. 29-38
8. Стародубцев Ю.В. Численное моделирование вязкого турбулентного течения во входном отсеке ЦНД турбомашин. II. Исследование варианта паровпуска ЦНД мощной паровой турбины// Совершенствование турбоустановок методами матем. и физ. моделирования: Сб. научн. трудов ИПМаш НАНУ. – 2003.– С.236-240

© Гоголев И.Г., Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., 2005