

5

**Сборник докладов
Международной конференции**



**Россия, Казань
19-22 октября 2015 г.**

ТЕПЛОМАССООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ



**5 International Conference
HEAT AND MASS
TRANSFER AND
HYDRODYNAMICS
IN SWIRLING FLOWS**

**Russia, Kazan,
2015, 19-22 October**

Proceedings of Conference

Министерство образования и науки Российской Федерации
Казанский национальный исследовательский технический университет
им.А.Н.Туполева – КАИ
Лаборатория МФТП
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Академия наук
Национальный комитет по тепло- и массообмену РАН
Академия наук Республики Татарстан
ООО «Наука-Сервис-Центр»

ТЕПЛОМАССООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Труды конференции

Россия, Казань
19-22 октября 2015 г.

Казань 2015

УДК [536.25+532.5]

Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: пятая международная конференция: Труды конференции – Казань: КНИТУ-КАИ, - 2015.- 969 с.

Сборник содержит тексты докладов и тезисов пленарных, проблемных и секционных докладов Пятой международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» по следующим направлениям:

- гидродинамика и тепломассоперенос в закрученных потоках
- вихревой эффект и его применение
- поверхностные вихрегенераторы
- термо- гидродинамика на микро – и наномасштабах
- горение при закрутке потока
- разработка технологий и аппаратов с использованием закрученных потоков для промышленности и энергетики
- численное и экспериментальное исследование аэродинамики и теплообмена в транспортных системах

Доклады печатаются с авторских оригинал-макетов.

Сборник подготовлен в лаборатории МФТП КНИТУ-КАИ.

© Казанский национальный
исследовательский технический
университет им.А.Н.Туполева, 2015

© Составление: Организационный
комитет конференции, 2015

© Составление: Лаборатория МФТП
КНИТУ-КАИ, 2015

© Авторы, 2015

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТАНДЕМА ТЕЛ СО ЩИТОВЫМ ЭКРАНОМ- ИНТЕРЦЕПТОРОМ

АННОТАЦИЯ

Методами физического и численного моделирования исследуется аэродинамика тандема тел со щитовым экраном-интерцептором. Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе НИИ механики МГУ при варьировании скорости и параметров турбулентности в набегающем потоке, а также угла установки интерцептора. Численное моделирование проводится на базе URANS-технологии в пакетах STAR-CCM+ и OpenFOAM. Для замыкания уравнений Рейнольдса используется модель турбулентности $k-\omega$ SST. Показано, что интерцептор позволяет снизить коэффициент лобового сопротивления тела, минимальное значение которого достигается при угле наклона интерцептора 30° . Сравнение полученных расчетных результатов с экспериментальными данными дает хорошее согласование при малых углах отклонения интерцептора.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам исследования внешней аэродинамики автомобиля посвящено множество научных работ. Первоначально основное внимание уделялось экспериментальным исследованиям в аэродинамических трубах различных масштабных макетов автомобилей вплоть до натурных размеров [1-3]. В последние полтора десятилетия акцент явно сместился в пользу численного моделирования [4-7], что связано с интенсивным развитием вычислительной техники и специализированных программных комплексов для анализа инженерных задач. Однако роль физического эксперимента не уменьшилась, поскольку еще не существует самодостаточных вычислительных технологий, с помощью которых можно всегда достоверно учитывать сложные механизмы нестационарных отрывных явлений внешней аэродинамики автомобилей. Любая современная вычислительная технология нуждается в дополнительных настройках на специальных тестовых примерах, учитывающих специфику класса изучаемых течений. В полной мере это

^(*) А.Ю. Чулюнин, chulyu-n@mail.ru

относится к исследованиям, направленным на поиск новых способов управления обтеканием большегрузных автомобилей для оптимизации их аэродинамических характеристик.

Одним из наиболее распространенных в мире тестовых примеров, используемых для верификации компьютерных технологий при численном решении задач внешней аэродинамики автомобилей, является, так называемое, тело Ахмеда (рис.1) [3, 7]. Этот пример удобен при отработке вычислительных технологий моделирования отрывных донных течений позади корпуса автомобиля. Однако в нем не содержится ряд важных особенностей, присущих обтеканию большегрузных автомобилей. В частности, модель «тело Ахмеда» не учитывает наличие значительного воздушного зазора между кабиной и кузовом грузовика, а также не предусматривается возможность управления обтеканием с помощью щитовых элементов, способных, в некоторых случаях, обеспечить достижение эффекта «уловленный вихрь» [8].

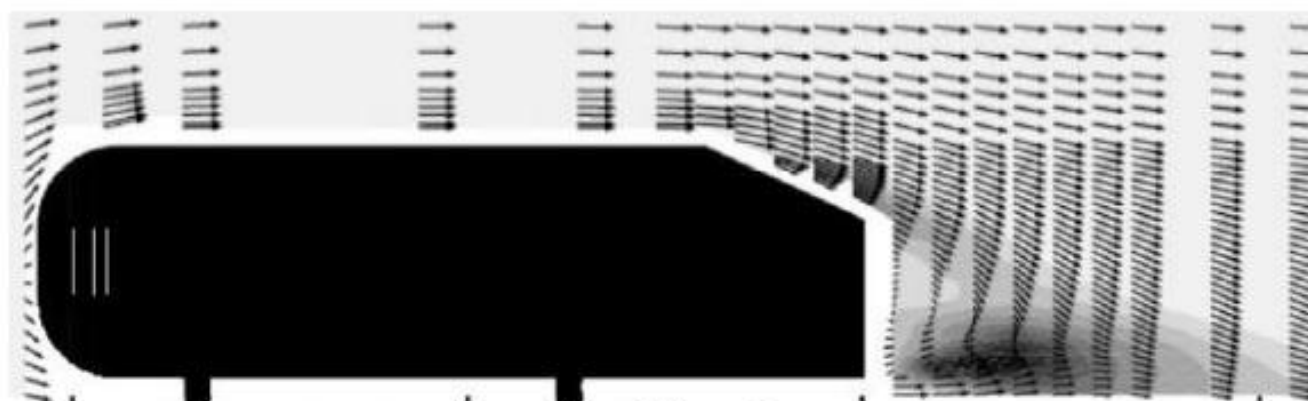
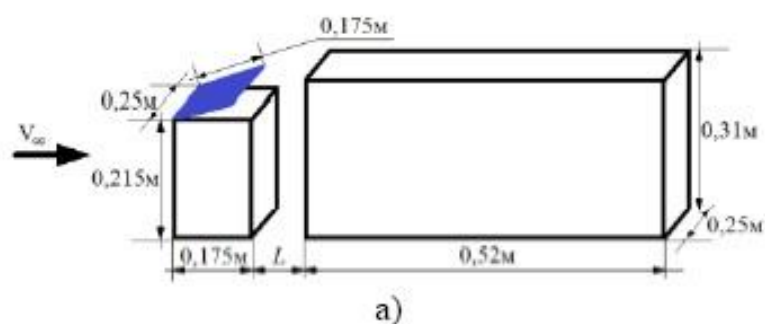


Рис.1 Тело Ахмеда

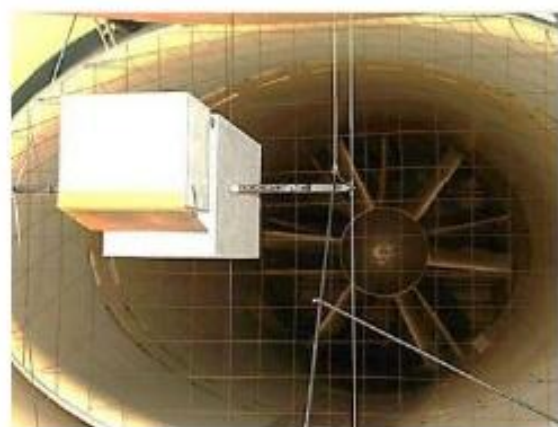
Способы применения щитовых экранов для управления обтеканием грузовика за счет формирования течений с уловленным вихрем активно обсуждаются в современной литературе. Некоторые из возможных схем таких течений рассмотрены в [8]. Отработка методов численного моделирования эффектов типа «уловленный вихрь» является одной из основных целей представленного исследования задач внешней аэродинамики грузовых автомобилей.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Конструкция разрабатываемой в данной работе экспериментальной модели представляет собой последовательный тандем двух параллелепипедов с шарнирно установленным щитовым экраном-интерцептором на переднем теле, рис. 2,а. Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе НИИ механики МГУ, рис.2,б



а)



б)

Рис. 2. Экспериментальная модель: а – схема; б – испытания в аэродинамической трубе

Средняя скорость потока в аэродинамической трубе составляла $V_{\infty}=20-30$ м/с. Масштаб и интенсивность турбулентных пульсаций в набегающем на модель потоке воздуха можно было варьировать с помощью специальных сетчатых вставок, перекрывающих входное сечение рабочей части аэродинамической трубы, табл. 1.

Таблица 1. Сведения о турбулентности потока

Геометрические параметры турбулизирующих вставок	Расстояние до места установки турбулизирующей вставки, м.	V_{∞} , м/с	ε , %
Без вставки	1.75	30.0	0.4
Вставка с сеткой №1 (двойная тканая) размер ячейки 12*12 мм, толщина 1 мм + уголки 12*12 мм, расположенные равномерно с шагом через 50 мм: горизонтально – 37 уголков, вертикально – 64 уголка	1.75	22.5	3.0
Вставка с сеткой №2 (металлические стержни) диаметр 22 мм, размер ячейки 90*90 мм.	1.75	30.0	4

На рис. 3-6 построены графики зависимости коэффициента лобового сопротивления модели $C_x=f(\alpha, \varepsilon, h)$ от геометрических и режимных факторов параметров. Из рисунков видно, что экспериментально обнаружена существенная зависимость коэффициента лобового сопротивления от интенсивности турбулентности: повышение интенсивности турбулентности меняет характер поведения кривых. Высокая интенсивность турбулентности приводит к линейной зависимости сопротивления от расстояния между

параллелепипедами (чего не наблюдается в низкотурбулентном потоке). При этом оптимальный угол наклона интерцептора (с точки зрения снижения сопротивления) $\alpha = 30^\circ$ не зависит от интенсивности турбулентности в исследованном диапазоне параметров. Для объяснения и исследования сопутствующих механизмов этих и ряда иных явлений в пространственных отрывных течениях с уловленным вихрем, необходимо проведение адекватных вычислительных экспериментов.

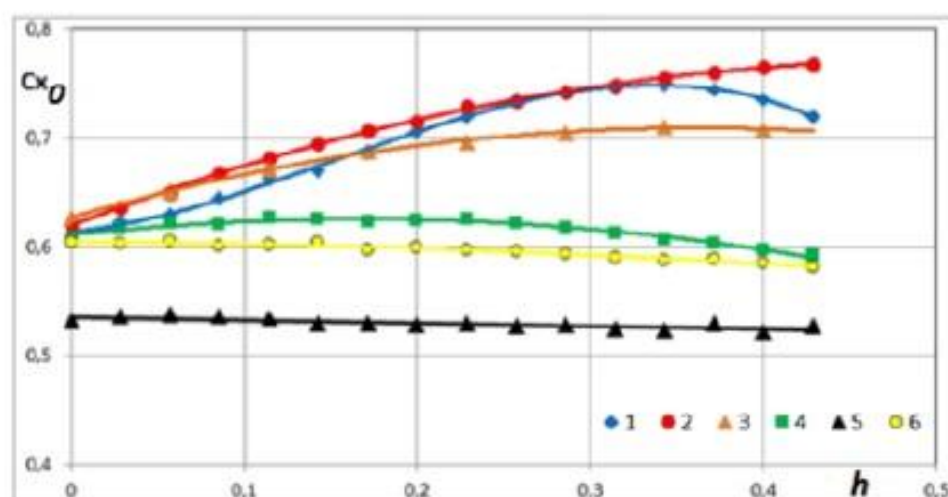


Рис.3. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от расстояния между телами в тандеме и угла отклонения интерцептора без сеток: 1 – $\alpha=0^\circ$, 2 – $\alpha=15^\circ$, 3 – $\alpha=20^\circ$, 4 – $\alpha=25^\circ$, 5 – $\alpha=30^\circ$, 6 – $\alpha=40^\circ$

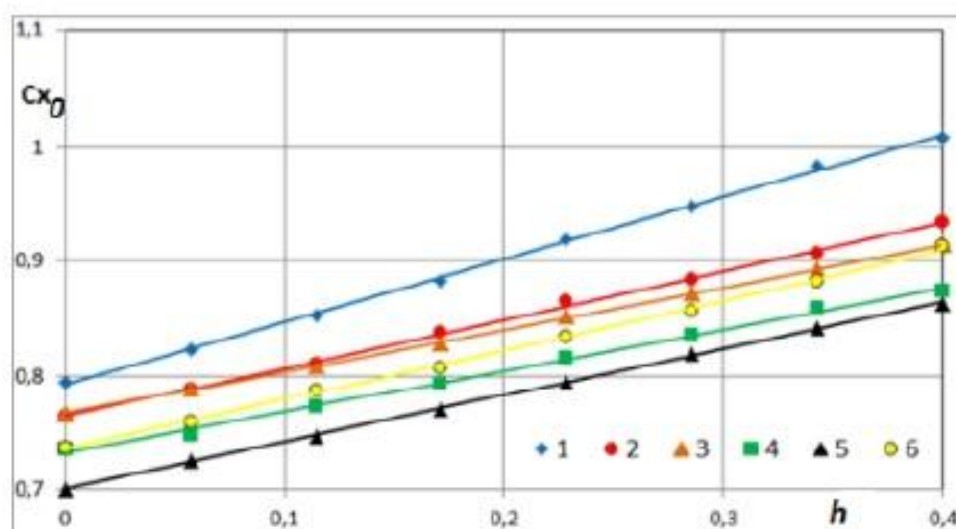


Рис.4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от расстояния между телами в тандеме и угла отклонения интерцептора, с установленной на срезе сопла сеткой №1: 1 – $\alpha=0^\circ$, 2 – $\alpha=15^\circ$, 3 – $\alpha=20^\circ$, 4 – $\alpha=25^\circ$, 5 – $\alpha=30^\circ$, 6 – $\alpha=40^\circ$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическая модель

Для описания турбулентного движения вязкого несжимаемого газа при обтекании тандема тел используется система уравнений Навье-Стокса,

осредненная по Рейнольдсу, которая имеет следующий вид [9]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

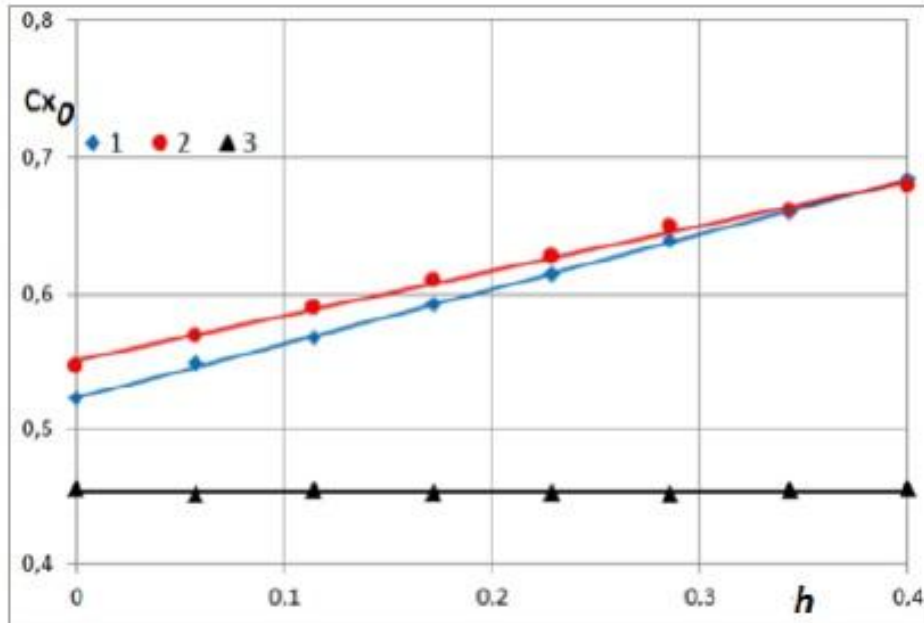


Рис.5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от расстояния между телами в тандеме и угла отклонения интерцептора, с установленной на срезе сопла сеткой №2: 1 – $\alpha=0^\circ$, 2 – $\alpha=15^\circ$, 3 – $\alpha=30^\circ$

Для нахождения тензора напряжений Рейнольдса, который входит в состав тензора напряжений τ_{ij} применяются соответствующие модели турбулентности, которые, в большинстве своем, основаны на концепции турбулентной вязкости. В 1877 г. Буссинеск выдвинул предположение, что рейнольдсовы напряжения могли бы быть связаны со скоростью средней деформации через турбулентную вязкость. Для тензора рейнольдсовых напряжений это дает:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_i \quad (4)$$

Отметим, что данное уравнение не вводит модели турбулентности, а только характеризует структуру такой модели. При этом основной задачей является задание функции турбулентной вязкости μ_t . В отличие от коэффициента молекулярной вязкости, коэффициент турбулентной вязкости определяется состоянием течения и не является свойством жидкости. Для ее нахождения и используются различные модели турбулентности

В настоящее время наибольшей популярностью пользуются модели с двумя дифференциальными уравнениями, подробный обзор которых выполнен в работе [10]. В настоящем исследовании используется модель Ментера SST. Модели турбулентности типа k-ε лучше описывают свойства сдвиговых течений, а модели типа k-ω имеют преимущества при моделировании пристеночных функций. Основываясь на этом, Ментер предложил модель [11], сочетающую в себе указанные сильные стороны k-ε и k-ω моделей. Для этого k-ε модель была записана в терминах k-ω, а затем полученные модельные уравнения была введена весовая функция F1, обеспечивающая плавный переход от k-ω в пристеночной области к k-ε вдали от стенки. Данная функция подбирается таким образом, чтобы быть равной нулю на верхней границе пограничного слоя и стремиться к единице при приближении к стенке. Ниже представлена базовая двухслойная модель Ментера:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

(6)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} = & \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ & + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned}$$

Турбулентная вязкость и рейнольдсовы напряжения определяются аналогично, как и в k-ω модели, а именно:

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho \frac{k}{\omega} \\ \tau_{ij} &= -\rho \overline{u_i' u_j'} \end{aligned} \quad (7)$$

Для замыкания описанной выше системы уравнений необходимо определить условия однозначности. В рассматриваемой задаче использовались следующие граничные условия:

Тип ГУ	Значение
На входе в расчетную область	Скорость, нормальная к границе $V_\infty = 30 \text{ м/с}$
На верхней, нижней и боковой гранях	Условие симметрии

На выходе
На обтекаемом теле

Статическое давление $p = \text{constant}$

Условие прилипания $\vec{u} = 0$

Уравнения (1)-(7) вместе с граничными условиями образуют замкнутую систему, которая может быть решена тем или иным численным методом. В настоящей работе используются пакеты STAR-CCM+ и OpenFOAM, которые базируются на методе контрольного объема [6].

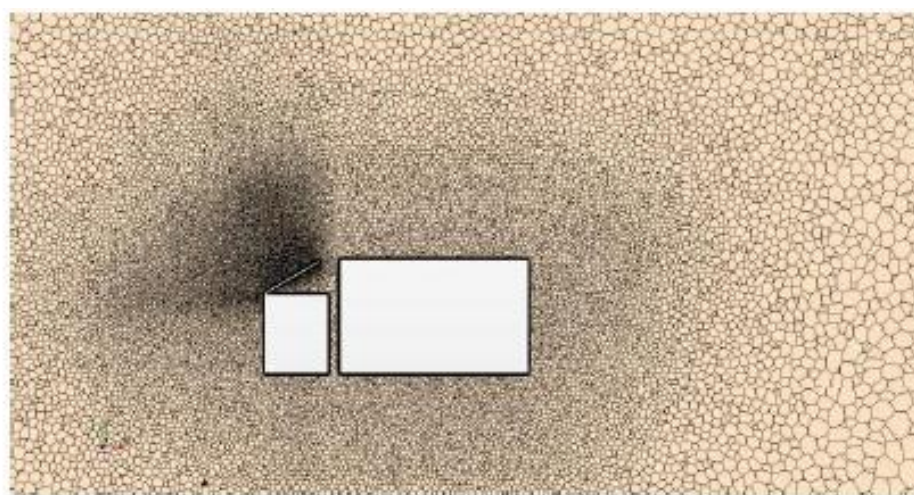
Сеточная модель

Для сопоставления результатов полученных в двух разных пакетах, желательно, чтобы расчетная сетка была идентичной. В данной работе применяется неструктурированная многогранная сетка со сгущением к обтекаемому телу. Построение сетки производится с помощью сеточного генератора STAR-CCM+, позволяющего импортировать получающиеся сетки в сторонние программы, в частности OpenFOAM. Преимущество многогранников перед ячейками типа тетра или перед структурированными гексагональными ячейками приведены в работе [12]. Отметим, что многогранная сетка позволяет при одинаковом количестве ячеек лучше описывать градиенты, чем тетра и гекса-сетки. Это обстоятельство особенно важно при исследовании течений с большими отрывными зонами, которые характерны для задач внешней аэродинамики. Также следует отметить, что использование многогранных ячеек позволяет сократить время на расчеты за счет более быстрого достижения сходимости.

При численном исследовании турбулентных течений важно создать на поверхности стенки не только мелкую, но и достаточно равномерную (прямоугольную) сетку с небольшим вытягиванием по высоте. Такой прием называется созданием призматического слоя ячеек. Размер первого слоя выбирается исходя из используемой модели турбулентности. На рис.6а,б представлены фрагменты сеточной модели обтекаемого тела, расчетной области, а также разрешение призматического слоя у стенки.

Результаты расчетов

В пакете STAR-CCM+ была проведена серия вычислительных экспериментов обтекания тандемов тел с различными углами установки интерцептора, а также варьируемым расстоянием между двумя телами. Итогом этой серии является график зависимости коэффициента сопротивления тел от безразмерного расстояния L/L_1 (рис.7). Из рисунка следует, что C_x имеет экстремум (минимум) при угле отклонения интерцептора в 30 градусов. Этот режим был выбран для проведения дальнейших расчетов в пакете OpenFOAM для сопоставления полученных результатов.



а)



б)

Рис.6. Сеточная модель: а) сетка в окрестности обтекаемого тела, б) иллюстрация призматического слоя на интерцепторе

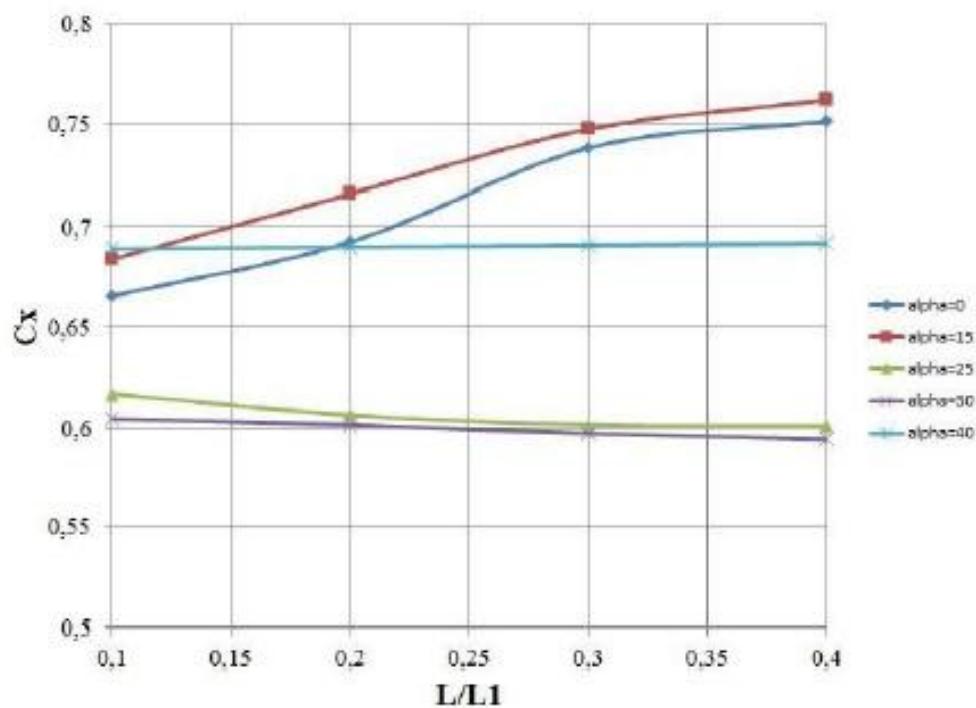


Рис.7 Зависимость коэффициента сопротивления тел от безразмерного расстояния между ними

Из рисунка следует, что C_x имеет экстремум (минимум) при угле отклонения интерцептора в 30 градусов. Этот режим был выбран для проведения дальнейших расчетов в пакете OpenFOAM для сопоставления полученных результатов. На рис.8 а,б и 9 а,б представлены поля модуля скорости и давлений соответственно.

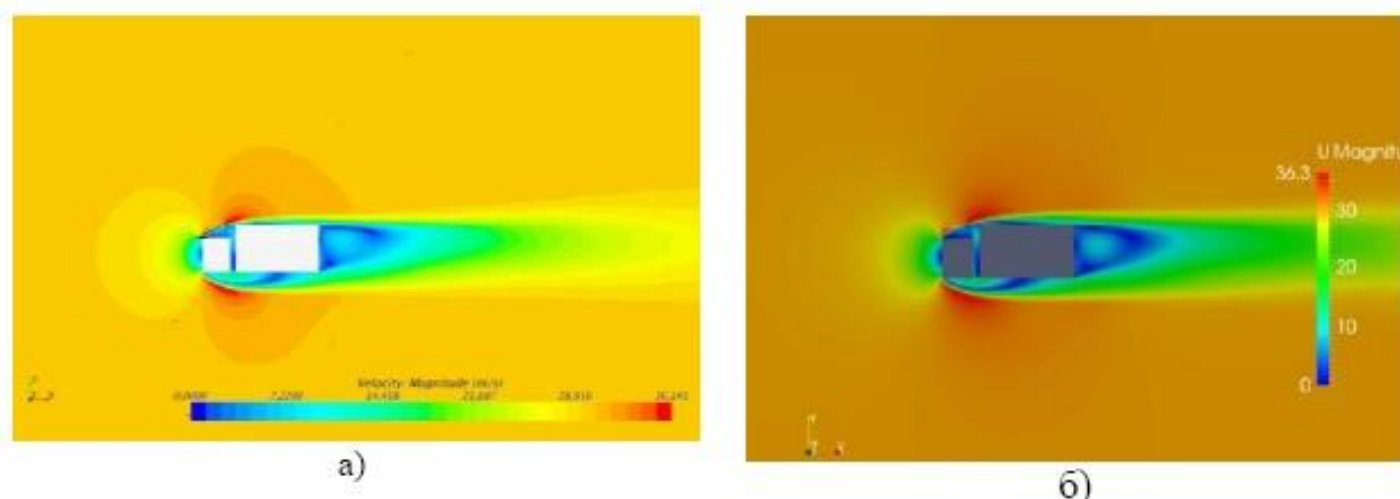


Рис.8 Поле модуля скорости: а – STAR-CCM+, б – OpenFOAM

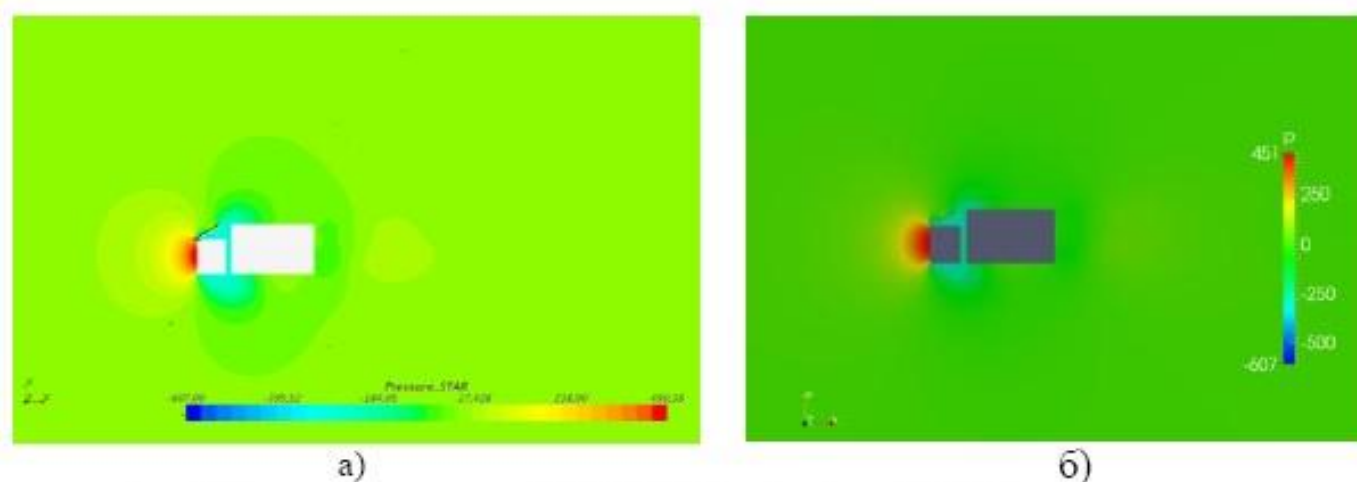


Рис.9 Поле давления: а – STAR-CCM+, б – OpenFOAM

На рис.10 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту сопротивления C_x . Сравнение полученных расчетных результатов с экспериментальными данными дает хорошее согласование при малых углах отклонения интерцептора. Однако, расчет не воспроизводит резкое падение сопротивления в окрестности оптимального значения угла отклонения рецептора $\alpha = 30^\circ$ - когда формируется квазистационарный уловленный вихрь. Причины недостатка рассмотренных вычислительных технологий предстоит выявить и учесть при разработке специализированных модулей технологии VP2/3 и SigmaFlow в ходе дальнейших исследований.

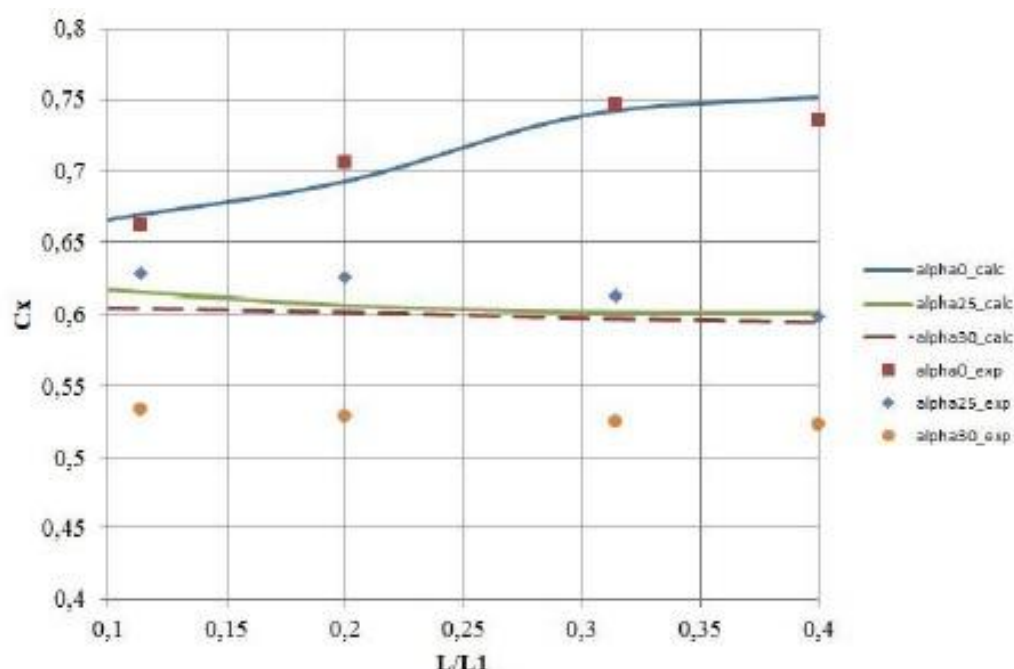


Рис.10 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту сопротивления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании прикладных задач методами компьютерного моделирования необходимо принимать решения о выборе эмпирических констант, требующихся для замыкания используемых математических моделей и расчетных схем. Наиболее перспективным направлением в этой области представляется комбинированный подход, основанный на выборе подходящих простых модельных задач, решаемых параллельно методами физического и численного моделирования, с последующей настройкой параметров вычислительных технологий из условия наилучшего соответствия физическому эксперименту для данного класса задач.

Сбалансированное сочетание расчетов и экспериментов в аэродинамических трубах может привести к значительной экономии времени и средств, затрачиваемых на разработку новых транспортных средств. Построенные численные модели, реализованные алгоритмы и программы могут быть использованы при проектировании транспортных средств, а также для усовершенствования моделей и методов механики жидкости и газа.

Работа выполнена при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. Казань) по гранту Правительства России № 14.Z50.31.0003.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

α – угол установки интерцептора;
 ε – интенсивность турбулентности, %;
 L_1 – длина переднего тела, м;

$h=L/L1$ – безразмерное расстояние между телами, образующими тандем;
 u – скорость потока несжимаемого газа, м/с;
 p – давление газа, Па;
 ρ – плотность газа, кг/м³;
 V_{∞} – скорость газа на входе в расчетную область/скорость газа в аэродинамической трубе, м/с;
 C_x – коэффициент лобового сопротивления модели;
 τ_{ij} – тензор напряжений, м²/с²;
 $\rho u_i' u_j'$ – тензор напряжений Рейнольдса, кг/(м·с²);
 μ_t – турбулентная вязкость, кг/(м·с);
 k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м²/с²;
 ω – удельная скорость диссипации турбулентной энергии, 1/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lanse, W.R., Ross, J.C. & Kaufman, A.E., "Aerodynamic Performance of a Drag Reduction Device on a Full-Scale Tractor/Trailer," SAE Paper 912125, 1991.
2. Saltzman EJ and Meyer RR jr (1999) A reassessment of heavy-duty truck aerodynamic design features and priorities. NASA TP-1999-206574.
3. Ahmed, S.R., Ramm G.: Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300, 1984.
4. Приходько А.А., Сохацкий А.В. Математическое и экспериментальное моделирование аэродинамики элементов транспортных систем вблизи экрана // Днепропетровск: Наука и образование, 1998. - 160 с.
5. Khalighi B. et al. Experimental and computational study of unsteady wake flow behind a bluff body with a drag reduction device. – SAE Technical Paper, 2001. – №. 2001-01-1042.
6. McCallen, R.C., Browand, F., Ross, J. (eds) The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains. Springer, Heidelberg 567 p. (2004).
7. Lienhart H., Stoots C., Becker S. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Modell) //New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III. – Springer Berlin Heidelberg, 2002. – Pp 323-330.
8. Bouferrouk A. On the applicability of trapped vortices to ground vehicles //The International Vehicle Aerodynamics Conference. – Woodhead Publishing, 2014. – С. 101.
9. A.Yun. Theory and practice of modeling turbulent flows. 272 pages. "Librocom". Moscow, Russia. 2009.
10. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. СПб: БГТУ, 2001. Menter, F. R. (1994),
11. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605.
12. M. Peric: Flow simulation using control volumes of arbitrary polyhedral shape, ERCOFTAC Bulletin, No. 62, September 2004.
13. Spiegel M, Redel T, Zhang YJ, et al. Tetrahedral vs. polyhedral mesh size evaluation on flow velocity and wall shear stress for cerebral hemodynamic simulation. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2011;14:9–22