

УДК 66.074.387

ГРНТИ 31.15.35

<https://doi.org/10.47526/2022-2/2524-0080.05>

А.А.ИСАХОВ, А.С.КАЙЫРГАЛИ

Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г.Алматы
e-mail: a_kaiyrgali@kbtu.kz

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЕГО ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. В настоящей работе было произведено численное моделирование аэродинамическое обтекание тела при различных его движения. В ходе проведенного исследования были изучены влияния расстояния между тягачом и прицепом на коэффициент лобового сопротивления и подъемной силы. Общая традиционная модель грузовика была изучена численно в масштабе 1:8. Скорость грузовика рассматривалась как 40 км/ч и 80 км/ч. В заключении была дана качественная оценка, как уменьшение зазора между тягача и прицепа влияет на уменьшение коэффициента сопротивления. В этой статье в качестве тестовой задачи исследуется поток над эталонной моделью, называемой телом Ахмеда с углом наклона 25 градусов. Все полученные результаты были сначала сравнены на тестовых задач, результаты которых отлично согласуются с численными и экспериментальными значениями других авторов. Это исследование могло бы помочь проектировщикам в автомобильной промышленности в применении этих экономически эффективных инструментов для повышения производительности их проектирования.

Ключевые слова: Модели турбулентности, CFD, Кузов Ахмеда, грузовик, аэродинамика автомобиля.

А.А.ИСАХОВ, А.С.ҚАЙЫРҒАЛИ

Қазақ-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
e-mail: a_kaiyrgali@kbtu.kz

ДЕНЕНІҢ ӘРТҮРЛІ ҚОЗҒАЛЫС ЖАҒДАЙЛАРЫНДА АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ АЙНАЛУЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Андатпа. Бұл жұмыста дененің әртүрлі қозғалыстары кезінде аэродинамикалық айналуын сандық модельдеу жүргізілді. Біздің зерттеу барысында трактор мен тіркеме арасындағы қашықтықтың кедергі мен көтеру коэффициентіне әсері зерттелді. Жүк көлігінің жалпы дәстүрлі моделі 1:8 масштабында сандық түрде зерттелді. Жүк көлігінің жылдамдығы 40км/сағ және 80км/сағ деп саналды. Қорытындылай келе, трактор мен тіркеме арасындағы алшақтықтың төмендеуі қарсылық коэффициентінің төмендеуіне

калай әсер ететіндігі туралы сапалы баға берілді. Бұл мақалада сынақ тапсырмасы ретінде Ахмедтің 25 градус бұрышы бар денесі деп аталатын модельдегі ағын зерттеледі. Алынған барлық нәтижелер алдымен тест тапсырмаларымен салыстырылды, олардың нәтижелері басқа авторлардың сандық және эксперименттік мәндеріне жақсы сәйкес келді. Бұл зерттеу автомобиль өнеркәсібінде жобалау өнімділігін арттыру үшін экономикалық тиімді құралдарды қолдануда дизайнерлерге көмектесе алады.

Кілт сөздер: турбуленттік модельдер, CFD, Ахмед шанағы, жүк машинасы, автомобиль аэродинамикасы.

A.A.ISSAKHOV, A.S.KAIYRGALI

Kazakh-British technical university, Kazakhstan, Almaty
e-mail: a_kaiyrgali@kbtu.kz

MATHEMATICAL MODELING OF THE AERODYNAMIC FLOW AROUND A BODY UNDER VARIOUS CONDITIONS OF ITS MOVEMENT

Abstract. In this paper, numerical simulation was performed of the aerodynamic flow around the body at various movements. In the course of our research, the effects were studied of the distance between the tractor and trailer on the coefficient of drag and lift. The general traditional truck model has been studied numerically on a scale of 1:8. The speed of the truck was considered as 40km/h and 80km/h. In conclusion, a qualitative assessment was given of how reducing the gap between the tractor and trailer affects the reduction of the drag coefficient. In this article, as a test problem, we study the flow over a reference model called the Ahmed body with an angle of inclination of 25 degrees. All the results obtained were first compared on test problems, the results of which are in excellent agreement with the numerical and experimental values of other authors. This research could help designers in the automotive industry in applying these cost-effective tools to improve their design productivity.

Keywords: Turbulence models, CFD, Ahmed's body, truck, car aerodynamics.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобиль - самый популярный вид транспорта во многих странах. Однако результат экологических проблем является чрезмерное потребление ископаемого топлива и выбросы этих автомобилей. Для создания эффективных транспортных средств с минимальным расходом топлива, выбросами CO₂ и шумом при сохранении хорошей устойчивости при движении нам необходима оптимизировать внешнюю аэродинамику автомобиля.

Для тяжелого транспортного средства со скоростью 100 км/ч чтобы преодолеть аэродинамического сопротивления необходима около 65% энергии от общих затрат. Снижение экологических проблем таких как, шум и выбросы и повышение экономию топлива может быть достигнуто за счет изменения геометрии и потока транспортного средства. (Banga et al., 2015)[1]. Было подсчитано, что за счет изменения формы транспортного средства коэффициенты аэродинамического сопротивления современных грузовиков могут быть снижены до 50%, что приведет к ежегодной экономии топлива в стране в размере одиннадцати миллиардов литров. (McCallen, R. et al, 2000)[2]. (Cooper,

К., 1982)[3] рассмотрели снижению аэродинамического сопротивления и экономии топлива различных модификаций грузовиков.

На данный момент значительная часть времени разработки автомобилей тратится на оптимизацию. Анализ автомобильной аэродинамики может быть проведен как с помощью эксперимента, так и с помощью компьютерного моделирования. В последние десятилетия вычислительная гидродинамика (CFD) стал экономически эффективным и действенным инструментом для аэродинамического анализа в автомобильной промышленности (Barnard 1996 and Katz 2016)[4]-[5]. Для того чтобы наладить такие процессы разработки в автомобильной промышленности, необходимы надежные имитационные модели, подтвержденные экспериментами. Модельные эксперименты, подходящие для получения валидационных данных, используют модельные тела с геометрией, характеризующейся переменными параметрами, такими как угол наклона сзади. (Meile W et al.)[6].

В этом исследовании для анализа аэродинамики автомобиля используется кузов Ахмеда в качестве эталона. Эта модель была создана (Ahmed and et., 1984)[7], тело Ахмеда было использовано в контрольном тестовом примере для Семинара ERCOFTAC/IAHR по усовершенствованному моделированию потока (Jakirlic et al. 2001, Manceau and Bonnet 2002, Minguez et al. 2008)[8-10]. Это стало полезным тестовым примером для оценки конструкций автомобилей.

2 Материалы и методы

В этой исследовательской работе скорость свободного потока при измерениях составляла $u = 40 \text{ m/s}$, так что число Рейнольдса, основанное на высоте тела H , равно $Re = 768000$ и кинематическая вязкость воздуха равна $\mu_{air} = 15 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Она имеет тот же порядок величины, но несколько ниже, чем величина $Re = 1.2 * 10^6$, использованная в первоначальном эксперименте. Тестовая задача решается с помощью метода RANS (Уравнения Навье-Стокса осредненные по Рейнольдсу), который включает в себя уравнения неразрывности и уравнения движения:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} \quad (2)$$

где u – скорость потока, p - давление, ρ - плотность.

Нижепредставленные уравнения (3)-(4) являются уравнениям переноса турбулентной кинетической энергии. Модель турбулентности SST $k - \omega$ представляет собой модель турбулентной вязкости с двумя уравнениями, которая используется в различных аэродинамических задачах (Menter, 1994)[11]. Это гибридная модель, объединяющая модели Wilcox $k - \omega$ и $k - \varepsilon$. Модель SST $k - \omega$ имеет хорошее поведение при неблагоприятных градиентах давления и отрывном течении. Функция смешивания F1 активирует модель Уилкокса вблизи стенки и модель в набегающем потоке. Соответствующая модель используется во всем поле течения: в областях с сильным ускорением и застоя и хорошо подходит для моделирования течения в вязком подслое.

Турбулентная кинетическая энергия:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

Удельная скорость рассеяния:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_{\omega} v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

(4)

Коэффициенты замыкания и вспомогательные соотношения: (Menter, 1993)[12]

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]$$

(5)

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$$

(6)

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega}, \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right]^4 \right\}$$

(7)

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

(8)

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$$

(9)

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828$$

$$\beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

(10)

3 Постановка задачи

Геометрия модели автомобиля соответствует экспериментам (Lienhart et al.)[13]. Корпус Ахмеда длиной $L = 1044$ мм, высотой $H = 288$ мм и шириной $W = 389$ мм расположен на расстоянии $d = 50$ мм от земли (Рис. 1-2).

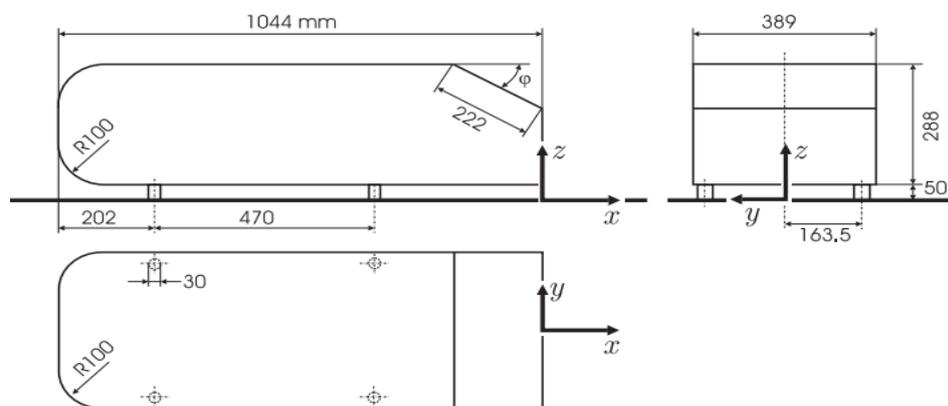


Рисунок 1. Вид кузова Ахмеда сбоку, сзади и сверху вместе с используемой системой координат. Расстояния указаны в мм.

В данной работе для тестовой задачи был выбран угол наклона как 25 градусов. Размеры вычислительной сетки: $\Omega = 8L \times 5H \times 5W$. Чтобы улучшить точности результатов была построена коробка размером $2.5 \times 0.4 \times 0.25$. Расстояние от входного отверстия до фронтальной области равно $2L$. (Рис. 2)

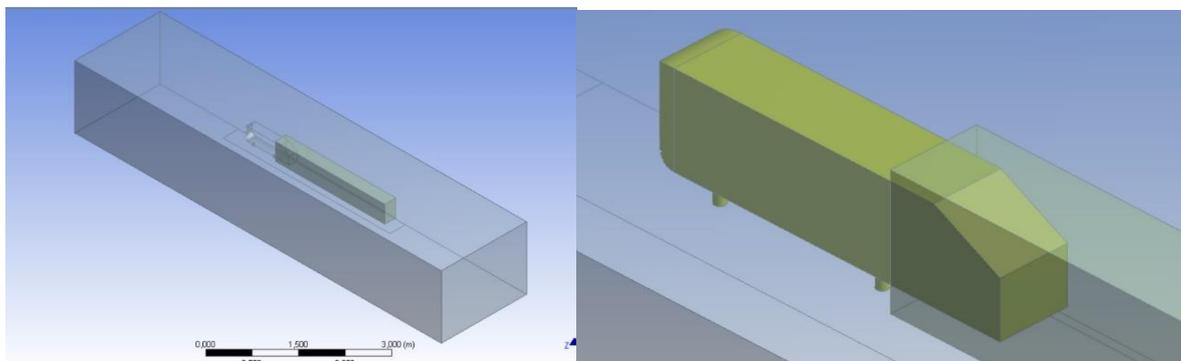


Рисунок 2. Геометрия вычислительной области

Важным шагом для получения точных результатов является дискретизация вычислительной области. Чтобы повысить точности результата, сетки возле кузова Ахмеда и в других областях с высоким уровнем безопасности были сгущены. Для модели потока была использована типичная неструктурированная сетка, а для высокого разрешения турбулентных разделенных пограничных слоев создана расчетная структурированная сетка. (Рис. 3)

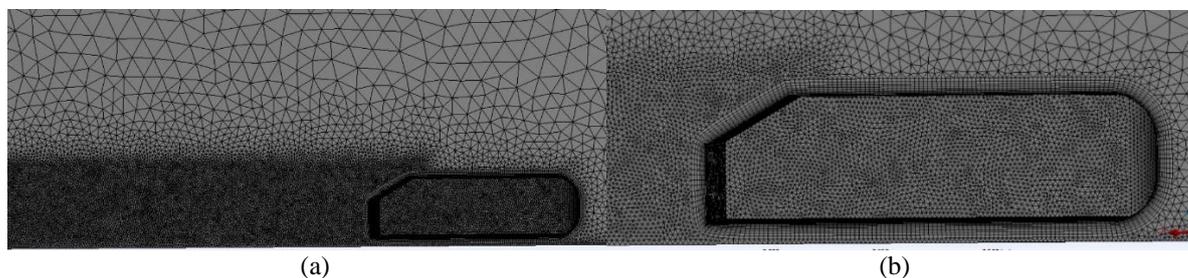


Рисунок 3. Сетка области исследования: (a) Обзор типичной используемой сетки; (b) Увеличенный вид структурированной сетки вокруг кузова Ахмеда

Сравнение успешно достигнуто с экспериментальными (Lienhart et al.) [13] и численными данными (Serre et al., 2013) [14] (Рис. 4). Две французские и две немецкие группы участвовали в тестовых расчетах и в общем анализе, исследовали данную задачу с использованием разных методов. (Minguez M et al. 2008, Guilmineau E., 2008, Hinterberger M, 2004) [10], [15], [16]

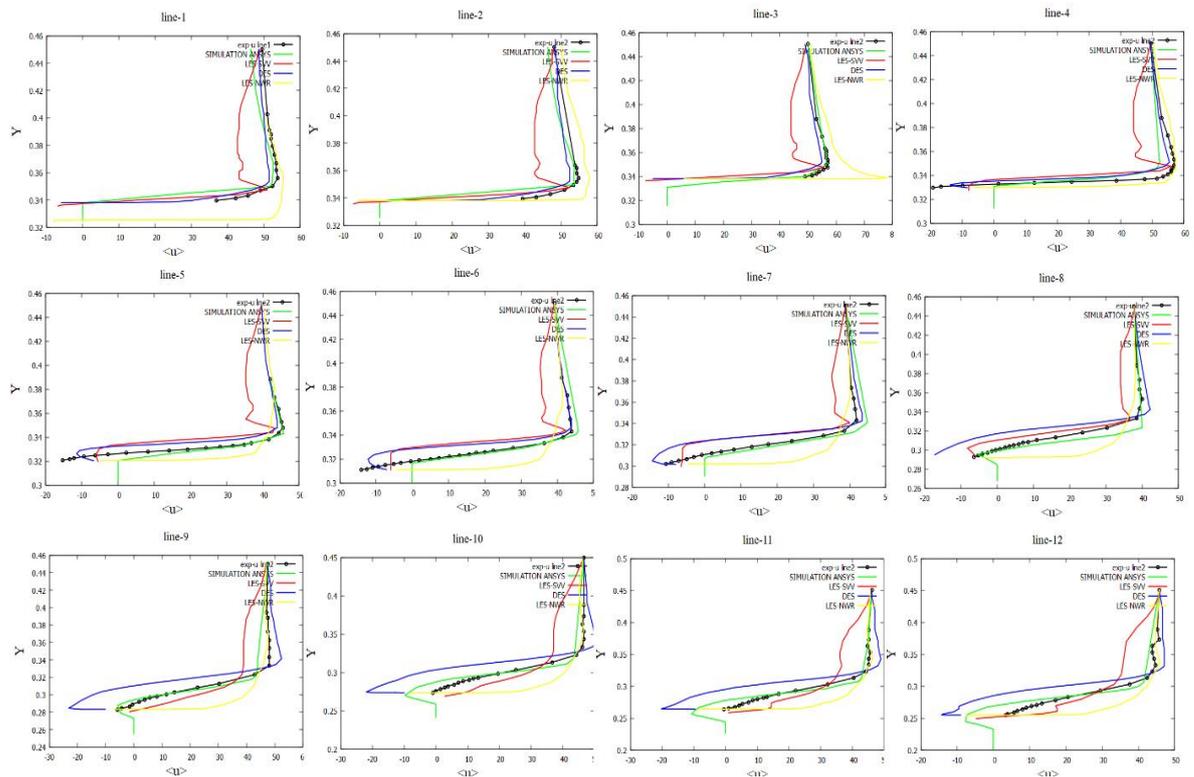


Рисунок 4. Сравнение профилей скорости

- - результаты моделирование, — - E. Guilmineau et al., 2008 - DES
- - M. Kornhaas et.al – LES-NWR — - Hinterberger M, 2004
- - экспериментальные данные (Lienhart et al.)

Распределение давления по кузову Ахмеда показано на рисунке 5(a). В передней части автомобиля давление самое высокое, это означает, что передняя часть кузова соответствует точке застоя. Контуры величины скорости представлены на рисунке 5(b). В передней части автомобиля скорость уменьшается вблизи точки застоя. Контур кинетического турбулентного энергии можно увидеть на рис. 5(c). Рисунок 6 объясняет линии потока вокруг кузова Ахмеда, смоделированные с помощью модели турбулентности SST $k - \omega$.

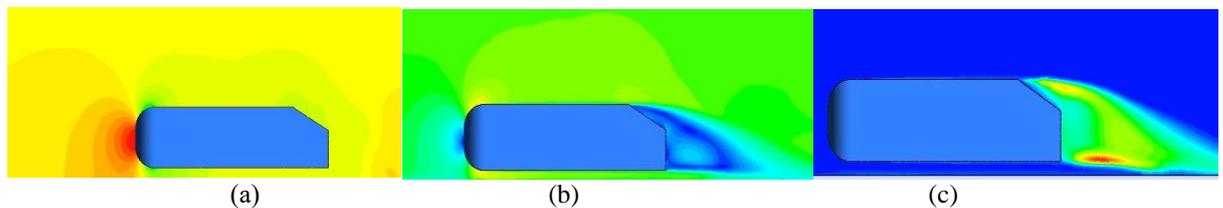


Рисунок 5. (a) Контуры давления; (b) Контуры величины скорости; (c) контуры кинетической энергии турбулентности.

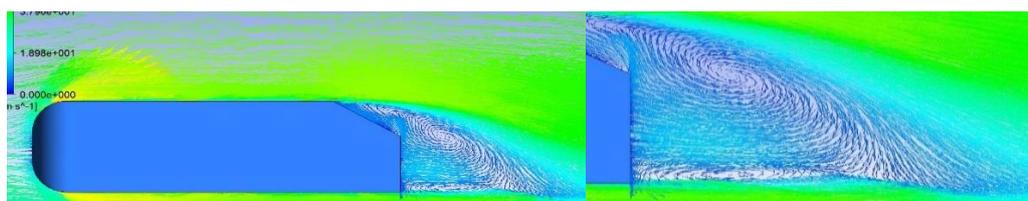


Рисунок 6. Линии потока вокруг кузова автомобиля

Основная задача

Чтобы реализовать основную задачу была построена геометрия грузовика (Storms, 2006)[17]. Модель грузовика представляла собой типовой трактор-прицеп класса 8 с двигателем в масштабе 1:8 (рис 7а). Была упрощена геометрия, чтобы облегчить генерацию сетки и избежать связанных с этим сложностей потока. Была представлена подробная информация на рис. 7б.

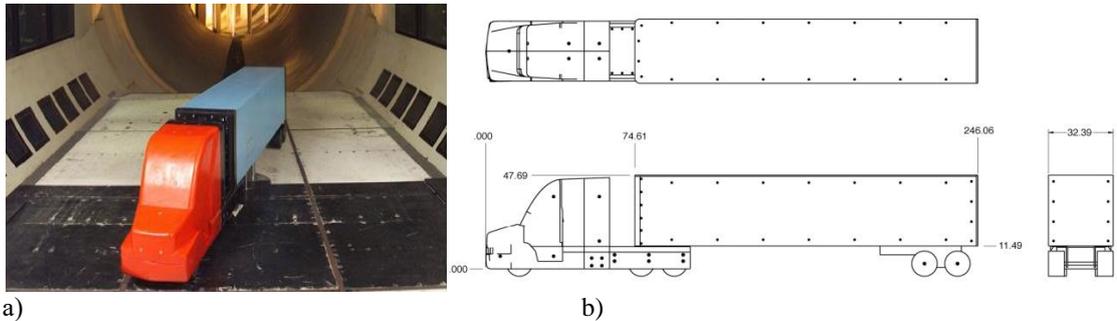


Рисунок 7. а) Общая обычная модель представленная [17] б) Трехмерный чертеж Общей обычной модели (размеры в см).

В данной работе создан грузовик с помощью 3ds max (рис 8а.). В данной работе была использована функция Body sizing и построена неструктурированная сетка, состоящая из 1731380 элементов (рис 8б). Чтобы решить основную задачу была выбрана турбулентная модель SST $k - \omega$. Численный расчет проводился с использованием Coupled связанного алгоритма. Размер временного шага равен 0.001. Общее время вычислений составило один секунд, и результат был визуализирован.

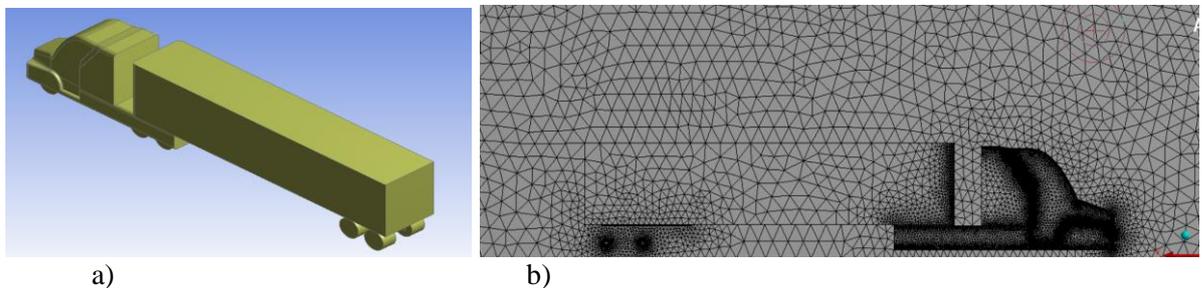


Рисунок 8. а) Трехмерная модель грузовика б) Вычислительная сетка модели

4 Численные результаты

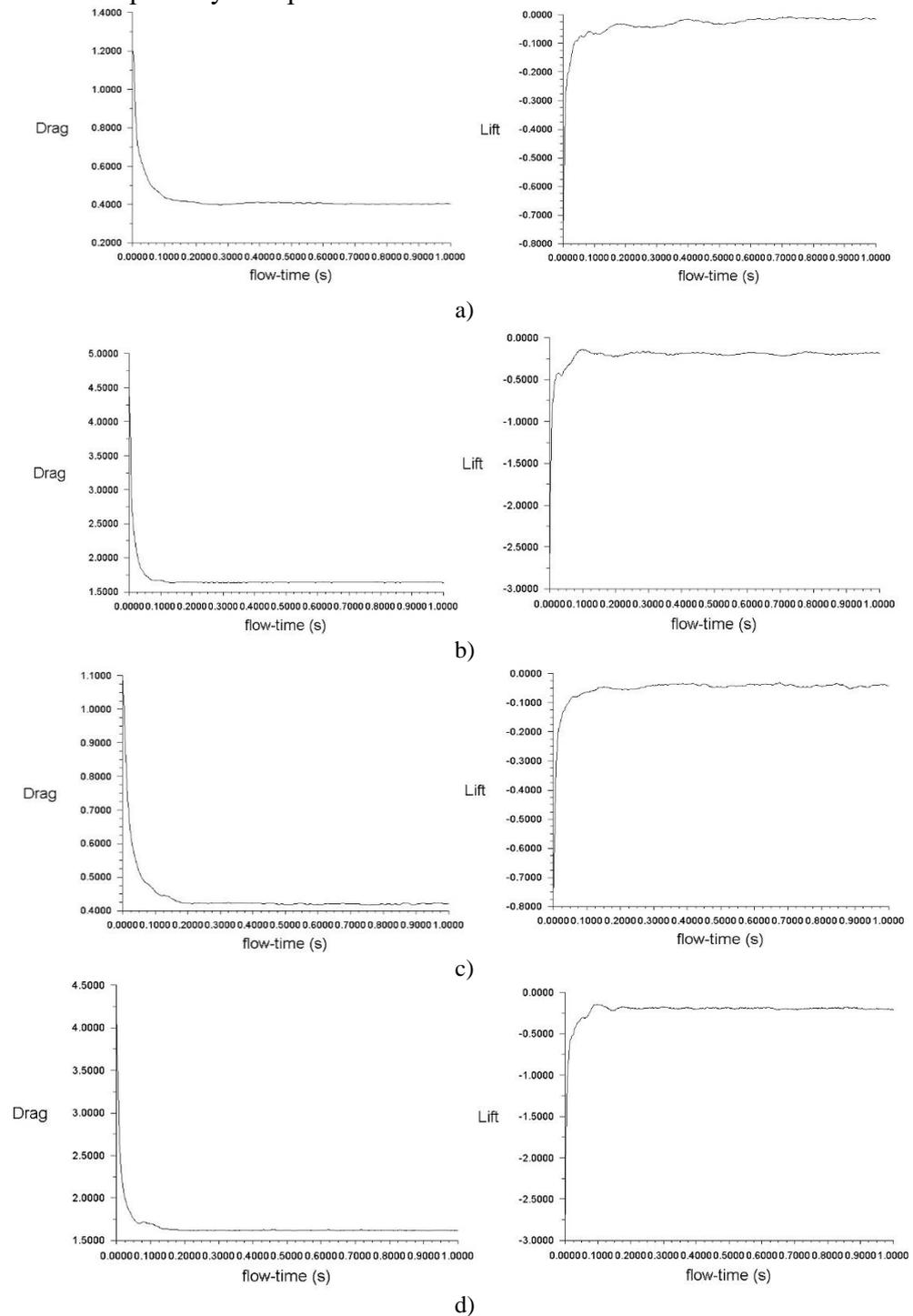
В данной статье грузовик движется со скоростями 40 км/час и 80 км/час. Сравнивались коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы в трех вариантах расстояния зазора между тягача и прицепом. Как видно из результатов, что увеличение процента зазора уменьшает величину коэффициента лобового сопротивления. Подробная информация выведена в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы
скорость With gap 60% gap 95% gap

40 км/час	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl
	0.40298431	-0.0151247	0.42094642	-0.0405857	0.40237863	-0.0519056

80 км/час 1.6354373 -0.1878527 1.6181389 -0.2085753 1.5837601 -0.2574612

Ниже на рис. 9 представлены графики коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы в промежуток времени 1 сек.



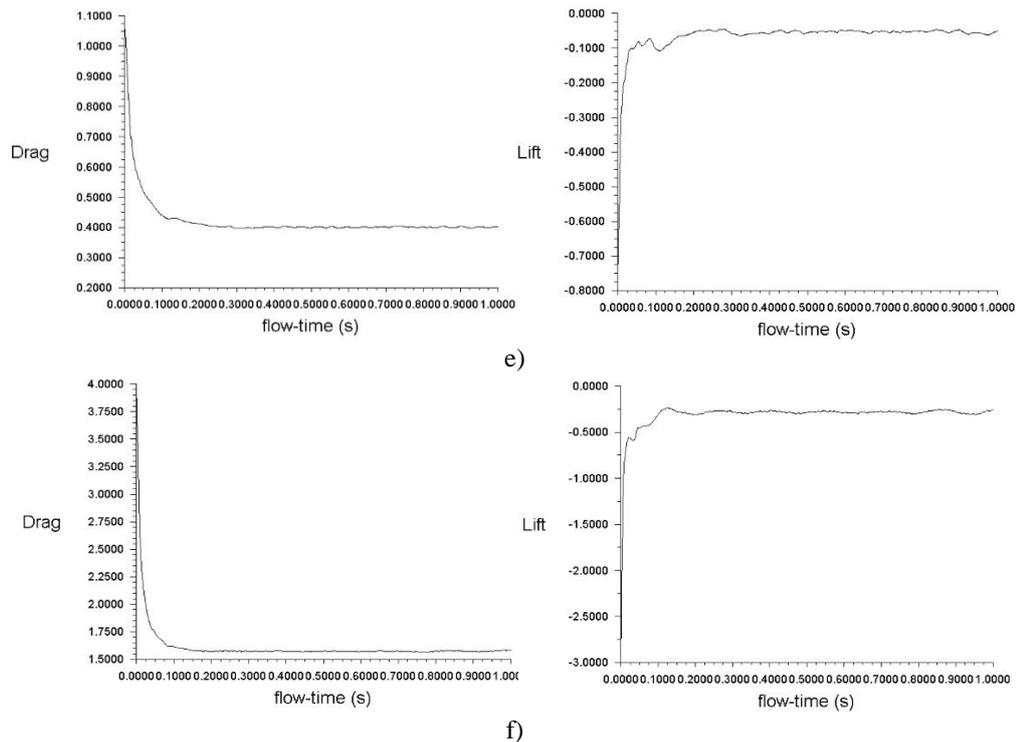


Рисунок 9. Коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы а) с зазором 40 км/час б) с зазором 80 км/час с) 60% зазором 40км/час д) 60% зазором 80 км/час е) 95% зазором 40 км/час ф) 95% зазором 80 км/час

Ниже на рис. 10-12 показаны контуры скорости грузовика и контуры давления вычислительной среды и самого грузовика. Высокое давление влияет на передней части кабины тягача. На рис. 11 можно увидеть обтекания воздухом грузовика.

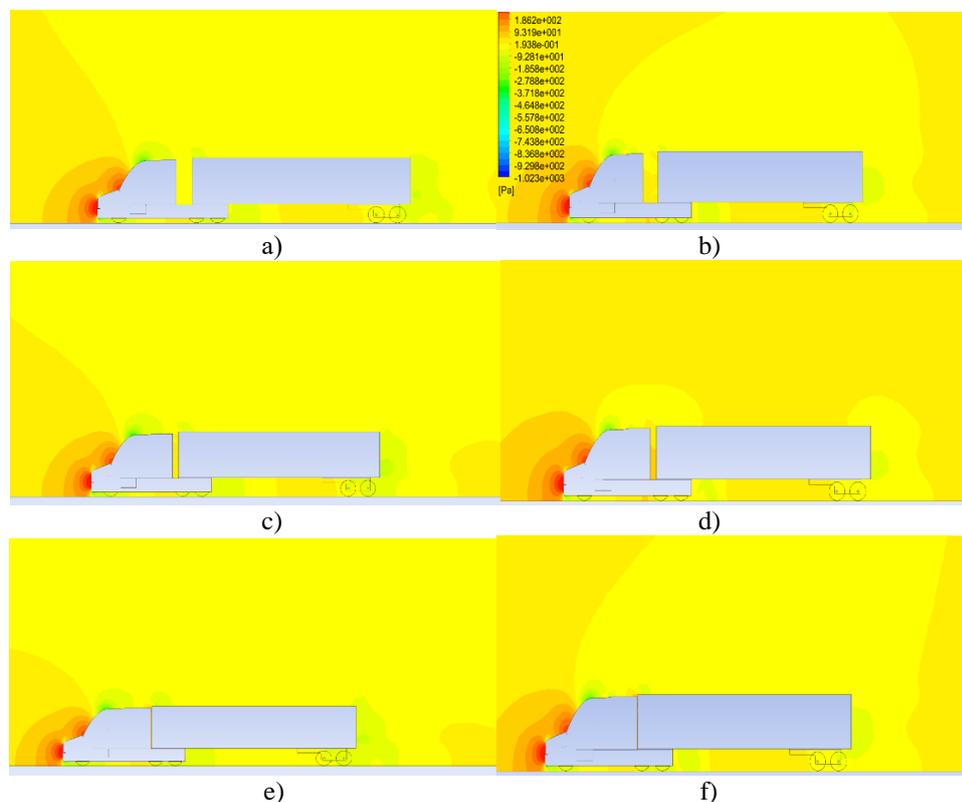


Рисунок 10. Контуры давления а) с зазором 40 км/час б) с зазором 80 км/час с) 60% зазором 40 км/час д) 60% зазором 80 км/час е) 95% зазором 40 км/час ф) 95% зазором 80 км/час

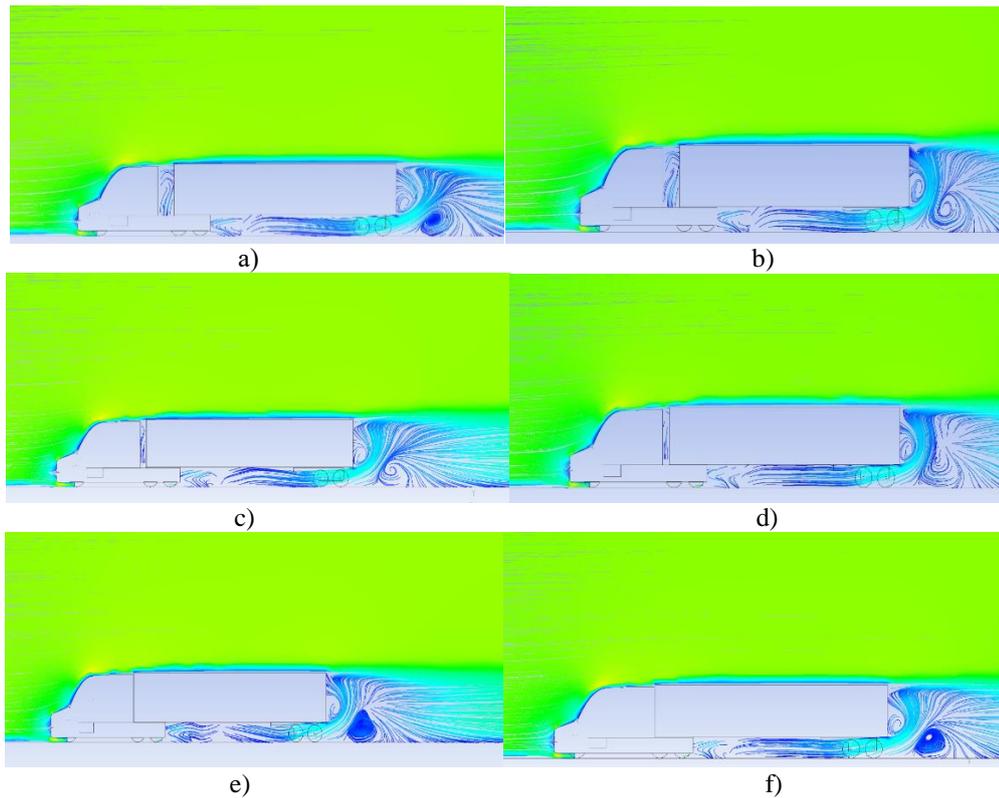
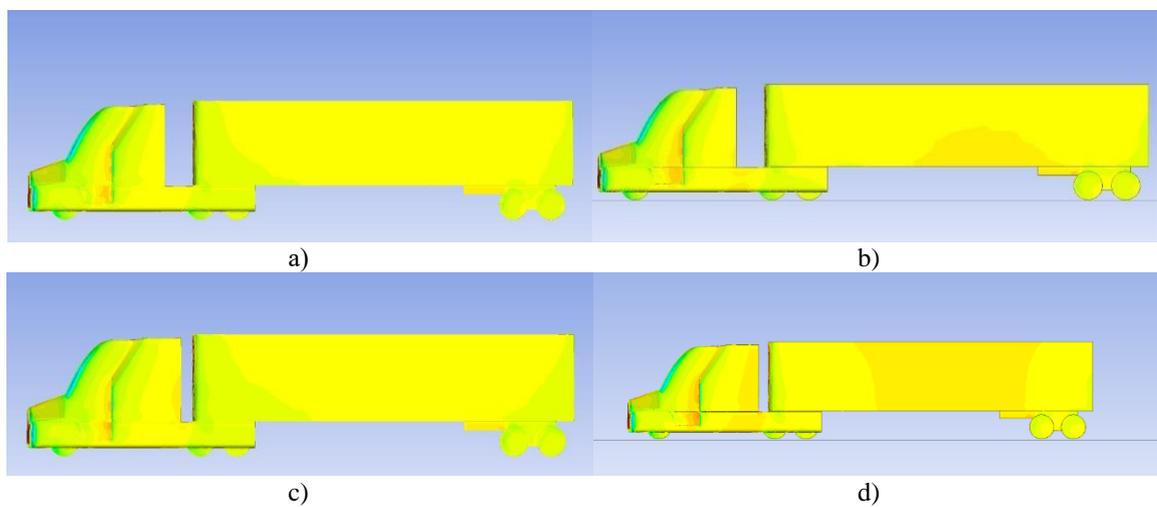


Рисунок 11. Линии потока скорости а) с зазором 40 км/час б) с зазором 80 км/час с) 60% зазором 40 км/час д) 60% зазором 80 км/час е) 95% зазором 40 км/час ф) 95% зазором 80 км/час



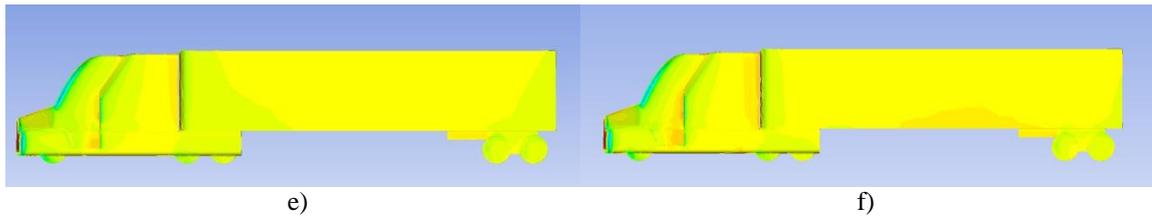


Рисунок 12. Контуры давления грузовика а) с зазором 40 км/час б) с зазором 80 км/час в) 60% зазором 40 км/час г) 60% зазором 80 км/час е) 95% зазором 40 км/час ф) 95% зазором 80 км/час

Заклучение

Общая традиционная модель была изучена численно в масштабе 1:8. Эта модель включала зазор между кузовом и прицепом и упрощенную обычную геометрию кузова для облегчения вычислительного моделирования. Чтобы убедиться правильности алгоритма, была решена тестовая задача с моделью кузова Ахмеда. Для описания движения потока была создана математическая модель. Была построена вычислительная неструктурированная сетка. Экспериментальные и численные результаты успешно совпали. Большое влияние на формирование процесса обтекания воздухом грузовика имеет величина зазоров между кабиной и кузовом и между автомобилем-тягачом и прицепом. Были изучены устройства для уменьшения лобового сопротивления как на базе тягача, так и на прицепе с увеличением зазора между тягачом и прицепом. Используя стандартный алгоритм для учета скорости грузовика, был рассчитан усредненный по ветру коэффициент лобового сопротивления и подъемной силы для всех протестированных конфигураций и сведен в таблицу для удобства сравнения. Подводя итог, по мере того, как пробел между кузовом и прицепом уменьшается, его коэффициент силового сопротивление также уменьшается. Результаты проведенного исследования могут быть использованы в численном моделировании для дальнейшего анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Banga S, Zunaid M, Ansari NA, et al. CFD simulation of flow around external vehicle: Ahmed body. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) 2015; 12(4): 87-94.
2. McCallen, R.; Flowers, D.; Dunn, T.; Owens, J.; Leonard, A.; Brady, M.; Brownad, F.; Hammache, M.; Salari, K.; Rutledge, W.; Ross, J.; Storms, B.; Heineck, J. T.; Driver, D.; Bell, J.; Zilliac, G.; and Walker, S.: Aerodynamic Drag of Heavy Vehicles (Class 7–8): Simulation and Benchmarking. 2000-01-2209, SAE Gov/Industry Meeting, Washington, D.C., June 19–21, 2000.
3. Cooper, K.: The Wind Tunnel Testing of Heavy Trucks to Reduce Fuel Consumption. SAE Paper 821285, November, 1982.
4. Barnard BH. Road Vehicle Aerodynamic Design. London: Longman, 1996.
5. Katz J. Automotive Aerodynamics (Automotive Series). 1st ed. John Wiley & Son, 2016, p.1.
6. Meile W, Brenn G, Reppenhagen A, Lechner B, Fuchs A (2011) Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the ahmed body. CFD Lett. 3(1):32–39.
7. Ahmed SR, Ramm G and Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE Technical Paper 1984.

8. Jakirlic S, Jester-Zucker R and Tropea C. 9th ERCOFTAC/IAHR/COST Workshop on Refined Turbulence Modelling, Darmstadt University of Technology, Germany, 2001.
9. Manceau R and Bonnet JP. 10th Joint ERCOFTAC (SIG-15)/IAHR/QNET-CFD workshop on refined turbulence modelling, Poitiers, France, 2002
10. Minguetz M, Pasquetti R, Serre E. High-order LES of flow over the Ahmed reference body. *Phys Fluids* 2008;20(9):095101-1–095101-17.
11. Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal* 1994; 32(8): 1598-1605.
12. Menter, F. R. (1993), "Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows", AIAA Paper 93-2906.
13. Lienhart H, Becker S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. *SAE paper* 2003-01-0656; 2003.
14. Serre E, Minguetz M, Pasquetti R, et al. On simulating the turbulent flow around the Ahmed body: A French–German collaborative evaluation of LES and DES. *Computers & Fluids* 2013; 78: 10-23.
15. Guilmineau E. Computational study of flow around a simplified car body. *J Wind Eng Ind Aero* 2008;96:1207–17.
16. Hinterberger M, Garcia-Villalba M, Rodi W. Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. In: McCallen R, Browand F, Ross J, editors. *Lecture notes in applied and computational mechanics/the aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains*. Verlag: Springer; 2004. ISBN: 3-540-22088-7.
17. Storms, B.L. Satran, D.R. Heineck, J.T. Walker, S.M. “A Summary of the Experimental Results on a Generic Tractor-Trailer in the Ames Research Center 7-by-10-Foot and 12-Foot Wind Tunnels” NASA/TM-2006-213489 Ames Research Center Moffett Field, CA 2006