



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 624.9:624.042.12
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-1>

Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры



Никита Андреевич Лабутин

*Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.
✉ n_labutin@outlook.com.*

Никита ЛАБУТИН

АННОТАЦИЯ

Проектирование высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) требует обязательного учёта нагрузок от аэродинамического взаимодействия движущегося поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры, действующих как на конструкции и сооружения, так и на сам поезд. Определение характера и интенсивности нагрузки наиболее целесообразно осуществлять в программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики.

В целях определения оптимального подхода к моделированию процессов аэродинамического взаимодействия движущегося высокоскоростного поезда и воздушной среды, а также оценки степени его достоверности, в программном комплексе ANSYS CFX была выполнена серия расчётов с применением различных подходов к построению расчётных моделей (метод

скользящих сеток и метод погруженного тела). Анализ их результатов позволяет определить область рационального применения рассмотренных подходов при разработке расчётных моделей аэродинамического взаимодействия.

Для верификации разработанных расчётных моделей были выполнены экспериментальные измерения аэродинамического воздействия высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на воздушную среду. Также разработанные модели были верифицированы по результатам аналогичных зарубежных экспериментальных исследований. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных измерений позволяет сделать вывод о достаточной степени достоверности разработанных расчётных моделей и возможности их дальнейшего использования.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, высокоскоростные магистрали, высокоскоростной поезд, аэродинамика, аэродинамическое взаимодействие, численное моделирование, моделирование.

Для цитирования: Лабутин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 4 (101). С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-1>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ) предъявляют крайне высокие требования к надёжности, долговечности и безопасности всех составляющих элементов инфраструктуры. Часть этих требований обуславливается необходимостью учёта при проектировании ряда специальных нагрузок и воздействий, что не является обязательным при проектировании обычных (нескоростных) железнодорожных линий. Одной из таких нагрузок является нагрузка от аэродинамического взаимодействия движущегося высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры [1; 2]. Особую важность изучение аэродинамического воздействия, оказываемого высокоскоростным подвижным составом на объекты инфраструктуры, людей, другой подвижной состав и т.д., обретает в связи с проектированием высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург–Москва (ВСЖМ-1) с эксплуатационной скоростью до 360 км/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аэродинамическое взаимодействие движущегося высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры

Движение высокоскоростного поезда сопровождается локальными возмущениями воздушной среды, выраженными образованием вдоль поезда зон повышенного (избыточного) и пониженного (разреженного) давлений. Образование этих областей обуславливается уплотнением и разуплотнением воздушных масс в непосредственной близости от движущегося поезда. Резкая смена областей повышенного и пониженного давлений образуют знакопеременную бегущую воздуш-

ную волну, движущуюся со скоростью, равной скорости поезда. Наиболее ярко выраженные воздушные волны расположены в голове и конце поездов. Также, аналогичные волны, но с меньшими амплитудами величин давлений располагаются у межвагонных промежутков и в местах соединения сочленённых поездов [3–5]. Принципиальный график изменения величины давления вдоль одиночного высокоскоростного электропоезда приведён на рис. 1.

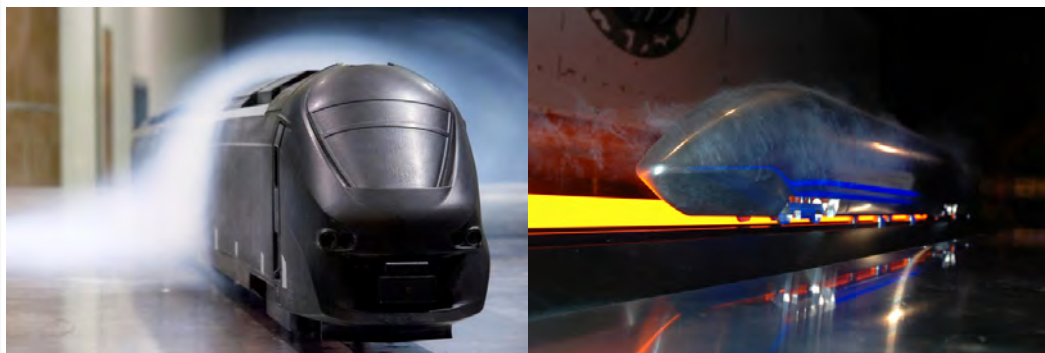
Движущиеся воздушные волны обтекают расположенные в близости от оси пути конструкции и сооружения, что приводит к различным величинам давлений по их контуру в момент времени. Возникшая разность давлений образует полную аэродинамическую силу и полный аэродинамический момент, действующие на рассматриваемое тело [6]. В то же время при обтекании различного рода конструкций есть вероятность возникновения локальных завихрений, способных оказать влияние на динамическую работу рассматриваемой конструкции и на ветровую устойчивость движущегося поезда.

Как правило, наиболее достоверным способом изучения различных аэродинамических явлений является физическое моделирование в аэродинамических трубах и установках (рис. 2).

Однако, так как физическое моделирование является крайне трудозатратным, а часть исследуемых задач (например, моделирование течений вокруг статических тел, вызванных движущимся телом) нереализуемо в аэродинамических трубах [7], а их моделирование на специализированных установках достаточно трудоёмко, необходимо прибегать к методам численного моделирования в специализированных программных комплексах



Рис. 1. Принципиальный график изменения величины воздушного давления вдоль высокоскоростного поезда [разработано автором].



а)

б)

Рис. 2. Испытания моделей поездов в аэродинамических трубах: а – электропоезд на платформе Siemens Velaro, б – электропоезд на платформе Alstom AGV [https://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6710/11006_read-25184/, <https://www.techinsider.ru/technologies/10632-protiv-vetra-aerodinamika/>].

вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Разработка расчётной модели

Численное моделирование в программных комплексах – сравнительно новый метод исследования аэродинамики, получивший широкое распространение в связи с существенным возрастанием вычислительных мощностей. Метод численного моделирования основан на решении системы из уравнений неразрывности воздушной среды, уравнений движения и сохранения энергии, дополняемых уравнениями моделей турбулентности воздушного потока.

Для решения системы уравнений программные комплексы используют метод конечных объёмов, заключающийся в разбитии расчётной области на непересекающиеся контрольные объёмы (рис. 3) [8–9].

Порядок решения задач вычислительной гидрогазодинамики можно разделить на три основных этапа: подготовительный этап,

основной этап и этап постобработки. На подготовительном этапе разрабатывается трёхмерная геометрическая модель рассматриваемой задачи с её последующей дискретизацией (построение расчётной сетки). На основном этапе задаются параметры расчётного эксперимента (модель турбулентности, граничные и начальные условия, временная дискретизация) с последующим расчётом.

На этапе постобработки выполняется построение картин распределения, графиков давлений, скоростей, кинетической энергии и других требуемых характеристик воздушной среды.

В качестве программного обеспечения, позволяющего выполнить полный комплекс работ по численному моделированию аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов, расчёты аэродинамики как в стационарной, так и в нестационарной постановке инфраструктуры, был выбран программный комплекс ANSYS CFX.

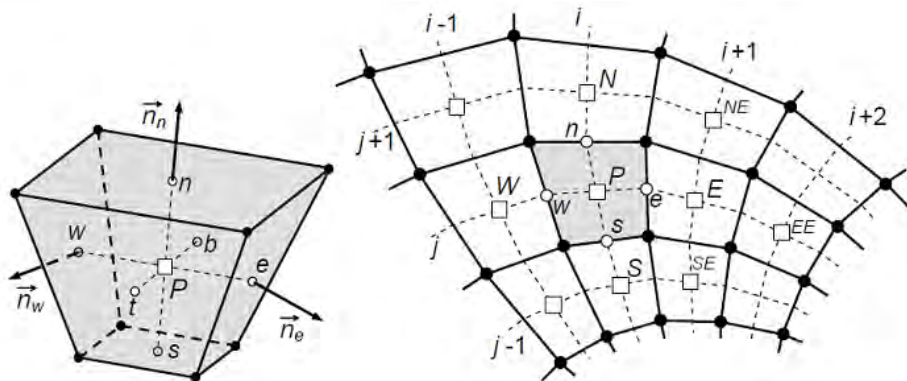


Рис. 3. Сетка контрольных объёмов с привязкой к центру ячеек [9]
(□ – центр объёма, ● – узел сетки, ○ – середина грани).

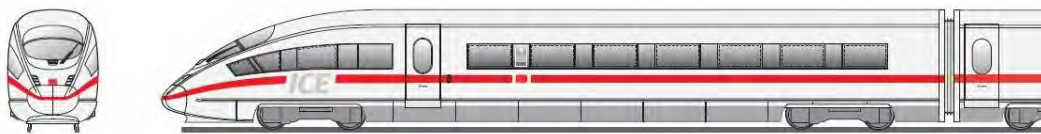


Рис. 4. Высокоскоростной электропоезд на платформе Siemens Velaro [https://german160.wordpress.com/author/mytrainmaster/page/7/].

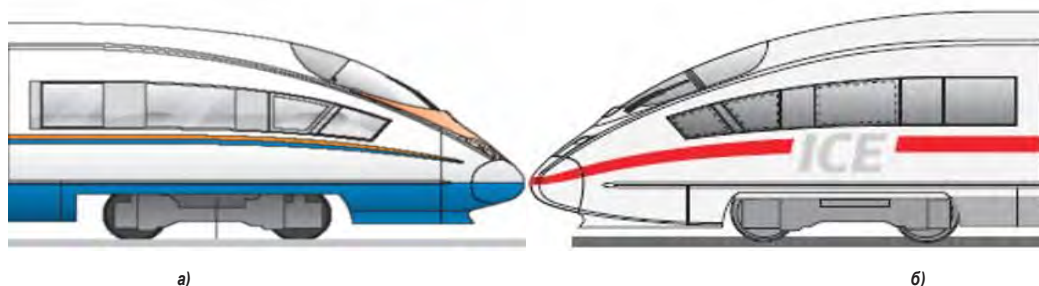


Рис. 5. Форма головного обтекателя высокоскоростного поезда: а – ICE3, б – ЭВС1/2 «Сапсан» [https://german160.wordpress.com/author/mytrainmaster/page/7/, http://emupages.ru/history-technology-highspeed-sapsan.htm; доработано автором].

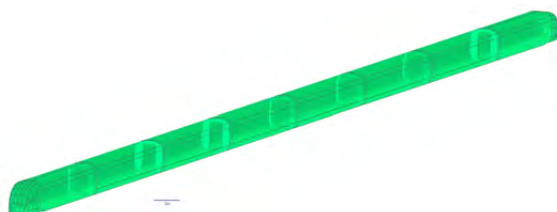


Рис. 6. Разработанная геометрическая модель высокоскоростного электропоезда «Сапсан» [разработано автором].

Разработка геометрической модели высокоскоростного поезда

Расчётным подвижным составом были приняты высокоскоростные электропоезда на платформе Siemens Velaro. На сегодняшний день поезда, сконструированные на этой платформе, эксплуатируются на скоростных и высокоскоростных магистралях Германии (ICE-3), Испании (AVE S-103), Китая (CRH 3) и России (ЭВС 1, ЭВС 2).

Одним из принципиальных факторов при выборе расчётного поезда являлась эксплуатация высокоскоростного поезда ЭВС 1/2 «Сапсан» на существующей сети Российских железных дорог. Одним из существенных отличий «Сапсана» от других одноплатформенных поездов являлось изменение формы головного обтекателя (рис. 5), обусловленное российскими требованиями к эксплуатируемому подвижному составу.

Состав расчётного поезда был принят по восьмивагонной схеме (два головных и шесть промежуточных).

Разработка трёхмерной геометрической модели высокоскоростного поезда выполнена в AutoCAD с последующей доработкой и подготовкой в программе SpaceClaim. Для оптимизации расчётной сетки и сокращения времени расчёта в геометрической модели был сделан ряд упрощений, имеющих локальный эффект и не оказывающих существенного влияния на картину распределения воздушных масс вокруг вагонов поезда. Разработанная геометрическая модель приведена на рис. 6.

Разработка модели на основе метода скользящих сеток

При решении задачи аэродинамического взаимодействия движущегося высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры наиболее удобным и корректным способом моделирования является использование метода скользящих сеток [10–12]. При использовании данного метода расчётная модель разделяется на стационар-





Рис. 7. Принципиальная схема модели на основе модели «ротор–статор» [разработана автором].

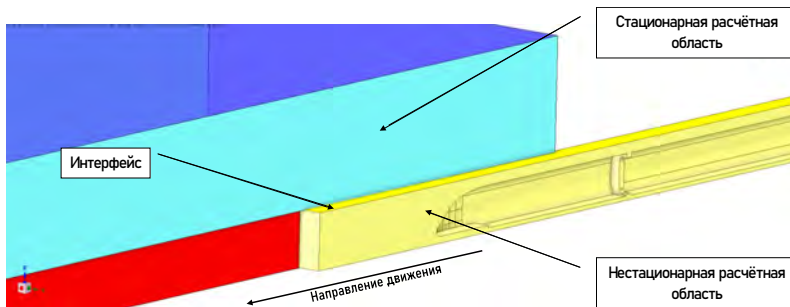


Рис. 8. Схема расчётной модели на основе метода скользящих сеток [разработана автором].

ную и нестационарную составляющие. Нестационарная составляющая представляет собой объём воздуха, из которого вычтен объём, эквивалентный модели поезда, с заданными направлением и скоростью движения. Стационарная составляющая представляет собой фрагмент воздушной среды с расположенными в нём рассматриваемыми объектами инфраструктуры, в котором вырезан «тоннель» для движения в нём нестационарной составляющей модели. Взаимодействие стационарной и нестационарной частей модели осуществляется через сеточный интерфейс. Наиболее точная работа сеточного интерфейса достигается при вращательном относительном движении расчётных областей (модель «ротор–статор»). Таким образом, при задании движения нестационарной части расчётной модели по окружности большого радиуса (более 1000 км) может быть смоделировано её линейное движение (рис. 7).

Такой подход требует крайне точной проработки геометрии расчётной области ввиду кривизны поверхностей контактных интерфейсов. Также, для определения аэродинамической силы и момента, действующих на поезд, необходимо задание индивидуальной динамической системы координат для каждого вагона расчётного поезда. С учётом вышеперечисленных факторов было решено прибегнуть к заданию движения нестационарной

части модели не как вращательного по бесконечно большому радиусу, а как поступательного с заданием движения через команды на языке программирования CFX CCL. Принципиальная схема разработанной расчётной модели приведена на рис. 8.

Основным достоинством использования данного метода является возможность проработки пограничного слоя как вокруг рассматриваемых сооружений и конструкций, так и непосредственно вокруг самого движущегося поезда. Задание пристеночных слоёв у вагонов позволяет получить корректный градиент давлений на стенках вагонов и, как следствие, величины силы и момента, действующих на них, что позволяет наиболее корректно решать задачи аэродинамической устойчивости движущегося по мостам (или насыпям) высокоскоростного поезда при боковом ветре и задачи аэродинамического взаимодействия поезда и пролётных строений с ездой понизу (например, решетчатые фермы).

В качестве модели турбулентности, описывающей неупорядоченность движения воздушных масс, для рассматриваемой задачи была выбрана наиболее часто используемая в задачах архитектурно-строительной аэродинамики и аэродинамики подвижного состава универсальная модель SST, демонстрирующая высокую точность и достоверность

как в пристеночных течениях, так и на отдалениях от стенок [13–16].

При разработке модели было смоделировано движение поезда вдоль земной поверхности. Принятый уровень земной поверхности соответствует отметке головки рельса (1,1 м от уровня автосцепки/маски головного обтекателя для электропоезда «Сапсан»). Так как в рассматриваемой задаче определяющими являются величины экстремальных давлений головной и хвостовой воздушных волн, расположенных выше уровня головного обтекателя, моделирование верхнего строения и насыпи пути не выполнялось.

Для верхней и боковых граней расчётного воздушного объёма были заданы открытые граничные условия «opening», обеспечивающие возможность обратных течений на поверхности. Для нижней грани воздушного объёма (поверхности земли) заданы граничные условия «free slip wall», для поверхности электропоезда принято граничное условие «no slip wall».

Число Рейнольдса для разработанных моделей находится в диапазоне от $12,3 \cdot 10^6$ (при скорости поезда 200 км/ч) до $15,4 \cdot 10^6$ (при скорости 250 км/ч). Число конечных объёмов расчётной модели составило 1,2 млн для стационарной области и 7,5 млн для подвижной области. Размер сеточных элементов на поверхности поезда не превышал 0,01 м. Размер сеточных элементов воздушного массива переменный – от 0,05 до 0,5 м со сгущением в области движущегося домена. Пограничный слой у поверхностей поезда детально не прорабатывался, так как его задание не является определяющим при расчётах аэродинамических нагрузок на окружающую инфраструктуру.

Задача рассматривалась в нестационарной постановке в диапазоне физического времени 6...10 с. Шаг по времени составлял 0,005 с. Число Куранта C_o не превышало 2.

Разработка модели на основе метода погруженного тела

Модель на основе скользящих сеток позволяет получить наиболее полную и достоверную картину взаимодействия высокоскоростного подвижного состава как с точки зрения воздействия на инфраструктуру, так и воздействия на подвижной состав. Однако применение метода скользящих сеток является достаточно затратным с точки зрения

вычислительных ресурсов и времени решения задачи, так как на каждом временном шаге требуется перестройка расчётной сетки.

Вместе с тем, при определении величины аэродинамического воздействия только на объекты инфраструктуры задание и моделирование пристеночного слоя вокруг высокоскоростного поезда не является обязательным. Данное допущение позволяет применить модель погруженного тела («immersed solid»), в которой модель поезда, представленного твёрдым телом, помещается в расчётный воздушный объём с заданием ему направления и скорости движения в этом объёме. Принцип работы данной модели заключается в формировании расчётной сетки для воздушной области и расчётного поезда с их дальнейшим перекрытием. Далее решатель на каждом временном шаге определяет перекрывающиеся узлы воздушной области и устанавливает в них скорость воздуха, равную скорости движения твёрдого тела.

Суммарное количество элементов расчётной модели составляет 24,1 млн ячеек. Размер ячеек расчётной области находится в диапазоне от 0,5 м до 0,01 м (сгущение к области движущегося тела). Максимальный размер элемента поезда составляет 0,01 м. Числа Рейнольдса и остальные граничные условия расчётного воздушного объёма и параметры нестационарной постановки (физическое время, шаг времени и т.д.) определены аналогично задаче с применением метода скользящих сеток. Число Куранта не превышало 3.

Экспериментальная верификация разработанных расчётных моделей

Для оценки степени достоверности результатов, полученных при использовании разработанных расчётных моделей, была выполнена их верификация по результатам экспериментальных измерений аэродинамического воздействия на воздушную среду высокоскоростного электропоезда «Сапсан» [17].

Экспериментальные измерения были выполнены на отдельных участках железной дороги Санкт-Петербург–Москва с установленными скоростями движения от 200 до 250 км/ч. Выбор мест измерений был осуществлён совместно с сотрудниками Мостоиспытательной станции № 1 Октябрьской железной дороги. Предварительно был выполнен анализ действующих установленных



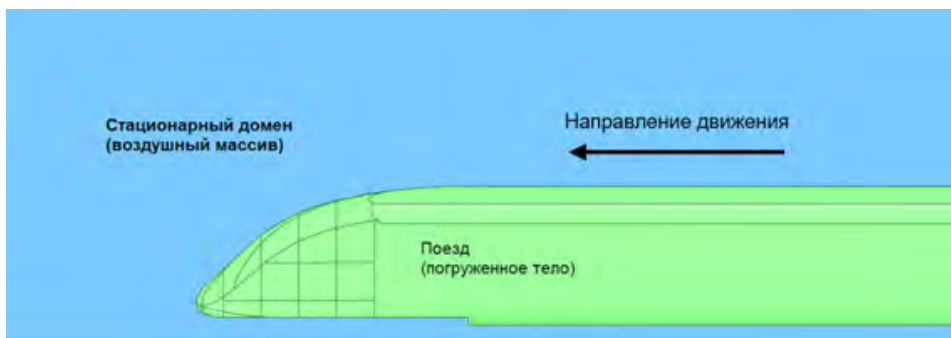


Рис. 9. Схема расчётной модели на основе метода погруженного тела [разработано автором].



Рис. 10. Процесс измерения аэродинамического воздействия от высокоскоростного электропоезда «Сапсан» [выполнено автором].

скоростей движения и наличия возможных мест изменения поездом скорости (опасные места, станции, кривые, работы на пути) на рассматриваемых участках. Таким образом, определённые для измерений места находились на участках равномерного движения. Дополнительно учитывалась скорость движения поездов по результатам графиков выполненных измерений (по расстоянию между головной и хвостовой воздушными волнами). Отклонение фактической скорости движения от установленной на участке составляло не более 4 км/ч (в меньшую сторону).

Измерения осуществлялись высокочастотными мембранными датчиками избыточного давления, устанавливаемыми в непосредственной близости от оси пути. Процесс измерений представлен на рис. 10.

Результаты измерений представляют собой графики изменения величины избыточного давления в неподвижной точке при прохождении высокоскоростного поезда. Пример графика приведён на рис. 11.

Путём обработки результатов измерений были получены картины распределения экстремальных величин избыточного давления и давления разрежения для скоростей движения от 200 до 250 км/ч в зависимости от расстояния от оси пути и высоты над уровнем головки рельса. Пример распределения величины избыточного давления при движении электропоезда «Сапсан» на скорости 250 км/ч представлен на рис. 12.

Для верификации разработанных расчётных моделей в них были заданы условия движения поезда и точки измерения, соответствующие скорости движения и местам установки датчиков при натурных измерениях. Временной шаг был установлен соответствующим частоте измерения датчиков (1 кГц). Таким образом, были смоделированы проезды поезда на скоростях 200, 220 и 250 км/ч с измерением давления в фиксированных точках. Сравнительные картины распределения давлений в уровне головы поезда для двух расчётных моделей приведены на рис. 13–15.

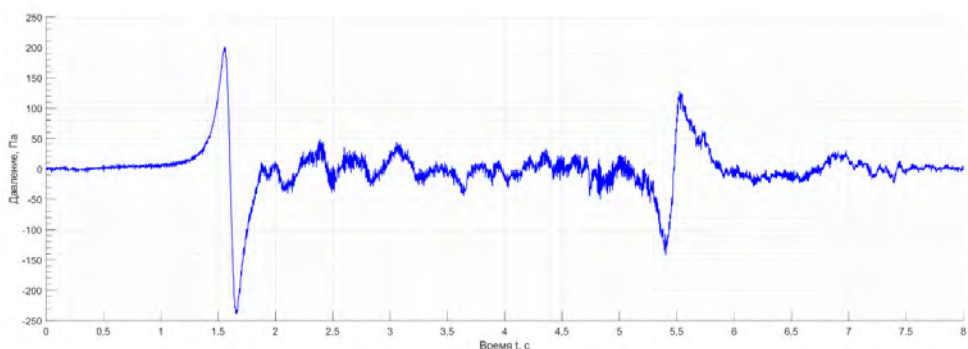


Рис. 11. График изменения величины давления при движении высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на скорости 250 км/ч [выполнено автором] [17].

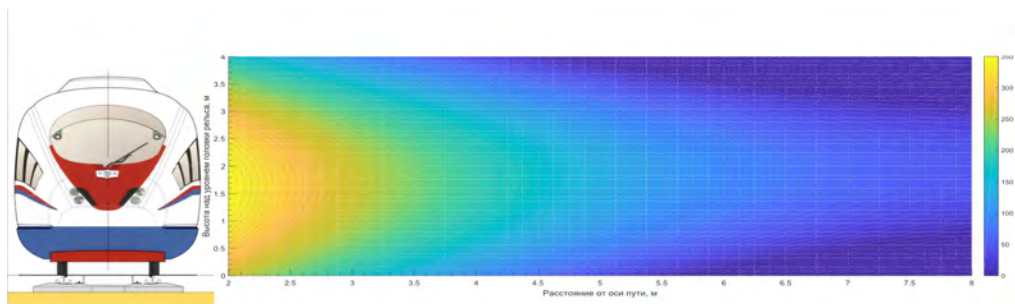


Рис. 12. Распределение величины избыточного давления при движении высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на скорости 250 км/ч [выполнено автором].

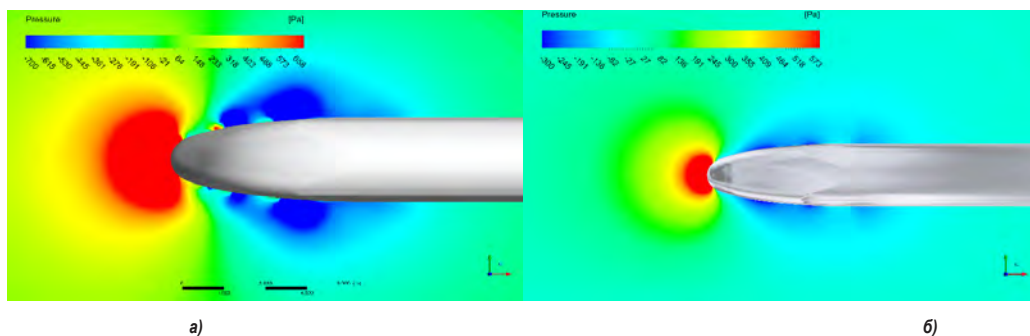


Рис. 13. Распределение давлений у первого вагона расчётного поезда на высоте 1,1 м при скорости 200 км/ч (а – метод погруженного тела, б – метод скользящих сеток) [выполнено автором].

Полученные изображения демонстрируют качественно похожую картину распределения давления вокруг поезда, но, за счёт более детальной дискретизации сетки и проработки пограничного слоя вокруг поезда, модель с использованием метода скользящих сеток демонстрирует более детальное и точное распределение давлений у поверхности вагона, что прямым образом влияет на определение величины аэродинамических сил, действующих на поезд.

Результаты сопоставления экспериментальных и расчётных величин экстремальных

давлений в точках измерения приведены на рис. 16 и в табл. 1.

Разброс величины расхождения обуславливается локальными условиями местности и окружения на местах экспериментальных измерений (наличие в непосредственной близости от мест измерений служебных помещений, устройств электроснабжения, станционных и эксплуатационных обустройств). Максимальная величина расхождения составляет 15 %, среднее расхождение не превышает 10 %.

Также, для верификации разработанных расчётных моделей в более широком диапазоне



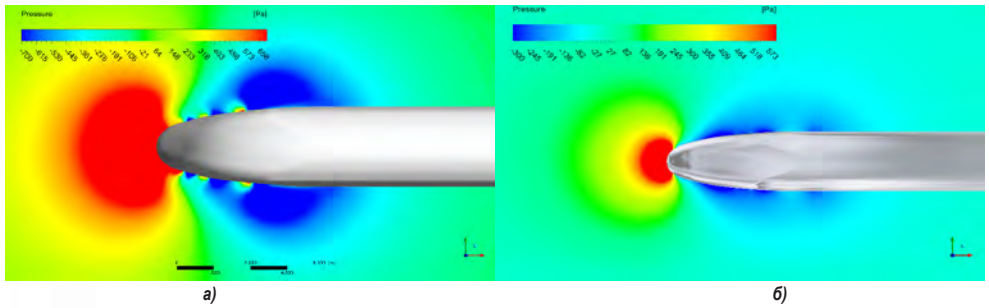


Рис. 14. Распределение давлений у первого вагона расчётного поезда на высоте 1,1 м при скорости 220 км/ч (а – метод погруженного тела, б – метод скользящих сеток) [выполнено автором].

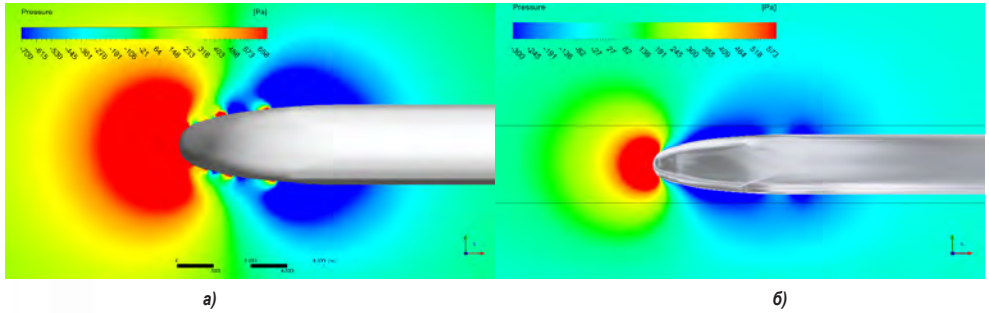


Рис. 15. Распределение давлений у первого вагона расчётного поезда на высоте 1,1 м при скорости 250 км/ч (а – метод погруженного тела, б – метод скользящих сеток) [выполнено автором].

Таблица 1

Результаты сопоставления экспериментальных и расчётных величин экстремальных давлений [выполнено автором]

Скорость	Расстояние от оси пути, м	Высота над уровнем головки рельса, м	Расхождение, %			
			модель погруженного тела		модель скользящих сеток	
			максимальное давление	минимальное давление	максимальное давление	минимальное давление
200	3,3	3,1	9	4	13	10
	3,4	2,15	13	12	10	14
	3,4	2,5	12	8	8	15
	3,8	2,6	14	2	15	11
	4	1,3	1	1	12	5
	7,1	4,2	9	12	4	14
220	3,5	2,15	15	1	1	7
	7,5	3,1	13	13	15	10
	7,5	2,4	1	10	14	7
	8	2,6	14	9	10	2
	8,5	2,15	3	10	2	15
250	2,4	2,7	11	5	11	5
	3,1	2,4	14	15	3	12
	3,4	1,7	12	15	7	15
	4,2	1,5	5	15	13	5
	9,2	1,5	14	15	2	10

скоростей, было выполнено сравнение полученных в программном комплексе результатов с данными зарубежных экспериментальных измерений аэродинамического воздействия при прохождении высокоскоростного поезда ICE3

при скорости 300 км/ч (рис. 17) [18]. Величина расхождения между экстремальными значениями составляет не более 8 %.

Таким образом, из результатов верификации следует, что разработанные расчётные



Рис. 16. Сопоставление величин избыточного давления в контрольно-измерительной точке, полученных численно и экспериментально для высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на скорости 250 км/ч (расстояние от оси пути 3,1 м, высота над уровнем головки рельса 2,4 м) [выполнено автором].

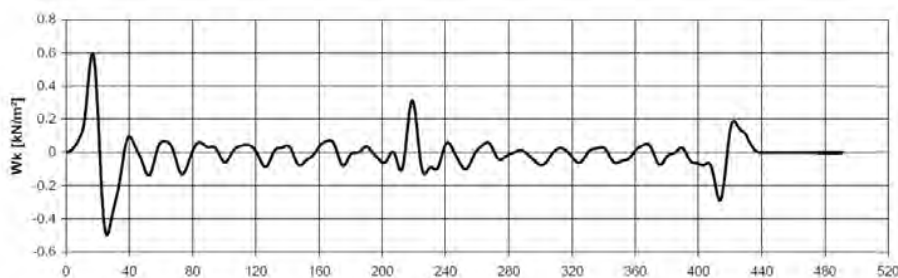


Рис. 17. График величины давления по длине высокоскоростного электропоезда, движущегося со скоростью 300 км/ч [18] (по оси x – длина электропоезда, y – величина давления).

модели обладают достаточной степенью достоверности и могут быть использованы при решении задач аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с воздушной средой и объектами инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены различные подходы к численному моделированию аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава, воздушной среды и объектов инфраструктуры. Разработанные расчётные модели были верифицированы на основе экспериментальных измерений аэродинамического воздействия высокоскоростного электропоезда «Сапсан» и результатов аналогичных зарубежных исследований. Наибольшая величина расхождения между расчётными и экспериментальными величинами составляет не более 15 %, что позволяет сделать вывод о достаточной достоверности разработанных моделей.

Сравнение двух различных подходов (метод скользящих сеток и метод погруженного тела) к моделированию аэродинамики движущегося поезда относительно неподвижных объектов даёт возможность сделать выводы о целесообразности их применения в зависимости от постановки задачи.

Так, для определения величины аэродинамической силы и момента, действующих на вагоны расчётного поезда, необходимо использовать метод скользящих сеток, позволяющий сформировать пограничный слой вблизи стенок вагонов и получить наиболее корректную картину распределения воздушных масс и, как следствие, достоверные величины воздействия на подвижной состав.

Для определения степени аэродинамического воздействия на различные объекты инфраструктуры предполагается использование метода погруженного тела. Такой подход не позволяет смоделировать пограничный слой вокруг стенок расчётного поезда и, как следствие, получить достоверные величины аэродинамических нагрузок на подвижной



состав. Однако при определении степени аэродинамического воздействия на инфраструктуру данный фактор не является обязательным. Также метод погруженного тела требует существенно меньших вычислительных и временных затрат, что делает его наиболее рациональным при решении задач определения аэродинамического воздействия на конструкции и сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Смирнов В. Н., Дьяченко А. О., Дьяченко Л. К. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // БРНИ. – 2017. – № 3. – С. 69–81. [Электронный ресурс]: <http://brni.info/download/выпуск-24.pdf> (полный текст номера). Доступ 03.07.2022.
- Ватулина Е. Я., Комиссаров Е. В., Поляков Б. О., Ватулин Я. С. Проектирование защитных сооружений приближенных строений железнодорожной инфраструктуры на основе методики оценки аэродинамического влияния высокоскоростного подвижного состава // Вестник научных конференций. – 2016. – № 4–2. – С. 26–34. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26083569>. Доступ 03.07.2022.
- Лазаренко Ю. М., Капускин А. Н. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 4. – С. 11–14. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17876171>. Доступ 03.07.2022.
- Baker, C. J. A review of train aerodynamics. Part 1 – Fundamentals. The Aeronautical Journal, 2014, Vol. 118, Iss. 1201, pp. 201–228. DOI: <https://doi.org/10.1017/S00019240000909X> [ограниченный доступ].
- Baker, C. J. A review of train aerodynamics. Part 2 – Application. The Aeronautical Journal, 2014, Vol. 118, Iss. 1202, pp. 345–382. DOI: <https://doi.org/10.1017/S000192400009179> [ограниченный доступ].
- Казакевич М. Н. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
- Айрапетов А. Б., Катунин А. В. Исследование картины аэродинамического взаимодействия скоростного поезда, движущегося под конструкцией автомобильного путепровода на установке прямого движения // Материалы XXVII науч.-техн. конференции по аэродинамике, г. Жуковский, Московская область, 21–22 апреля 2016 года. Центральный Аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ): 2016. – С. 23–24. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26232990>. Доступ 03.07.2022.
- Смирнов Е. М., Зайцев Д. К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости. – 2004. – № 2. – С. 1–22. [Электронный ресурс]: <https://aero.spbstu.ru/publ/smironov3.pdf>. Доступ 03.07.2022.
- Gullberg, R. Computational Fluid Dynamics in OpenFOAM. Mesh Generation and Quality. TKP 4555 Advanced Process Simulation. Norwegian University of Science and Technology. Final Report, 2017. [Электронный ресурс]: https://folk.ntnu.no/preisig/HAP_Specials/AdvancedSimulation_files/2017/project%20reports/CFD/Rebecca%20Gullberg%20-%20CFD_Mesh_Report.pdf. Доступ 03.07.2022.
- Khayrulina, A., Blocken, B., Janssen, W., Straathof, J. CFD simulation of train aerodynamics: Train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, Vol. 139, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.
- Iliadis, P., Hemida, H., Soper, D., Baker, C. Numerical simulations of the separated flow around a freight train passing through a tunnel using the sliding mesh technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, Vol. 234, Iss. 6, pp. 638–654. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719851421>.
- Yebo, Liu; Hemida, H., Zhiming, Liu. Large eddy simulation of the flow around a train passing a stationary freight wagon. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013, Vol. 228, Iss. 5, pp. 535–545. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713488096>.
- Вальгер С. А., Фёдоров А. В., Фёдорова Н. Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. – 2013. – № 5. – С. 27–40. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20345326>. Доступ 03.07.2022.
- Локтев А. А., Королев В. В., Поддаева О. И., Степанов К. Д., Черников И. Ю. Математическое моделирование аэродинамического поведения антенномачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. – 2018. – № 2 (77). – С. 77–83. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-2-77-83.
- Maleki, S., Burton, D., Thompson, M. C. Assessment of various turbulence models (ELES, SAS, URANS and RANS) for predicting the aerodynamics of freight train container wagons. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, Vol. 170, pp. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.008> [ограниченный доступ].
- Zampieri, A., Rocchi, D., Schito, P., Somaschini, C. Numerical-experimental analysis of the slipstream produced by a high-speed train. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, Vol. 196, art. 104022. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104022 [ограниченный доступ].
- Лабутин Н. А., Дьяченко Л. К., Ланг А. В. Экспериментальные измерения аэродинамики подвижного состава // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (62). – С. 40–48. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_62_40.
- Hoffmeister, B. Lärmschutzwände an Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahn – eine Herausforderung für den Leichtbau. D-A-CH Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Erdbeningenieurwesen und Baudynamik. Vienna, 27–28 September 2007, pp. 1–11. [Электронный ресурс]: http://oge.or.at/pdf/d-a-ch_2007/05_Laermschutzwaeende-an-Hochgeschwindigkeitsstrecken_eine-Herausforderung-fuer-den-Leichtbau.pdf/. Доступ 03.07.2022.

Информация об авторе:

Лабутин Никита Андреевич – инженер, аспирант кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, n_labutin@outlook.com.

Статья поступила в редакцию 06.07.2022, одобрена после рецензирования 06.09.2022, принята к публикации 10.09.2022.

• Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 4 (101). С. 6–16

Лабутин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры