

## Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей

А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, К. А. Сотников

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Воробьев А. А., Сотников К. А. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123

### Аннотация

**Цель:** Разработка математических моделей, позволяющих исследовать процессы аэроупругого взаимодействия, подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей в динамической и квазистационарной постановке с использованием метода деформируемых подвижных сеток и метода «замороженного» ротора (Frozen Rotor). **Методы:** Представлены описание математических моделей и способы их реализации в двухмерной и трехмерной постановке в программных комплексах Comsol Multiphysics и Solid Works Flow Simulation на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS (Reynolds averaged Navier — Stokes Method)). **Результаты:** Приведены результаты численных исследований полей скоростей и давлений вблизи порталной зоны тоннеля, полученные с помощью разработанных математических моделей для случая входа подвижного состава в тоннель. **Практическая значимость:** Выявлено, что при входе поезда в тоннель разгон воздушных масс подвижным составом осуществляется со значительной задержкой вследствие действия сил вязкого трения между воздухом и стенками тоннеля, а также внутри объема воздуха, заполняющего тоннель.

**Ключевые слова:** Аэродинамические расчеты, аэроупругое взаимодействие, метод конечных объемов RANS, деформируемые подвижные сетки, численное моделирование.

Создание транспортных коммуникаций значительной протяженности оптимизированных по критерию эффективности энергопотребления в настоящее время является важнейшей задачей развития железнодорожного транспорта [1, 2]. Основным ограничивающим фактором организации высокоскоростных магистралей является необходимость преодоления контурных препятствий местности, который решается устройством тоннельных сооружений, позволяющих значительно сокращать протяженность трасс, обеспечивать безопасность и бесперебойность движения транспорта в любых климатических условиях с обеспечением необходимого скоростного режима.

Строительство и эксплуатация тоннельных сооружений сопряжена с рядом проблем в области проектирования, условий возведения и особенностью их эксплуатации. В этой связи особенно значимо выделяются вопросы, связанные с

аэроупругим взаимодействием высокоскоростного поезда с сооружениями прилегающей инфраструктуры.

На участках трассы с резким изменением габарита проходного сечения отверстий (тоннелей) происходит ускоренное вытеснение объемов воздушной среды поступательно движущимся корпусом поезда, что вызывает формирование волн сжатия и расширения текучей среды, которые в литературе [9, 10, 14–17] получили название волн давления. При этом характер распределения волн давления и их скорость в существенной степени зависят от сочетания скорости движения подвижного состава, длины тоннеля и значения коэффициента блокирования (отношение площадей поперечного сечения тоннеля и поезда). Следует отметить, что часть указанных волн может отражаться от порталных частей тоннелей и двигаться навстречу подвижному составу, создавая повышенное сопротивление движению. Это, в свою очередь, приводит к повышению расхода энергии на тягу и причиняет значительный дискомфорт пассажирам [14–17].

Задача исследования аэроупругого взаимодействия подвижного состава с объектами периферии не является новой. Существующие численные исследования отечественных и зарубежных ученых [3, 6–18] основное внимание уделяют уточнению коэффициентов аэродинамического сопротивления подвижного состава с целью улучшения качества тяговых расчетов. При этом для снижения вычислительных затрат математические модели объектов рассматриваются со значительно редуцированными свойствами, а задача решается, как правило, в стационарной или квазистационарной постановке. С этими же целями большинство задач решается в двухмерной плоскопараллельной [3, 12] или осесимметричной [3, 6, 8, 11] постановке.

Вместе с тем в работах [10, 15] отмечается, что адекватная картина распределения динамических характеристик аэроупругого взаимодействия объектов может быть получена только в трехмерной постановке. В качестве методов моделирования состояния текучей среды в данном случае применяется метод обратимости [9, 10], а также Frozen Rotor — метод «замороженного» ротора [4]. Указанные методы имеют довольно ограниченный круг применимости, в основном для задач аэродинамики на открытом пространстве. Существенные ограничения возникают и при описании динамики взаимодействия движущейся стенки с увлекаемыми объемами вязкой среды воздушных масс, находящихся в зазоре между неподвижной и подвижной поверхностью тоннеля и поезда [15–18]. Для получения более точной и адекватной картины необходим переход к решению нестационарной задачи.

Решение задачи в подобной постановке в настоящее время отсутствует, что делает актуальной тему настоящей работы.

Как уже отмечалось, применяемые методики анализа взаимодействия обтекаемых объектов с текучей средой на основе эффекта «обратимости», успешно

применяемой в практике расчета летательных аппаратов, оказываются неэффективными, поскольку в данном случае инициация деформирования воздушной среды осуществляется со стороны корпуса движущегося состава. В случае аэроупругого взаимодействия движущегося подвижного состава и тоннеля, в том числе его порталной части, движение воздушных масс происходит в зазоре между подвижной и неподвижной поверхностями (поезд и тоннель), что вызывает условия формирования сложных продольно-поперечных вихревых структур, препятствующих прохождению воздушных масс. Методика Frozen Rotor, успешно определяющая характеристики динамического напора воздушных масс, недостаточно корректно учитывает характеристики статической составляющей давления, а также не учитывает начальные динамические условия состояния текучей среды.

Выходом из сложившейся ситуации является численное моделирование аэродинамических процессов в трехмерной (или двухмерной) нестационарной постановке с помощью метода конечных элементов (программный пакет Comsol Multyphysics) или метода контрольных объемов (Solid Works Flow Simulation).

Расчет скорости жидкости в заданном объеме осуществляется с помощью уравнений Навье — Стокса [7]. В общем случае, когда вектор скорости направлен произвольно, уравнение Навье-Стокса в векторной форме, записанное для случая несжимаемой вязкой ньютоновской жидкости, имеет вид:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = \mu \Delta \vec{V} - \nabla P + \vec{f}, \quad (1)$$

где  $P$  — давление,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\mu$  — кинематическая вязкость,  $g$  — ускорение свободного падения,  $V$  — скорость жидкости;  $f$  — вектор массовых сил, которые, помимо силы тяжести, могут иметь различную природу [5] (электрические, магнитные и пр.).

Для получения поля скоростей и давлений указанной жидкости уравнение (1) решают совместно с уравнением непрерывности, которое имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{V} = 0. \quad (2)$$

Данные уравнения решаются численно. При выполнении моделирования применены следующие допущения:

Воздушная среда считается несжимаемой.

Нормальная составляющая скорости к поверхности стенок принимается равной нулю, что означает непроницаемость твердой стенки. Тангенциальная составляющая скорости потока на стенке равна соответствующему значению

тангенциальной составляющей скорости стенки. Проскальзывание среды вдоль стенки отсутствует. Неподвижные движущиеся стенки расчетной области при этом считаются гладкими.

На поверхностях, имитирующих открытые границы, применены условия отсутствия тангенциальных напряжений, для которого характерно свободное движение воздушных потоков по нормали к поверхностям, имитирующим открытую границу, в оба направления.

Воздух рассматривается как Ньютоновская жидкость, где сила вязкого трения  $\tau$  определяется как касательная сила трения, отнесенная к единице поверхности раздела слоев жидкости [7]. Данная сила пропорциональна изменению скорости в направлении нормали к плоскости, которая ориентирована по течению.

Температура воздуха во всей расчетной области постоянна и равна 20 °С. Значение кинематической вязкости  $\mu$  воздуха при этом равно  $18,1 \cdot 10^{-6}$  Па · с.

Конвекционные процессы и влияние гравитации оказывают пренебрежимо малое влияние.

Для решения задач аэроупругого взаимодействия движущихся объектов в нестационарной постановке необходимо задать начальные значения давления и скорости воздуха на границах и внутри области. Ввиду сложностей, возникающих для получения начальных условий при выполнении указанных расчетов в нестационарной постановке, применены два метода задания начальных условий: метод установления, подразумевающий разгон движущегося объекта от нулевой скорости в начальный момент времени, и использование нулевых начальных условий, метод квазиустановления, где начальные условия для нестационарной задачи получают исходя из решения задачи в стационарной постановке путем увеличения скорости движущейся поверхности по определенному алгоритму [5]. Строго говоря, наиболее адекватным и точным является первый из описанных методов, поскольку полученные значения скоростей наиболее полно соответствуют физической картине процесса. При этом пограничный слой воздуха вокруг движущегося объекта при использовании метода установления формируется автоматически вследствие плавного нарастания скорости. Данное утверждение подтвердила серия численных экспериментов, где варьировалось значение ускорения при движении подвижного состава. При высоких значениях ускорения наблюдалось расхождение решения вследствие ошибок при расчете пограничного слоя.

Процедуры дискретизации расчетной области (построение сетки конечных элементов) является важным этапом при выполнении численного моделирования аэродинамических процессов, поскольку он напрямую определяет затраты вычислительных ресурсов [5]. Сама процедура создания сетки является одним из наиболее ресурсоемких этапов при настройке и расчете модели [5], а ее характер в значительной степени зависит от типа решаемой задачи и применяемых расчетных средств.

Так, при решении ряда задач в SolidWorks Flow Simulation, который использует метод конечных объемов, расчетная сетка создавалась преимущественно из тетраэдров с призмами в пристеночных областях. Это позволило минимизировать ошибки за счет использования встроенных алгоритмов осреднения. Размеры сетки выбирались исходя из условия минимума 10 ячеек на одно «ребро». При этом типичными размерами ячеек считались 10–30 см на поверхности поезда, 5–10 см в подвагонном пространстве при необходимости учета локальных эффектов и порядка 50–100 см и более на удалении нескольких метров от поезда. При перемещении объектов на каждом шаге расчета автоматически рассчитывается изменение взаимного расположения границ и узлов.

При построении сеток при наличии поступательно движущихся тел в программе Comsol использован интерфейс Movingmesh (подвижная сетка) [5] построение движущейся деформируемой сетки выполнено на базе гексаэдрических элементов. Движущийся объект сложной формы окружен прямоугольной областью, в которой выполнена дискретизация с помощью тетраэдров (трехмерная постановка) или триангуляция для случая двухмерной постановки. Эта область сетки движется с той же скоростью, что и объект, не деформируется, а значит, нет необходимости в ее перестроении. Слева и справа от области, окружающей зону, где находится исследуемый объект, введены недеформируемые области с тетраэдрическим разбиением, которые движутся со скоростью объекта.

Неподвижные объекты окружены неподвижной сеткой. Для построения сетки, граничащей с левой и правой неподвижными стенками расчетной области, применена деформируемая сетка на базе гексаэдрических элементов. Созданы два домена с площадями поперечного сечения в плоскости  $y_z$ , равными площади поперечного сечения недеформируемых движущихся областей в указанной плоскости. Длина этих объектов изменяется, причем левый растягивается, а правый сжимается таким образом, чтобы правая граница левого домена и левая граница правого двигались с теми же скоростями, что и движущиеся недеформируемые области. Левая граница левого домена и правая граница правого домена при этом неподвижны. Закон деформации сетки в указанных доменах в направлении движения подвижного объекта при этом определяется по закону билинейной интерполяции.

Данным способом выполняется дискретизация расчетных областей, имитирующих тоннель или открытое пространство. В случае имитации тоннеля на торцах зон 1 и 5 задаются либо граничное условие openboundary в случае близкого расстояния края расчетной области от портала или вентиляционной шахты, либо граничное условие Movingwall с нулевой скоростью движения, что имитирует длинный тоннель с высоким аэродинамическим сопротивлением. В случае имитации открытого пространства применяется openboundary.



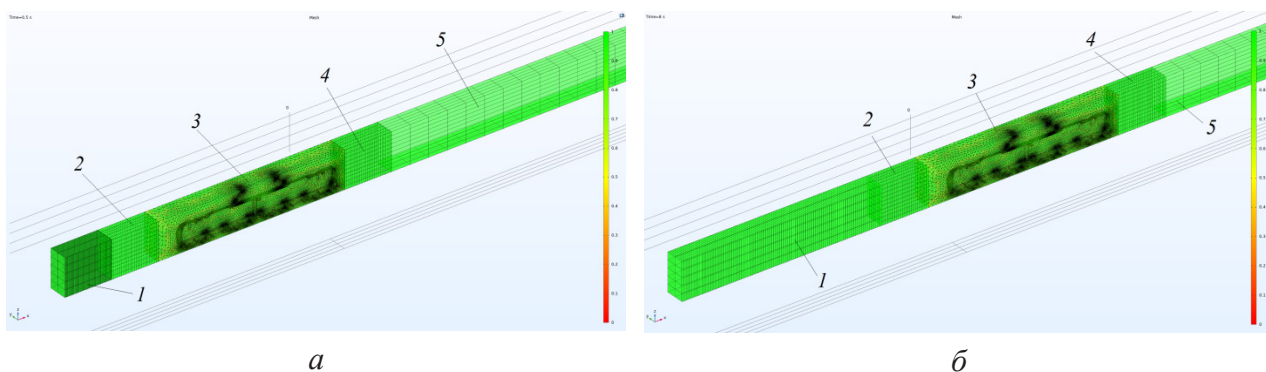


Рис. 1. Деформация сетки при движении электровоза с постоянной скоростью: положение доменов при 0,5 с от начала расчета (*а*) и 8 с (*б*).  
1, 5 — деформируемые домены; 2–4 — движущиеся недеформируемые области

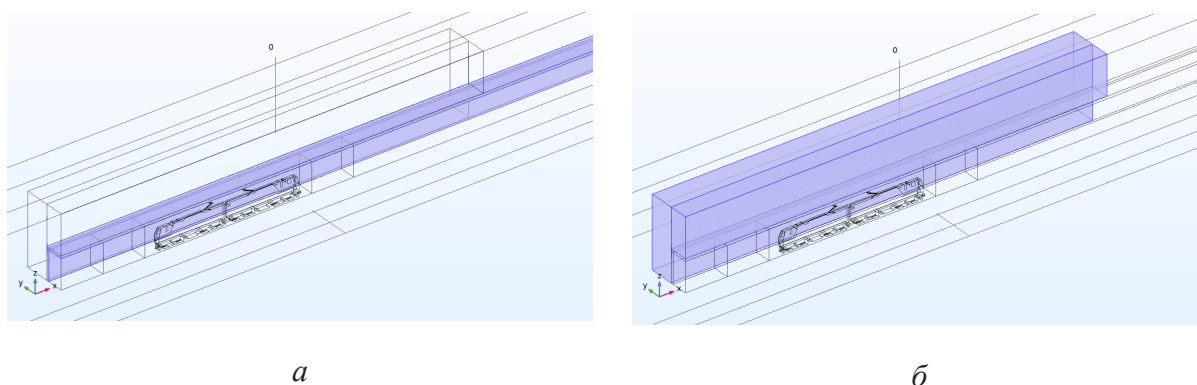


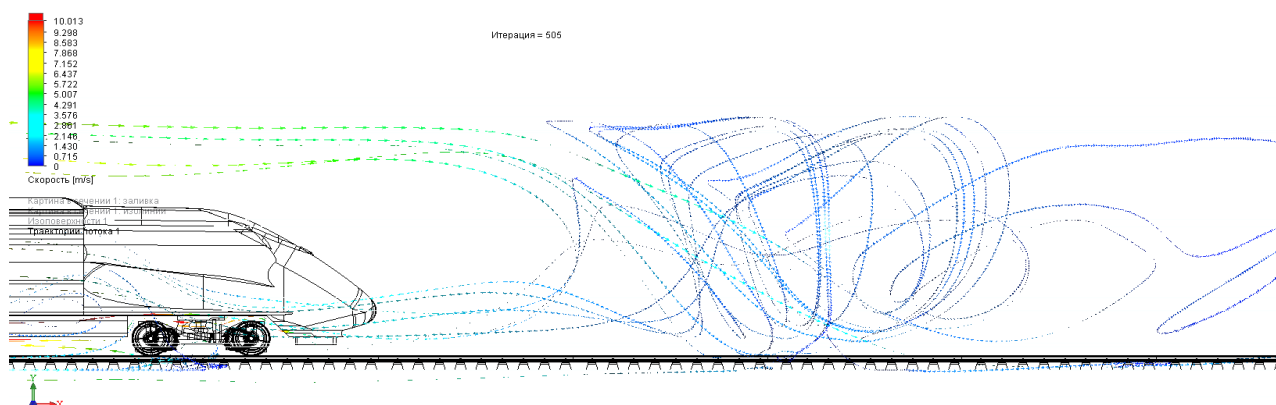
Рис. 2. Буферная зона (*а*) и зона, моделирующая открытое пространство (*б*) при моделировании захода электровоза в тоннель

Намного более сложным является описание комбинированных структур, например порталных участков тоннелей. Здесь необходимо сочетать граничные условия типа Movingwall и openboundary в пределах длины расчетной области переходят одно в другое. Задать их одновременно на поверхностях модели, представленной на рис. 2, напрямую не представляется возможным. Для решения задачи применяется следующий подход: зоны движущихся и деформируемых областей окружают буферной зоной, представляющей собой домен с неподвижной сеткой. В качестве примера на рис. 2, *а* данная зона выделена фиолетовым цветом. Эта буферная зона, в свою очередь, контактирует уже с доменами, имитирующими открытые области или моделирующие объекты путевой инфраструктуры. На рис. 2, *б* в качестве примера представлен домен, имитирующий открытое пространство (выделен фиолетовым цветом). На внутренней границе буферной зоны, а также на границах разделения остальных доменов задается граничное условие непрерывности потока.

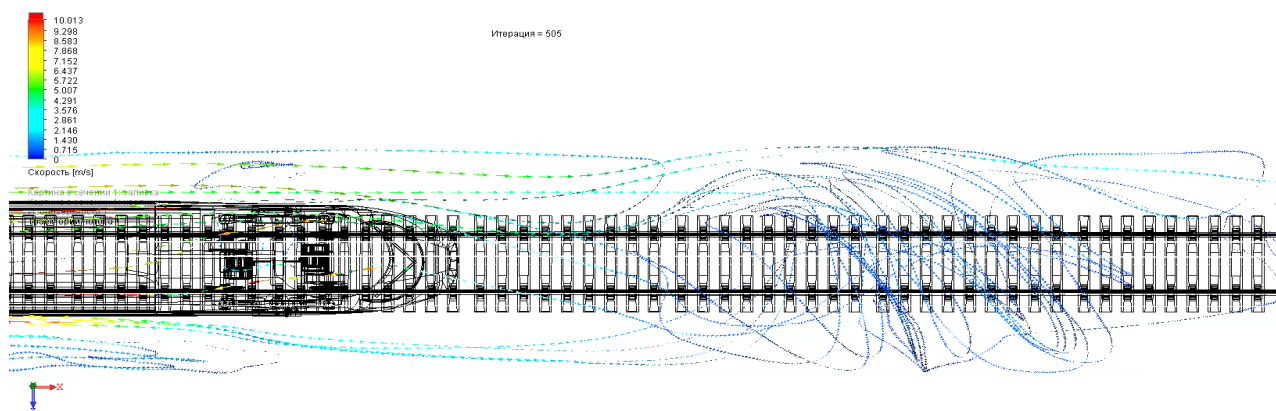
При решении задач в SolidWorks Flow Simulation методом Frozen Rotor, предполагающим рассмотрение мгновенного временного среза процесса относительно

движения объектов по определенному радиусу вокруг одной из осей локальной системы координат. Метод использует моделирование крупных вихрей (LES) конечных объемов.

Результаты расчета методом Frozen Rotor (рис. 3) показали, что процесс вытеснения воздушных масс головным обтекателем поезда формирует зону уплотнения перед обтекателем, вызывает рост статической составляющей давления и, как следствие, изменение траектории движения увлеченных воздушных масс поездом, которые принимают спиралевидную форму с переменным шагом.



*a*



*б*

Рис. 3. Эпюры траекторий движения воздушных масс в зазоре «поезд — тоннель» при формировании «поршневого» эффекта перед обтекателем поезда:  
*a* — вид сбоку, *б* — вид сверху (тоннель условно не показан)

Выявлено, что при достижении некоторого энергетического равенства статической и динамической компоненты давления формируется обратное течение части воздушной среды в противоположном направлении движения поезда, в основном в подвагонном пространстве состава. Процесс многократно интенсифицируется за счет наличия значительного разряжения в хвостовой части поезда (рис. 4).

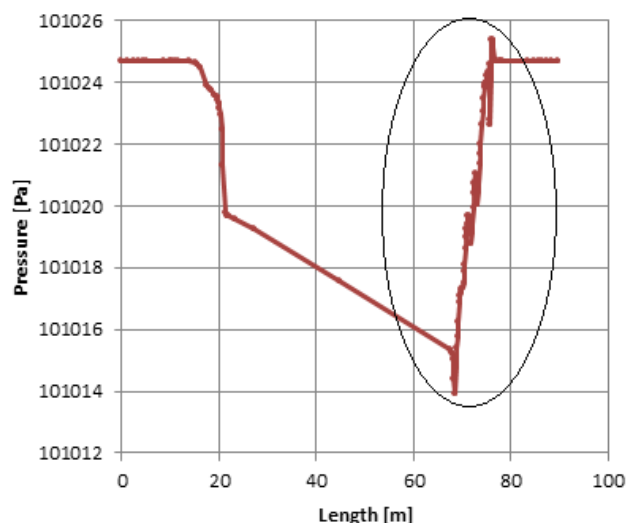


Рис. 4. Эпюры давления воздушной среды в тоннеле  
(движение состава слева направо, овалом показано местоположение поезда)

Сопоставление полученных результатов с результатами эксперимента, приведенными в литературе [14, 15, 17, 18], показывает определенное отличие расчетной кривой изменения давления текучей среды в зазоре «поезд — тоннель», в частности, на расчетной кривой отсутствуют зоны импульсного возмущения в средней части тоннеля.

Главная проблема в моделировании крупных вихрей состоит в том, что вблизи стенки все вихри настолько малы, что размеры энергоемких и диссипатирующих вихрей совпадают. Это создает серьезные ограничения по числу Рейнольдса для LES и делает недоступными вариантные расчеты реальных задач.

Для разрешения турбулентных пульсаций часто применяются: метод прямого численного моделирования турбулентности (Direct Numerical Simulation, или DNS), моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation, или LES), а также модели на основе осреднения по Рейнольдсу или Фавру (Reynolds averaged Navier — Stokes, RANS).

При выполнении расчетов методом заторможенного ротора выявлена высокая сходимость результатов с приведенными в литературе [10, 13–15] результатами экспериментальных измерений скорости и давления, полученными для случаев движения в тоннеле и на открытом пространстве. В случае анализа процессов аэроупругого взаимодействия в порталной зоне тоннеля выявлено расхождение расчета и эксперимента. Это расхождение увеличивается по мере уменьшения относительной длины поезда, расположенной в тоннеле. Анализ процессов аэроупругого взаимодействия методом заторможенного ротора становится практически невозможен при расположении поезда вблизи портала. В этом случае квазистатический метод не учитывает скорость воздушных масс, движущихся впереди поезда,



а также проникающих в тоннель вследствие создаваемых торцевой поверхностью фронтов давления. Та же проблема наблюдается при анализе выхода поезда из тоннеля. Здесь невозможно определить скорость воздушных масс, увлекаемых поездом из тоннеля и движущихся по инерции. Применение эквивалентных вентиляторов, располагаемых в тоннеле и создающих необходимый перепад давления, как предложено в [3, 6, 8, 12], не следует считать адекватным способом решения задачи, поскольку для точного задания значения в расчетной модели давления, создаваемого указным вентилятором, необходимо получить распределение скоростей воздуха в тоннеле в результате натурального эксперимента, проведение которого не всегда возможно. Таким образом, для расчета полей давления и скорости воздуха при прохождении подвижным составом порталной части тоннеля необходимо решение задачи в нестационарной постановке.

В настоящей работе расчет аэроупругого взаимодействия подвижного состава и порталной части выполнен в трехмерной и двухмерной нестационарной постановке для случая захода подвижного состава в тоннель. При дискретизации расчетной области применен метод деформируемых сеток, описанный выше. С целью апробации метода выполнен расчет полей давления и скорости воздуха для случая редуцированной модели поезда, заходящего в тоннель со скоростью 40 км/ч. Задача решена в осесимметричной постановке. Геометрические размеры модели, а также параметры движения (ускорение  $1,23 \text{ м/с}^2$ , время разгона 9 с, установившееся значение скорости 11,1 м/с) взяты из [3].

Результаты расчета в целом совпадают с приведенными в [3, 6, 8] и подтверждают качественную картину распределения давления и скорости потока, однако с количественной точки зрения имеют место определенные расхождения: выявлено, что применение метода эквивалентных вентиляторов при расчете распределения давления дает заниженное значение максимального и пикового давлений в характерных областях подвижного состава (вертикальные торцевые и хвостовые поверхности) примерно в 1,5–2 раза. Это связано с тем, что решение задачи в нестационарной постановке позволяет учитывать динамические составляющие потоков воздуха и более полно отражает физическую картину процессов. В качестве примера на рис. 5 представлен график зависимости среднего давлений на лобовой поверхности модели движущегося поезда.

Выявлено, что градиент давления при входе в тоннель составил 1805 Па/с. Во время движения по тоннелю имеют место резкие скачки давления значительной амплитуды. Это может негативно сказаться на состоянии здоровья пассажиров и локомотивной бригады.

Общее время расчетов составило 7 дней. Время расчета процесса входа в тоннель составило 25 часов. Учитывая мощность вычислительной техники (IntelCorei5, 16 GBRAM) и число узлов сетки (140 000), применение метода

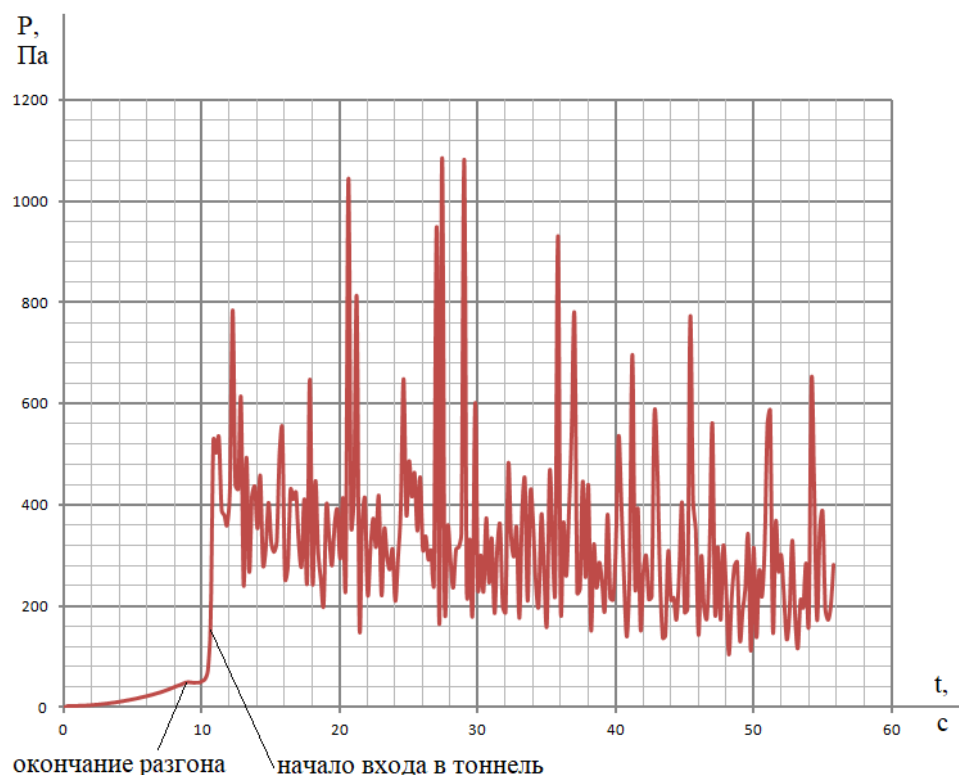


Рис. 5. График зависимости среднего значения давления на лобовой поверхности лобовой части модели поезда при входе в тоннель

дискретизации с помощью подвижных сеток и решение задачи в нестационарной постановке позволило в значительной степени сократить требования к вычислительным мощностям без значительной потери точности вычислений. Это связано с тем, что перестроение сетки выполняется в ограниченной области по известному закону билинейной интерполяции, что, с одной стороны, не приводит к снижению ее качества, а с другой — не требует значительных ресурсов вычислительной техники на выполнение перестроения сетки.

Для исследования процессов формирования фронта давления в соответствии с рекомендациями, изложенными в [12, 17, 18], в тоннеле была выбрана точка, отстоящая на 1 метр от портала тоннеля и на расстоянии и 0,5 м от потолка. Для указанной точки получены значения давления и проекций вектора скорости воздуха на вертикальную и горизонтальную оси. Графические зависимости указанных величин представлены на рис. 6.

Выявлено, что при скорости движения 11,1 м/с нарастание давления начинается при нахождении лобовой поверхности поезда на расстоянии 19 метров от плоскости портала.

Зависимости составляющих вектора скорости от времени при входе лобовой части в тоннель представлены на рис. 7.

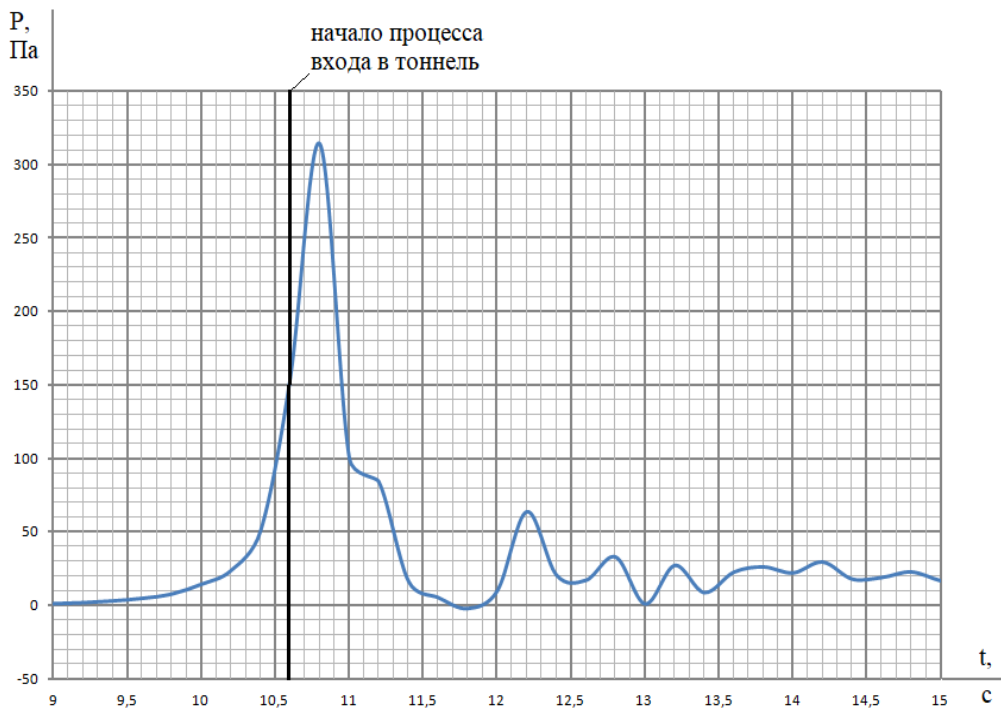


Рис. 6. График изменения давления при входе модели поезда в тоннель

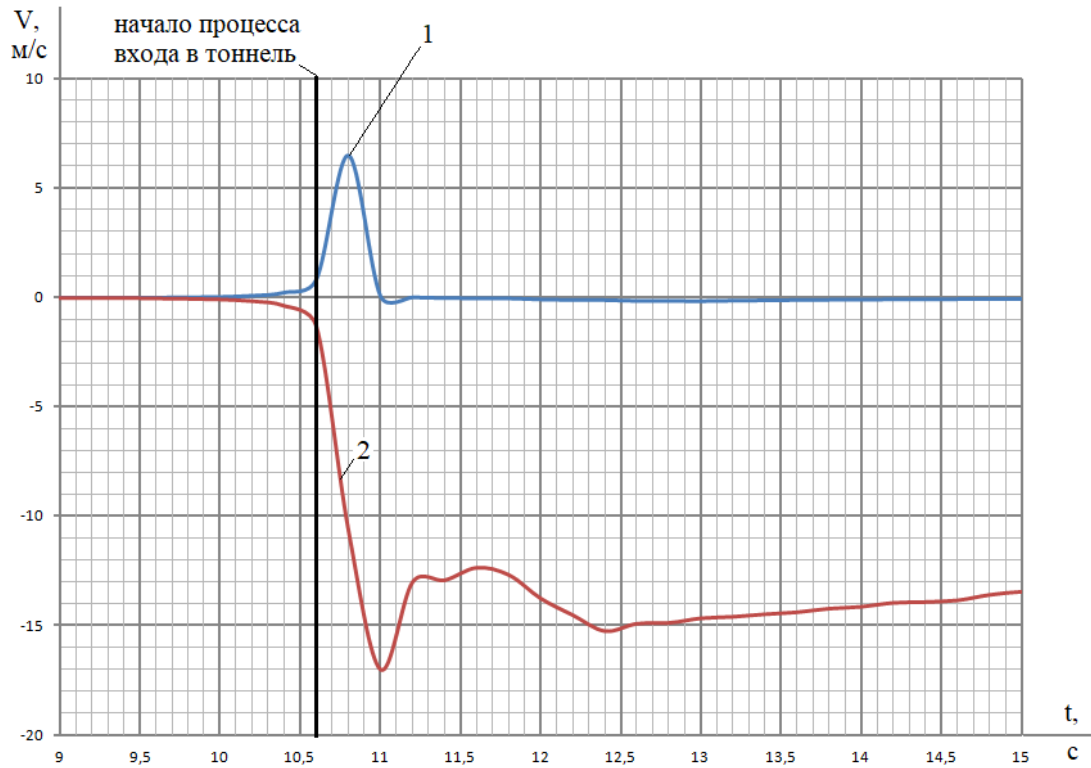


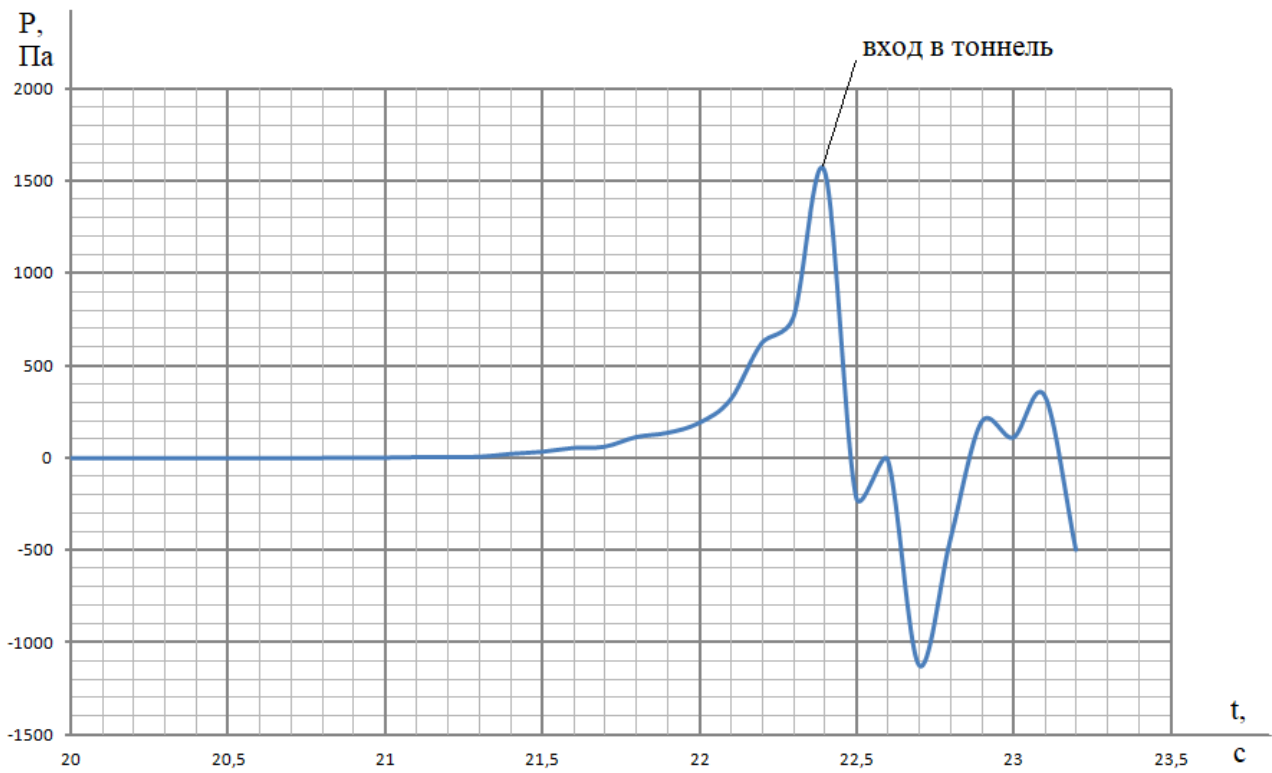
Рис. 7. График изменения составляющих вектора скорости при входе скоростного поезда в тоннель: 1 — проекция поперечной составляющей вектора скорости, 2 — проекция продольной составляющей

Видно, что скорость движения воздуха начинает увеличиваться при нахождении лобовой поверхности поезда на расстоянии 9 метров от портала. Максимальный градиент скорости при этом составляет величину порядка  $50 \text{ м/с}^2$ , давления —  $1000 \text{ Па/с}$ . Отметим, что в верхней части тоннеля формируется поток воздуха, движущийся противоположно направлению движения поезда. Максимальный перепад давления в сторону понижения наблюдается при входе лобовой части поезда в тоннель. До момента входа в тоннель давление и составляющие скорости потока нарастают, но с меньшей интенсивностью.

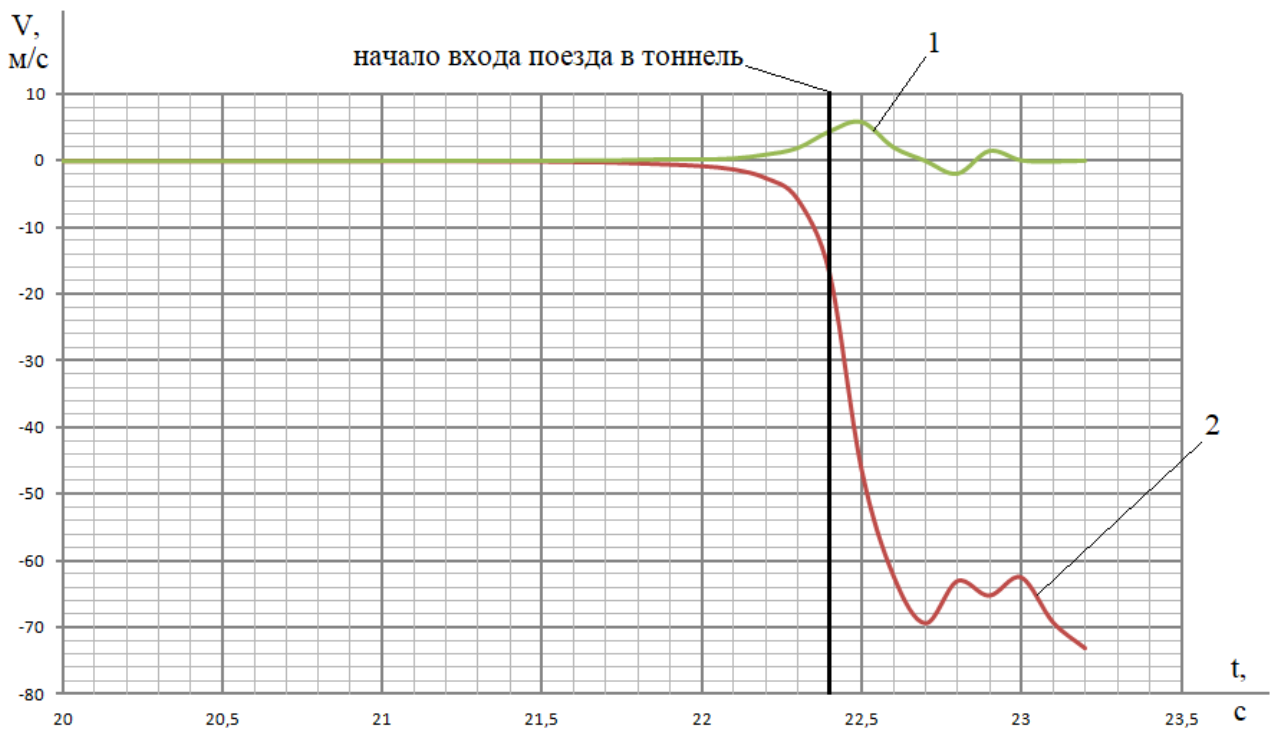
Аналогичный расчет выполнен для случая аэроупругого взаимодействия скоростного поезда обтекаемой формы при входе в тоннель на скорости  $162 \text{ км/ч}$ . Для формирования пограничного слоя также использовался метод установления. Задача решена в плоскопараллельной нестационарной постановке. Величина ускорения для сокращения времени расчета выбрана равной  $2 \text{ м/с}^2$ . Для исследования процессов формирования фронта давления в тоннеле была выбрана точка, отстоящая на 1 метр от портала тоннеля и на расстоянии  $0,5 \text{ м}$  от потолка. Для указанной точки получены значения давления и проекций вектора скорости воздуха на вертикальную и горизонтальную оси. Графические зависимости указанных величин представлены на рис. 8.

Выявлено, что процесс формирования фронта давления, так же как и в случае движения объекта плохообтекаемой формы, начинается на расстоянии от портала, но при рассматриваемой скорости движения нарастание давления начинается при нахождении лобовой поверхности поезда на большем расстоянии ( $50 \text{ метров}$  от плоскости портала). При этом скорость движения воздуха начинает увеличиваться уже при нахождении лобовой поверхности поезда на расстоянии порядка  $30 \text{ метров}$  от портала. Максимальный градиент скорости при этом значительно выше и составляет величину порядка  $300 \text{ м/с}^2$ , давления —  $17\,000 \text{ Па/с}$ . При движении объекта с высокой скоростью наблюдаются значительные перепады давления. Максимальный перепад давления в сторону понижения наблюдается при входе лобовой части поезда в тоннель. При движении поезда с малой скоростью давление монотонно снижается. Направление потока воздуха в верхней части тоннеля также направлен противоположно направлению движения поезда.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при входе поезда в тоннель разгон воздушных масс подвижным составом осуществляется со значительной задержкой вследствие действия сил вязкого трения между воздухом и стенками тоннеля, а также внутри объема воздуха, заполняющего тоннель.



*a*



*б*

Рис. 8. График изменения давления (*a*) и составляющих вектора скорости (*б*) при входе скоростного поезда в тоннель:  
*1* — проекция вектора скорости на ось *Y*, *2* — проекция вектора скорости на ось *X*



Также в соответствии с рекомендациями [17, 18] и с целью сопоставления полученных результатов с приведенными в литературе экспериментальными данными были выбраны характерные точки на поверхности поезда, показанные на рис. 9, в. Выбор точек обусловлен тем, что в точке 1 (обтекатель автосцепки) преобладает динамическое напорное давление, а в точке 2, расположенной на расстоянии 6 м от носовой части, величина давления близка к статическому. Графики зависимостей давления, полученные в указанных точках, представлены на рис. 10

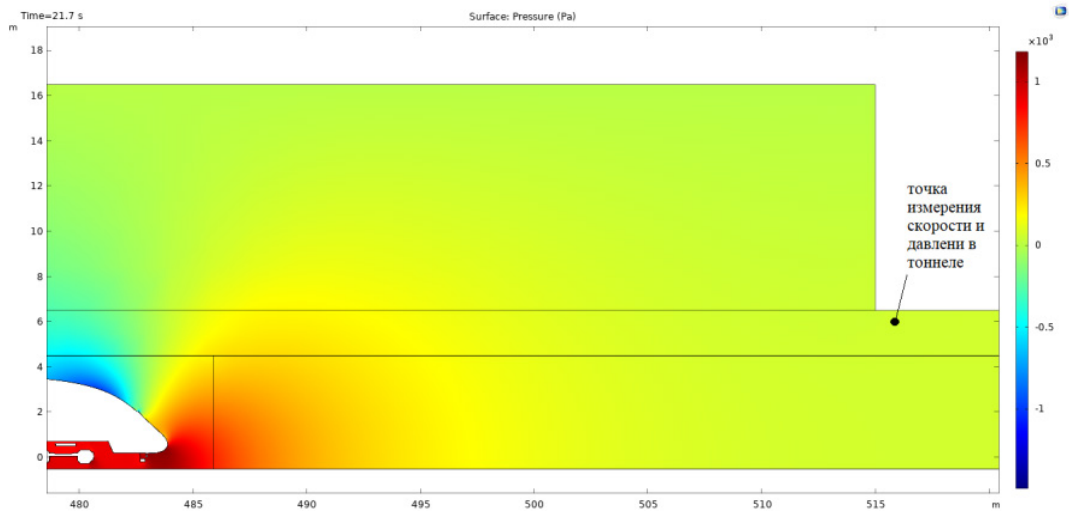
Выявлено, что при пересечении плоскости тоннеля наблюдается резкое изменение давления, причем максимальный перепад (13 750 Па/с) наблюдается в зоне обтекателя автосцепки. В характерной точке 2 скорость и амплитуда изменения давления существенно меньше (7300 Па/с). Это означает, что в процессе аэроупругого взаимодействия важную роль играет напорная составляющая давления воздуха. Таким образом, результаты, получаемые при размещении датчиков в зоне действия статического давления перпендикулярно потоку, являются существенно заниженными и не отражают физическую картину аэроупругого взаимодействия. Для точного определения давления необходимо размещение датчиков в лобовой части подвижного состава таким образом, чтобы учитывалось влияние напорного давления и действие нормальной составляющей потока воздуха, т. е. в торцевой зоне. В целом качественные и количественные результаты не противоречат данным, изложенным в литературе [17, 18], что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

## Выводы

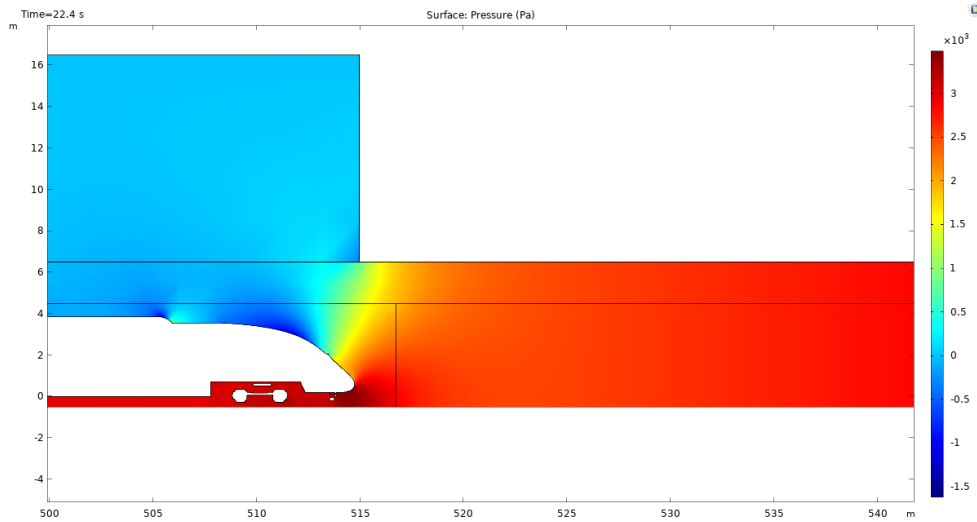
Разработана и апробирована численная модель аэроупругого взаимодействия движущегося подвижного состава и порталных сооружений железнодорожных тоннелей на базе метода подвижных сеток, позволяющая выполнять исследования в нестационарной постановке.

Показано, что применение метода подвижных сеток позволяет в значительной степени экономить вычислительные ресурсы за счет перестроения сетки в ограниченных областях расчетной области по закону билинейной интерполяции.

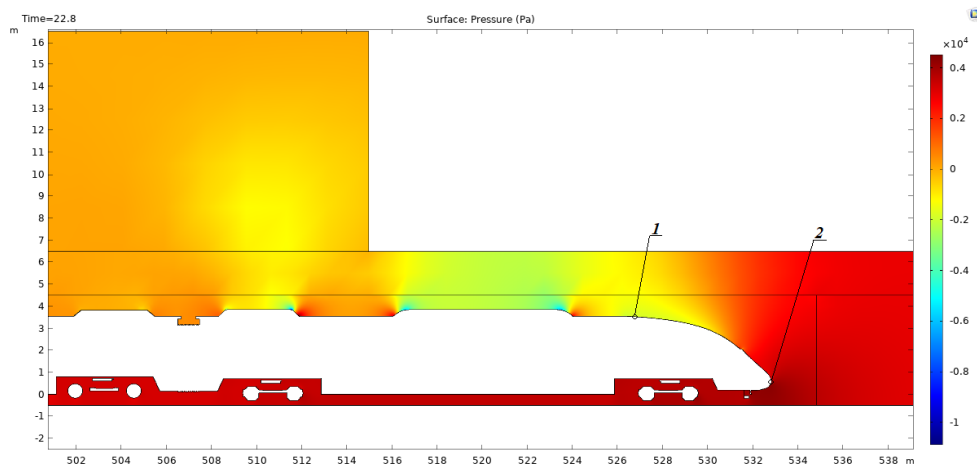
Выполнено сравнение методов заторможенного ротора, метода эквивалентных вентиляторов и разработанной методики применительно к исследованию процессов динамических процессов, протекающих во время входа подвижного состава в тоннель. Показано, что для анализа процессов в порталной зоне тоннеля применение метода заторможенного ротора нецелесообразно, а метод эквивалентных вентиляторов дает заниженные значения давления.



*a*



*б*



*в*

Рис. 9. Формирование фронта давления в тоннеле: *a* — начальный этап процесса. Ударная волна на достигла плоскости портала; *б* — начало входа поезда в тоннель; *в* — процесс движения по тоннелю. Цифрами показаны точки измерения давления

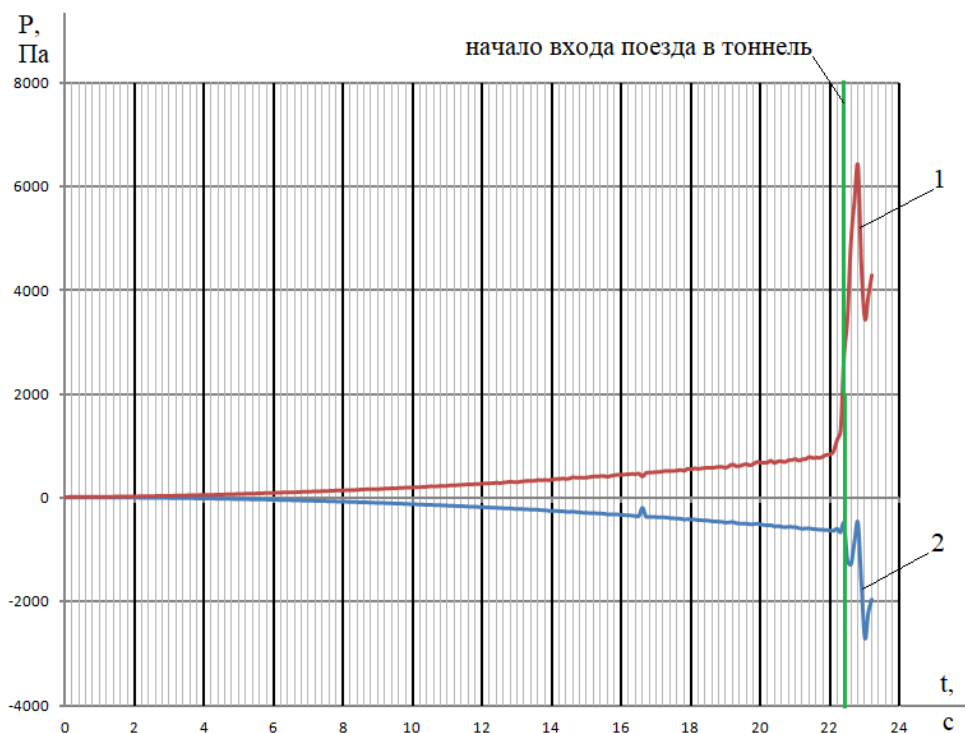


Рис. 10. График зависимости давления в характерных точках поверхности движущегося поезда при аэроупругом взаимодействии с поверхностью портала тоннеля:

1 — давление в точке, расположенной в носовой части (расположение показано на рис. 7, в); 2 — точка, расположенная на расстоянии 6 м от носовой части

Выявлено, что при входе поезда в тоннель разгон воздушных масс подвижным составом осуществляется со значительной задержкой вследствие действия сил вязкого трения между воздухом и стенками тоннеля, а также внутри объема воздуха, заполняющего тоннель. При этом в процессе аэроупругого взаимодействия важную роль играет напорная составляющая давления воздуха, что требует размещения датчиков в лобовой части подвижного состава таким образом, чтобы учитывались влияние напорного давления и действие нормальной составляющей потока воздуха. Датчики, размещаемые вне зоны действия фронтальных потоков, дают существенно заниженные значения давления, что не отражает физической картины процесса.

## Библиографический список

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. — URL: [http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col\\_id=121&id=18071](http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col_id=121&id=18071) (дата обращения: 11.03.2019).

2. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.20218 № 3363. — URL: [http://static.government.ru /media/files/7enYF2uL5kF ZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf](http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kF ZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf) (дата обращения: 07.03.2022).
3. Алферова Е. Л. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена / Е. Л. Алферова, И. В. Лугин, Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 6. — С. 5–14.
4. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.
5. Введение в COMSOL Multiphysics. — URL: [https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (дата обращения: 14.03.2022).
6. Кияница Л. А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена / Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 11. — С. 400–407.
7. Колесниченко В. И. Введение в механику несжимаемой жидкости: учеб. пособие / В. И. Колесниченко, А. Н. Шарифулин. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. — 127 с.
8. Красюк А. М. Исследование воздухораспределения в протяженных транспортных тоннелях БАМ / А. М. Красюк, И. В. Лугин, Е. Л. Алферова // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 114–121.
9. Ледяев А. П. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях / А. П. Ледяев, В. Н. Кавказский, Р. О. Креер // Транспорт Урала. — 2015. — № 4(47). — С. 3–9.
10. Ледяев А. П. Математическое моделирование аэродинамических процессов в железнодорожных тоннелях на высокоскоростных магистралях / А. П. Ледяев, В. Н. Кавказский, О. О. Шелгунов // Метро и тоннели. — 2021. — № 3. — С. 40–43
11. Лугин И. В. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях / И. В. Лугин, Е. Л. Алферова // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2018. — Т. 5. — С. 155–160.
12. Грязнова С. А. Метод расчета аэродинамических характеристик системы «Тоннель — поезд» / С. А. Грязнова, С. А. Калкаманов, Н. В. Хворост // Комунальне господарство міст. — 2011. — № 101. — С. 520–527.
13. Diedrichs B. Studies of Two Aerodynamic Effects on High-Speed Trains: Crosswind Stability and Discomforting Car Body Vibrations Inside Tunnels / B. Diedrichs. — URL: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:11067/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 01.10.2015).
14. Juan Manuel Rivero Fernandez Fluid Dynamic Problems of High-Speed Trains in Tunnels / Juan Manuel Rivero Fernandez. — URL: [https://oa.upm.es/51377/1/juan\\_manuel\\_rivero\\_fernandez.pdf](https://oa.upm.es/51377/1/juan_manuel_rivero_fernandez.pdf) (дата обращения: 14.03.2022).

15. Faramehr S. Aerodynamics of Trains in Tunnels / S. Faramehr, H. Hemida; J. Pombo (editor) // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. — Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 39. — 2016.

16. Maeda T. Micro-pressure waves radiation from a tunnel portal and their mitigation. Internoise 2000 / T. Maeda, M. Iida, K. Murata et al. // Proceedings of the 29th International Congress on Noise Control Engineering, held 27–31 August 2000. — NICE, France. — Vol. 4. — Pp. 2461–2462.

17. Martinez A. Pressure measurements on real high-speed trains travelling through tunnels / A. Martinez, E. Vega, J. Gaité et al. // BBA VI international colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. — Milano, Italy, 20–24 July 2008.

18. Juan Manuel Rivero Fernandez Fluid Dynamic Problems of High-Speed Trains in Tunnels. — URL: [https://oa.upm.es/51377/1/juan\\_manuel\\_rivero\\_fernandez.pdf](https://oa.upm.es/51377/1/juan_manuel_rivero_fernandez.pdf) (дата обращения: 14.03.2022).

*Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации Федеральной программы поддержки университетов ПРИОРИТЕТ 2030.*

Дата поступления: 08.04.2022

Решение о публикации: 29.04.2022

#### **Контактная информация:**

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; [avataev@yandex.ru](mailto:avataev@yandex.ru)

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; [yan-roos@yandex.ru](mailto:yan-roos@yandex.ru)

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич — аспирант; [k-sotnikov@yandex.ru](mailto:k-sotnikov@yandex.ru)

## **Digital Modeling of Aeroelastic Interaction of a Rolling Stock with Portal Buildings of Passover Tunnels**

**A. S. Vatayev, Ya. S. Vatulin, A. A. Vorobiev, K. A. Sotnikov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Vatayev A. S., Vatulin Ya. S., Vorobiev A. A., Sotnikov K. A. Digital Modeling of Aeroelastic Interaction of a Rolling Stock with Portal Buildings of Passover Tunnels. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 2, pp. 104–123. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123

### **Summary**

**Purpose:** Development of mathematical models allowing to investigate the processes of aeroelastic interaction of a rolling stock with portal buildings of passover tunnels in dynamic and quasi-stationary setting with the use of deformable mobile nets and FrozenRotor methods. **Methods:** we present mathematical models and ways of their realization in two- and three-dimensional setting in program complexes Comsol Multiphysics and Solid Works Flow Simulation on the basis of numerical solution of Reynolds averaged Navier-



Stoks Method (RANS) method equations. **Results:** The results of numerical research of velocity and pressure fields nearby tunnel portal zone, obtained with the help of developed mathematical models for the case of rolling stock entrance into a tunnel, are given. **Practical importance:** It's revealed that at train entrance into a tunnel, air mass runaway by a rolling stock is made with significant delay owing to effect of viscous friction force between an air and tunnel walls as well as inside air volume which fills a tunnel.

**Keywords:** Aerodynamic calculations, aeroelastic interaction, finite volume method RANS, deformable mobile nets, numerical modeling.

## References

1. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga): Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 17.04.2018 № 769/r.* [Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book): Order of Russian Railways dated April 17, 2018 No. 769/r.]. Available at: [http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col\\_id=121&id=18071](http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col_id=121&id=18071) (accessed: March 11, 2019) (In Russian)

2. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27.11.2021 № 3363* [Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035: Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (accessed: March 07, 2022) (In Russian)

3. Alferova E. L. Modelirovanie vozmushcheniy vozdušnogo potoka pri dvizhenii poezdov v dvukhputnom tonnele metropolitena [Modeling of airflow disturbances during train traffic in a double-track subway tunnel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2016, I. 6, pp. 5–14. (In Russian)

4. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernyye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (In Russian)

5. *Vvedenie v COMSOL Multiphysics* [Introduction to COMSOL Multiphysics]. Available at: [https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (accessed: March 14, 2022). (In Russian)

6. Kiyanitsa L. A. Issledovanie dinamiki davleniy na poverkhnosti vagonov poezda v dvukhputnom tonnele metropolitena [Study of pressure dynamics on the surface of train cars in a double-track subway tunnel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2016, I. 11, pp. 400–407. (In Russian)

7. Kolesnichenko V. I. *Vvedenie v mekhaniku neszhimaemoy zhidkosti* [Introduction to the mechanics of an incompressible fluid]. Perm': Perm. nats. issled. politekhn. un-t Publ., 2019. 127 p. (In Russian)

8. Krasnyuk A. M. Issledovanie vozdukhoraspredeleniya v protyazhennykh transportnykh tonnyakh BAM [Study of air distribution in long transport tunnels of the BAM]. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2019, vol. 2, I. 4, pp. 114–121. (In Russian)

9. Ledyayev A. P. Osobennosti proektirovaniya tonney na vysokoskorostnykh magistralyakh [Design features of tunnels on high-speed highways]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2015, I. 4(47), pp. 3–9. (In Russian)

10. Ledyayev A. P. Matematicheskoe modelirovanie aerodinamicheskikh protsessov v zhelezno-dorozhnykh tonnelyakh na vysokoskorostnykh magistralyakh [Mathematical modeling of aerodynamic processes in railway tunnels on high-speed lines]. *Metro i tonneli* [Metro and tunnels]. 2021, I. 3, pp. 40–43. (In Russian)
11. Lugin I. V. Issledovanie aerodinamicheskikh protsessov pri dvizhenii poezda v protyazhennykh zheleznodorozhnykh tonnelyakh [Study of aerodynamic processes during train movement in extended railway tunnels]. *Interexpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2018, vol. 5, pp. 155–160. (In Russian)
12. Gryaznova S. A. Metod rascheta aerodinamicheskikh kharakteristik sistemy «Tonnel'–poezd» [Method for calculating the aerodynamic characteristics of the “Tunnel-train” system]. *Komunal'ne gospodarstvo mist* [Communal government of the city]. 2011, I. 101, pp. 520–527. (In Russian)
13. Diedrichs B. Studies of Two Aerodynamic Effects on High-Speed Trains: Crosswind Stability and Discomforting Car Body Vibrations Inside Tunnels. Available at: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:11067/FULLTEXT01.pdf> (accessed: October 01, 15).
14. Juan Manuel Rivero Fernandez Fluid Dynamic Problems of High-Speed Trains in Tunnels. Available at: [https://oa.upm.es/51377/1/juan\\_manuel\\_rivero\\_fernandez.pdf](https://oa.upm.es/51377/1/juan_manuel_rivero_fernandez.pdf) (accessed: March 14, 2022).
15. Faramehr S., Hemida H. Aerodynamics of Trains in Tunnels. Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, 2016. 39 p.
16. Maeda T., Iida M., Murata K., et al. Micro-pressure waves radiating from a tunnel portal and their mitigation. *Internoise 2000. Proceedings of the 29th international Congress on Noise Control Engineering*, NICE, France, 27–31 August 2000, vol. 4, pp. 2461–2462.
17. Martinez A., Vega E., Gaité J., et al. Pressure measurements on real high-speed trains traveling through tunnels. In: *BBAA VI international colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications* Milano, Italy, 20 July–24 July, 2008.
18. Juan Manuel Rivero Fernandez Fluid Dynamic Problems of High-Speed Trains in Tunnels. Available at: [https://oa.upm.es/51377/1/juan\\_manuel\\_rivero\\_fernandez.pdf](https://oa.upm.es/51377/1/juan_manuel_rivero_fernandez.pdf) (accessed: March 14, 2022).

Received: April 08, 2022

Accepted: April 29, 2022

#### **Author's information:**

Andrey S. VATAYEV — PhD in Engineering, Associate Professor; [avataev@yandex.ru](mailto:avataev@yandex.ru)

Yan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; [yan-roos@yandex.ru](mailto:yan-roos@yandex.ru)

Alexander A. VOROBIEV — Second Doctorate Degree in Engineering, Associate Professor; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

Kirill A. SOTNIKOV — Postgraduate Student; [k-sotnikov@yandex.ru](mailto:k-sotnikov@yandex.ru)