

8. Kuiper G.P. On the Origion of the Solar System / G.P. Kuiper, J.A. Hynek // Astrophysics, McGraw-Hill Co., New York, 1951. – 365 p.
9. Ter Haar D. Ann. Rev. Astron. Astrophys. 5, 1967/ – P. 267–278.
10. Hoyle F. Origin of the Solar System / F. Hoyle // In R. Jastrow and A.J.W. Cameron (eds) - Academic Press, New York, 1963. – P. 63–71.
11. Перехрест В.І. Новий розв'язок гідродинамічних рівнянь Ейлера для сферичних вихрових течій / В.І. Перехрест, Р.В. Іванов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2002. – Вип. 6, т. 1. – С. 60–64.
12. Перехрест В.І. Планетарний вихор та гіпотези Лапласа і Вайцзекера / В.І. Перехрест // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2009. – Вип. 13, т. 2. – С. 113–124.
13. Перехрест В.І. Про структури планетарних вихорів і закономірності їх обертання / В.І. Перехрест, М.М. Осипчук // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2010. – Вип. 14, т. 1. – С. 109–117.
14. Ксанфомалити Л.В. Солнечная система, планетные системы звезд и теория последовательной аккреции / Л.В. Ксанфомалити // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. – Т. 26, № 4. – С. 84–106.
15. Милл-Томсон Л.М. Теоретическая гидродинамика / Л.М. Милл-Томсон. – М., 1964. – 655 с.
16. NASA «Sun Fact Sheet»- <http://nssds.gsfc.nasa.gov/plantary> 2009.
17. <http://exoplanets.org/exotable/exotable.html>.

Надійшла до редакції 10.01.11

УДК 533.601:656.2

Е. В. Кравець

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

СТРУКТУРА ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЯЗКИМ НЕСЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРИЗМ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ТАНДЕМОМ НАД ЭКРАНОМ С ОТКРЫТЫМ МЕЖТОРЦЕВЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

Проведено тривимірний чисельний розрахунок течії нестисливої в'язкої рідини при обтіканні двох призм, що розташовані тандемом над екраном, які моделюють рух повітря навколо вагонів поблизу поверхні землі при русі швидкісного потяга. Подано огляд досліджень, що спрямовані на зниження аеродинамічного опору міжвагонного простору швидкісного потяга. Виконано аналіз структури течії та закономірностей вихороутворення в міжторцевій області призм. Визначено коефіцієнт аеродинамічного опору відкритого міжторцевого простору.

Ключові слова: течія в'язкої нестисливої рідини, обтікання двох призм тандемом поблизу екрана, швидкісний потяг, аеродинамічний опір міжторцевого простору, структура вихороутворення.

Проведен трехмерный численный расчет течения вязкой несжимаемой жидкости при обтекании двух призм, расположенных тандемом над экраном, моделирующего движение воздуха вокруг вагонов вблизи поверхности земли при движении скоростного железнодорожного состава. Приведен обзор исследований, направленных на снижение аэродинамического сопротивления межвагонного пространства скоростного поезда. Выполнен анализ структуры течения и закономерностей вихреобразования в межторцевой области призм. Определен коэффициент аэродинамического сопротивления открытого межторцевого пространства.

Ключевые слова: течения вязкой несжимаемой жидкости, обтекание двух призм по схеме тандем вблизи экрана, скоростной поезд, аэродинамическое сопротивление межторцевого пространства, структура вихреобразования.

The three-dimensional numerical calculation of viscous incompressible liquid flow around two prisms tandem located above the screen is carried out. This flow models the air movement around the cars at near-ground surface while the high-speed train moving. The review of the researches directed to decrease of intercarload space drag of a high-speed train is brought. The analysis of flow structure and vortex formation laws in prisms inter-end space is executed. The drag coefficient of open inter-end space is determined.

Key words: incompressible viscous flow, flow about two tandem prisms, high-speed train, drag of the space between the prisms.

Введение. Последняя четверть XX века была отмечена бурными темпами роста скорости движения наземного железнодорожного и автомобильного транспорта. Если к 90-м годам средние скорости подвижного железнодорожного состава достигли 200 км/ч, то к началу XXI ст. они превысили 250 км/ч [6]. Значительное внимание развитию высокоскоростного наземного транспорта уделяется в Японии, Франции, России, Германии и других странах.

С ростом скорости движения наземного транспорта актуальными становятся вопросы взаимодействия его с вязкой воздушной средой и возникающих при этом существенных по величине аэродинамических сил и моментов.

Установлено, что наибольшее влияние ($\approx 20...23\%$) на аэродинамическое сопротивление подвижного состава оказывают формы лобовой и хвостовой частей поезда, наименьшее влияние ($\approx 3...4\%$) приходится на элементы конструкции в виде «заглубленных» поручней и окон, а полное перекрытие межвагонных промежутков позволяет снизить аэродинамическое сопротивление поезда на $\approx 6...15\%$ в зависимости от числа вагонов в подвижном составе.

Обзор исследований по снижению сопротивления межвагонного пространства скоростного поезда. Основные результаты исследований сопротивления движению при высоких скоростях помещены в [1; 14], полученных теоретическими и инженерными расчетами, и в [4-5; 7-13; 15] – с помощью натуральных и модельных экспериментов.

В [15] отмечены трудности постановки эксперимента на модели поезда в аэродинамической трубе, связанные с необходимостью моделирования подвижности поверхности земли; рассмотрены условия, при которых выполняется подобие процессов обтекания модели и натурального состава.

В [1] предложен метод расчета сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле путем суммирования трения каждого вагона, лобового сопротивления локомотива, сопротивления подвагонного пространства и межвагонных промежутков, а также хвостового сопротивления, возникающего на торце последнего вагона. Для вычисления вкладов каждого из перечисленных элементов использовались экспериментальные данные. При расчете сопротивления межвагонных промежутков предполагалось, что при увлечении поездом завихренной «воздушной пробки», зажаты между вагонами, локомотив затрачивает работу на преодоление силы трения воздуха о воздух. Для расчета этой силы трения в [1] применена теория расп-ространения в газе турбулентной струи такого же газа [14]. Сравнение значений воздушного сопротивления, рассчитанного в [1] и экспериментально [12; 13; 15], показало достаточное согласование.

Експериментальні роботи в аеродинамічній трубі по виявленню впливу елементів, характеризуючих зовнішню форму швидкісного складу, на повітряне опірність були здійснені в Дрездені [13]. Исследовалось вплив цілого ряду компонентів зовнішньої форми вагона, в тому числі: закриття підвагонного простору, міжвагонних перекриттів різних геометричних розмірів і форм, різних сопряжень бокової поверхні з кришею. В результаті була підрахована економія потужності, необхідної на подолання повітряного опору при введенні раніше перерахованих компонентів зовнішньої форми.

В Інституті Механіки МГУ досліджені закономірності зміни повного опору пасажирських поїздів і його складових (повітряного і механічного) від швидкості поїзда і його довжини. В частині, проведено експериментальне дослідження впливу форми відкритих міжвагонних проміжків і відкритого підвагонного простору швидкісного поїзда на повітряне опірність [4; 5]; розроблена методика прогнозування розрахунку основного опору руху поїздів обтекаємої форми в діапазоні 200...300 км/ч, урахування закриття міжвагонного і підвагонного просторів [7; 10]; розроблена напівемпірична методика розрахунку аеродинамічного опору швидкісного поїзда, урахування впливу основних складових, в тому числі, опору підвагонного і міжвагонного проміжків [8; 9]; застосовано спосіб управління пограничним шаром для уникнення відірваних течій в міжвагонних проміжках, дозволивший зменшити значення C_x повноскладного поїзда на 20 % при швидкості руху $V_\infty = 120$ км/ч [11].

Постановка задачі. Задача про прямокутні призми, розташовані тандемом над екраном, моделює течію в області, обмеженій торцями двох сусідніх вагонів при умові можливого втекання і витікання потоку з боку даху вагона, бокових стінок вагона і з-під днища вагона з боку поверхні землі – екрана.

Прикладний характер цієї задачі пов'язаний з встановленням впливу інтенсивності тривимірного циркуляційного течія на величину аеродинамічного опору вагона, а також пошуку раціональних рішень по компоновці міжвагонного простору з метою зменшення його аеродинамічного опору. Моделювання турбулентного потоку в міжвагонному просторі проведено для максимальної експлуатаційної швидкості $V_\infty = 140$ км/ч пасажирських перевезень на Україні. Використовувана математична модель включала систему рівнянь Рейнольдса і нерозривності, рівняння k-ε моделі турбулентності з використанням пристіночних функцій в областях поблизу стінки.

На рис. 1 відносно продольної площини симетрії прямокутних призм – вагонів 1 і 2 – показана прямокутна область, прийнята за розрахункову, з вказанням урахуваних граничними умовами особливостей обтекання в формі розташування входного і вихідного перерізів, границь розрахункової області, наявності пограничних шарів на верхній грані призми – даху вагона, бокових гранях прямокутних призм – бокових стінках вагонів і під нижньою гранню – під днищем вагонів, наявністю поверхні Землі і т. д.

Аналіз результатів. Течія в області між торцями прямокутних призм формується під впливом спадного потоку з верхньої грані призми,

моделирующей вагон 1, а также со стороны ее нижней грани – днища и боковой грани – боковой стенки вагона. Течение в окрестности торца второй призмы, в основном, формируется потоком, направленным со стороны боковой грани. Для этого сечения характерным является локальное перетекание воздушной среды из межторцової области в окрестностях верхней и нижней угловых точек торца в обтекающий призмы поток. Отметим, что для верхней угловой точки такое локальное перетекание отсутствует (рис. 2).

На рис. 2, г в изометрии показаны линии тока, проходящие через точки с координатами (0.1; 3.8; -0.1) м и (0.1; 3.8; 0.0) м при обтекании двух прямоугольных призм, расположенных тандемом над экраном, а также их виды сбоку (рис. 2, а), спереди (рис. 2, б) и сверху (рис. 2, в).

Аналогичная картина течения, когда линии тока не затекают в межторцовую область, имеет место для потока, движущегося вдоль боковой грани в пространстве с координатами $X = 0.1$ м, $0.6 \leq Y \leq 1.8$ м, $Z = -0.1$ м.

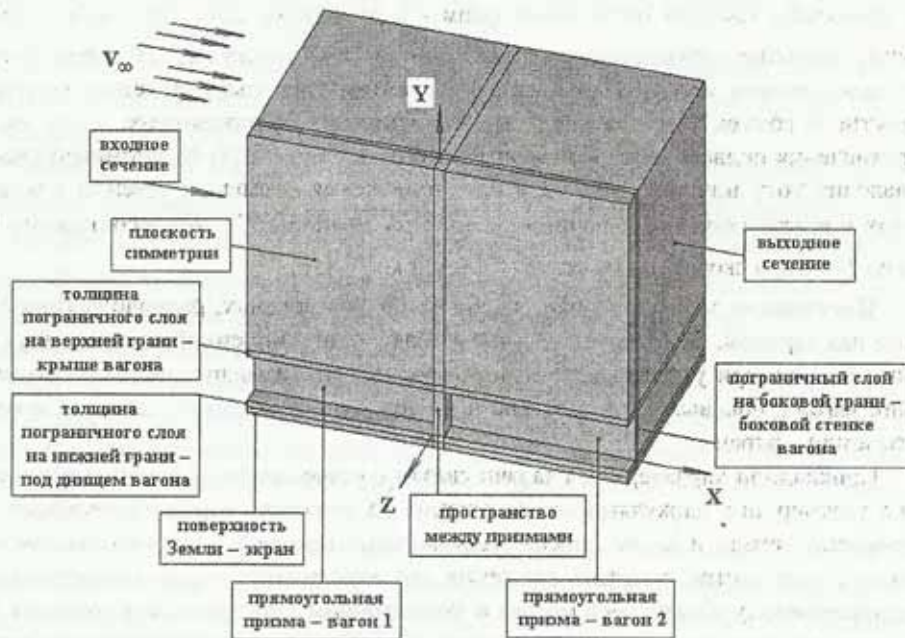


Рис. 1. Схема расчетной области в задаче о течении воздуха между прямоугольными призмами, расположенными «тандемом» над экраном

Отметим, что в окрестность нижней угловой точки торца передней призмы со стороны боковой грани втекает поток из-под нижней грани, причем линии тока этого течения также не попадают в межторцовую область. Такое течение характеризуют линии тока, проходящие через точки 3 и 4 (рис. 3).

Расчетами установлено, что в межторцовую область из-под нижней грани передней призмы попадают не все линии тока, находящиеся в расчетном диапазоне координат $Z \leq 0.8$ м при $X = 0.1$ м и $Y = -0.2$ м (рис. 4), причем указанные линии тока (например, проходящие через точки 5 и 6) в окрестности межторцової области под воздействием истекающего из нее потока искривляются выпуклостью в сторону экрана.

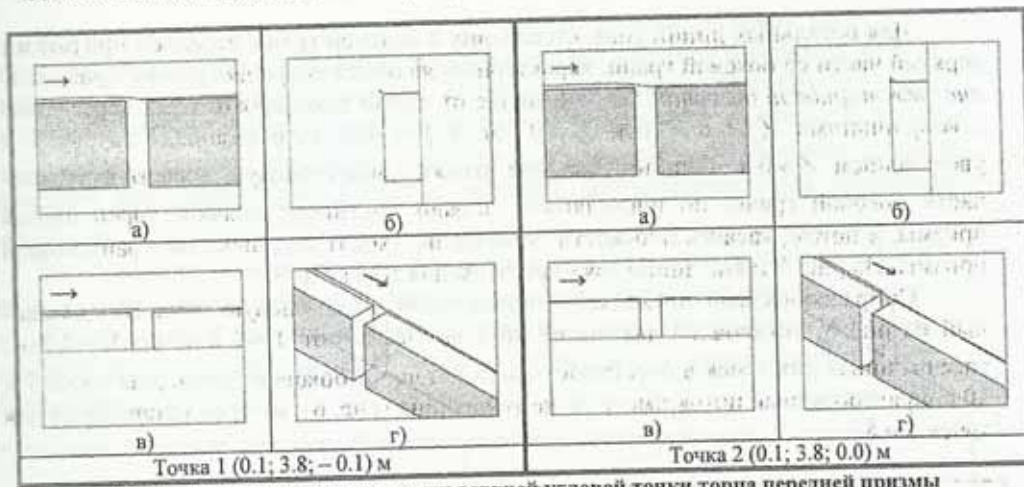


Рис. 2. Лінії тока в околиці верхньої куткової точки торця передньої призми

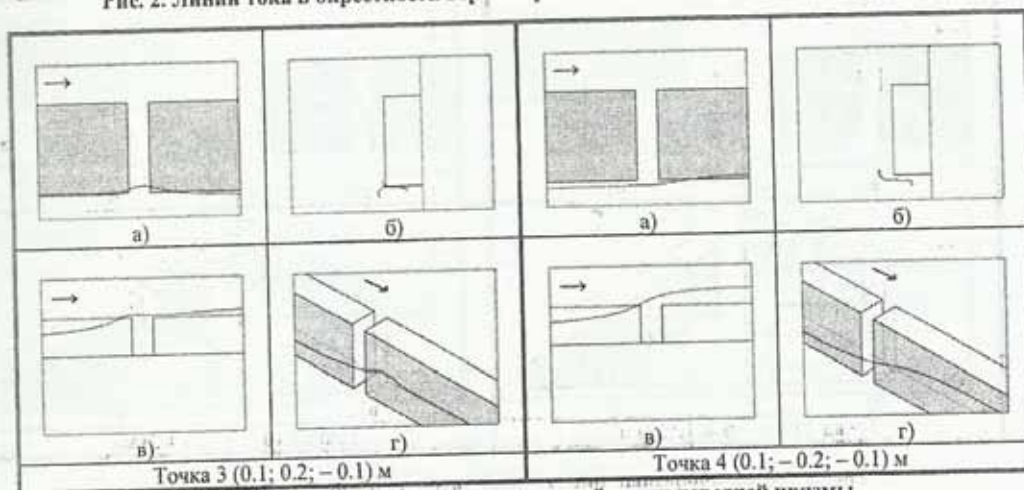


Рис. 3. Затекає потоку із-под нижньої грани передньої призми на її бокову грань в околиці нижньої куткової точки торця

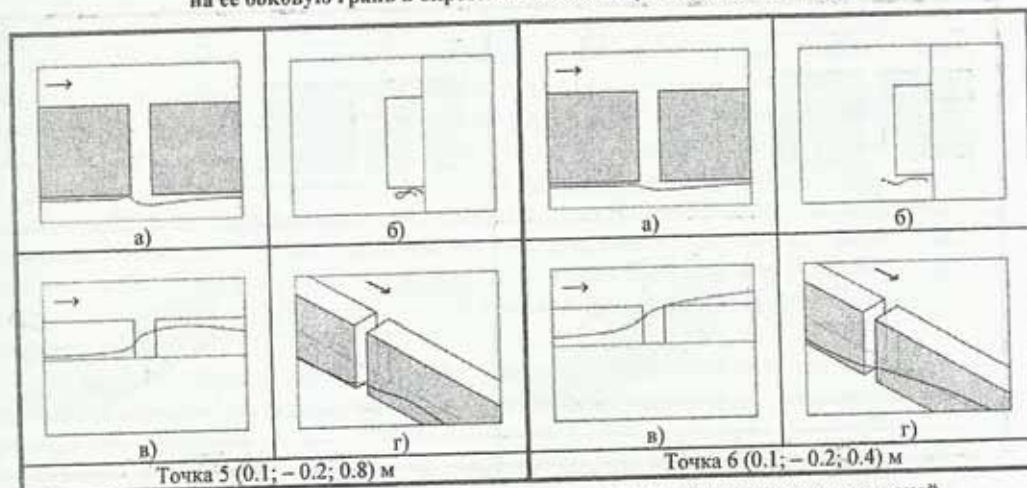


Рис. 4. Обтекание межторцовой области потоком вдоль экрана и нижних граней прямоугольных призм, расположенных тандемом под экраном

Для остальных линий тока, стекающих с верхней грани передней призмы и с верхней части ее боковой грани, характерным является *спиралеобразное прохождение межторцовой области*. Так, в отличие от линий тока, проходящих через точки с координатами $Z \leq 0.8$ м при $X = 0.1$ м и $Y = -0.2$ м, показанных на рис. 4, с увеличением $Z > 0.8$ м линии тока уже входят в межторцовую область с верхней части боковой грани: по нисходящей спирали достигают сначала торец второй призмы, а потом, касаясь плоскости симметрии, уходят под нижнюю грань второй призмы. На рис. 5 такие линии тока показаны для точек 7 и 8.

Спиралеобразный нисходящий поток через межторцовую область, показанный на рис. 5, установлен для линий тока на участке от $Y = 3.8$ м до $Y = 2.2$ м, рассчитанных для точек в окрестности верхней части боковой грани. Для точек 9 и 10 спиралеобразный поток имеет ту же тенденцию (рис. 6), которая установлена для точек 7 и 8.

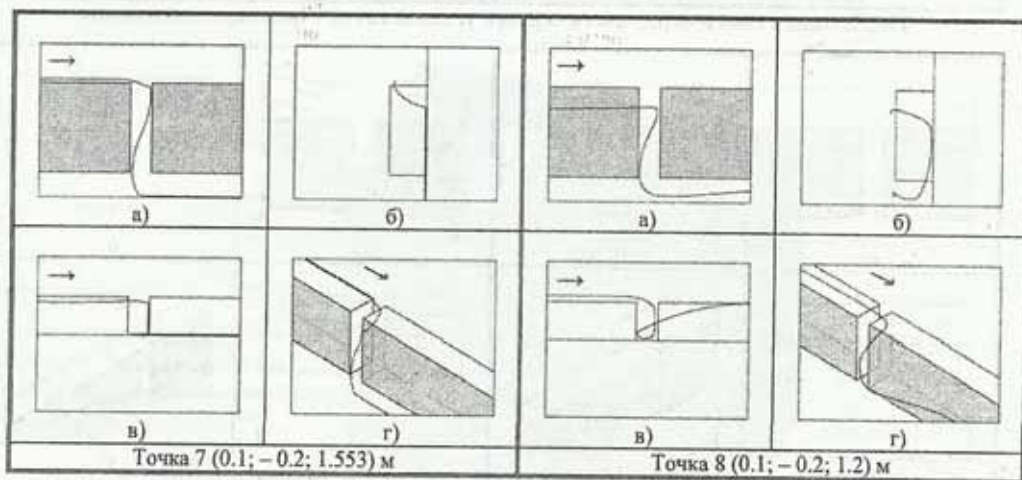


Рис. 5. Спиралеобразный нисходящий поток через межторцовую область с боковой грани под нижнюю грань

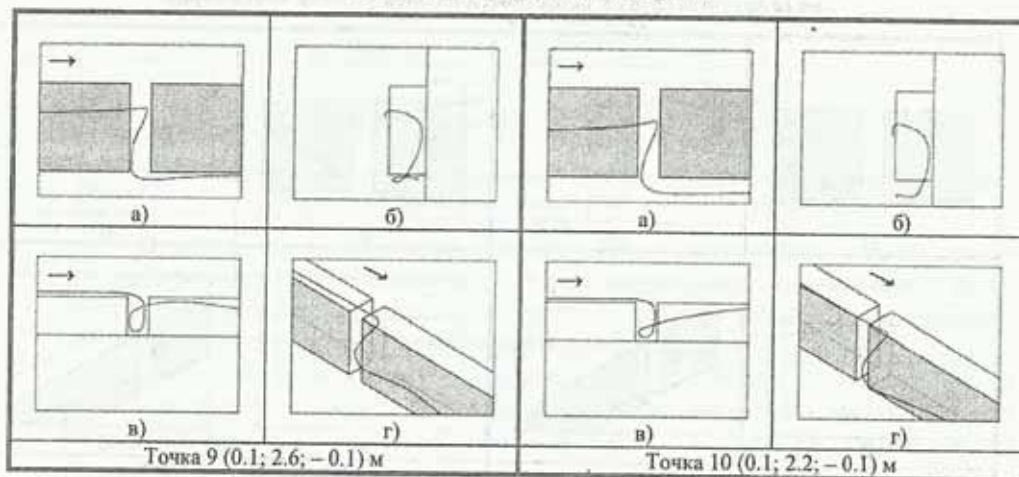


Рис. 6. Спиралеобразный нисходящий поток через межторцовую область с боковой грани под нижнюю грань

Необходимо отметить, что на рис. 5 и рис. 6 на виде «сбоку» (рис. 5, 6, а) конфигурация проекции линии тока характеризует интенсивное течение из межторцевой области под нижнюю и боковую грани второй призмы. Уточним, что через нижний участок боковой грани второй призмы могут проходить линии тока, связанные с точками, расположенными в окрестности верхней части боковой грани в примерном диапазоне $3.0 \text{ м} < Y < 3.4 \text{ м}$, который соответствует двум расчетным точкам 11 и 12 (рис. 7).

Обратим внимание на то, что линии тока, проходящие через точки 11 и 12, входят в межторцевую область с боковой грани передней призмы, описывают в этой области полный виток нисходящей спирали и выходят, попадая на боковую грань второй призмы. Шаг витка спирали практически соизмерим с высотой боковой грани призмы.

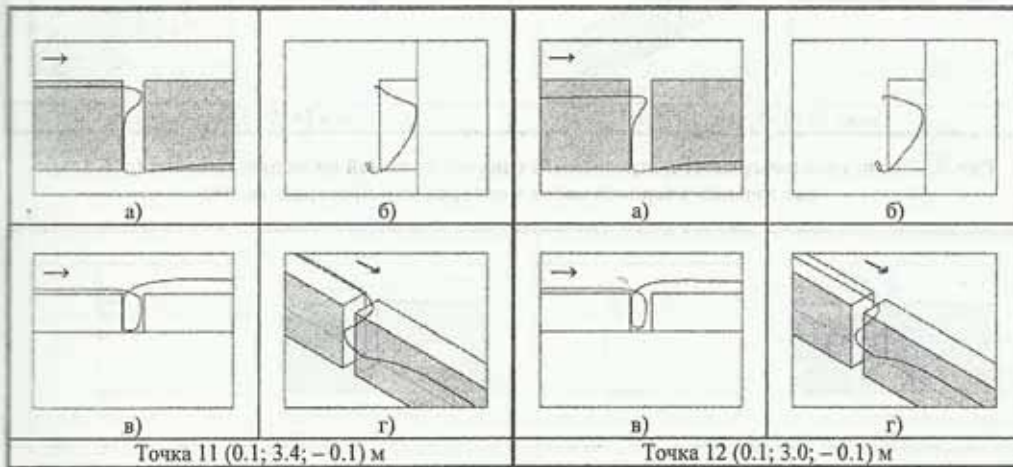


Рис. 7. Спиралеобразные нисходящие линии тока через точки 15 и 16 в окрестности боковой грани

Спиралеобразный нисходящий поток частью своей внешней границы совместно с плоскостью симметрии и торцом передней призмы в межторцевой области образуют пространство, в котором потоком с верхней грани призмы формируется еще одно сворачиваемое по спирали течение. На рис. 8 показана линия тока, проходящая через точку 13 (0.45; 3.6; 0.17) м и принадлежащая этой внешней границе. А линия тока, проходящая через рядом стоящую точку 14 (0.45; 3.6; 0.2) м, уже образует спиральное течение в верхней части межторцевого пространства. Эта линия тока сходит с верхней грани передней призмы в межторцевое пространство, разворачивается вдоль торца задней призмы по направлению к плоскости симметрии; далее линия тока искривляется, затем вдоль торца передней призмы попадает в область стекающего с верхней грани потока и уносится им вдоль верхней грани задней призмы (рис. 8, б).

В качестве примера линий тока, формирующих вихревое течение в верхней части межторцевого пространства, на рис. 9 показаны линии тока, проходящие через точки 15 и 16.

Аналогичный характер имеют все линии тока, принадлежащие периферийным слоям вихревого течения в верхней части межторцевого пространства, то есть

линии тока с верхней грани передней призмы после циркуляции в межторцовом пространстве попадают на верхнюю грань задней призмы.

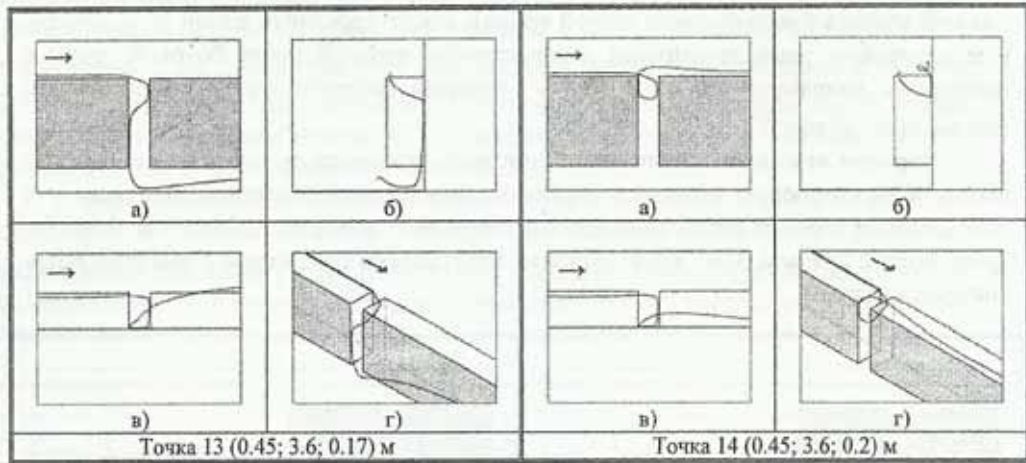


Рис. 8. Линии тока поверхности, отделяющей спиралеобразный нисходящий поток (а) и вихревое течение в верхней части межторцового пространства (б)

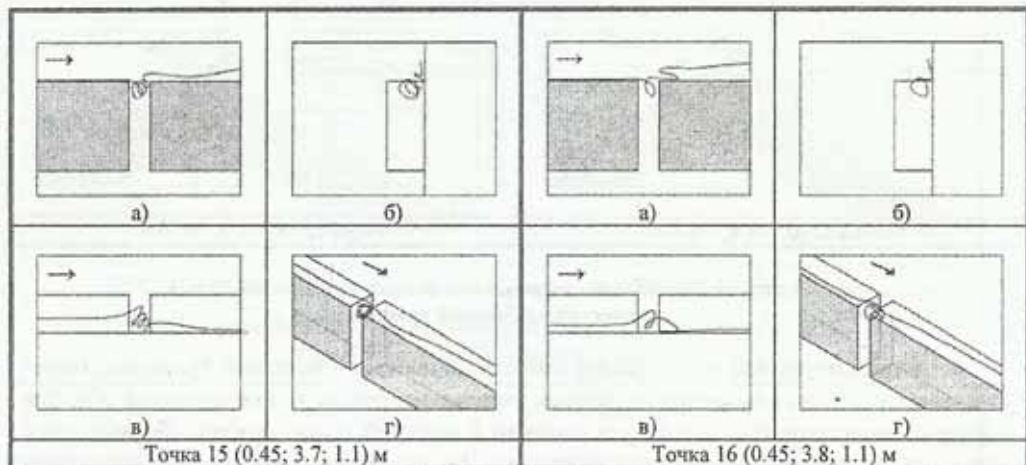


Рис. 9. Вихревое течение в верхней части межторцового пространства

Однако, расчетами установлено, что для линий тока в центральной части вихревого течения характерна иная тенденция, чем отмеченная для точек 14, 15, 16. Линии тока центральной части (окрестность угловой области стекания, образованной торцом и верхней гранью задней призмы с плоскостью симметрии), проходя центральную часть вихревого течения, с высокой частотой вращения на выходе взаимодействуют с нисходящим спиралевидным течением и уносятся под нижнюю грань призмы – днище вагона. Такой характер течения подтверждает рис. 10, построенный для линий тока, проходящих через точки 17 и 18.

В исследуемой области течения между торцами прямоугольных призм (рис. 11) в направлении оси X показана структура течения в сечениях 1 – 9 в виде проекций вектора скорости на рассматриваемое сечение в каждом расчетном узле: сечение 1 для $X/B \approx 0$, сечения 2...5 соответственно для

$X/B = 0,25; 0,5; 0,75; \approx 1$. В напрямленні осі Y сечення 7 при $Y = 0$ відповідає рівню нижньої грани призми, то єть дніщу вагона, а сечення 8 при $Y = 3,692$ м – рівню верхньої грани призми, то єть крыше вагона. Сечення 6 при $Z = 1,553$ м знаходиться в продольній площині симетрії прямокутних призм, паралельній площині XOY , а сечення 9 при $Z = 0$ знаходиться в площині бокової грани призм, імітующої бокову стінку вагона. Из структури течення в межторцовому просторстві (рис. 11) видно, в частині, як потоки с верхньої і бокової граней передньої призми в схемі «тандем», попадаючи в межторцову область, розворачиваються в напрямленні торца другої призми (сечення 5) і к площині симетрії (сечення 6), на кожній из которых установленны точки присоединения и растекания Π_5 и Π_6 , соответственно, что указывает на существование вихревых спиралеобразных структур.

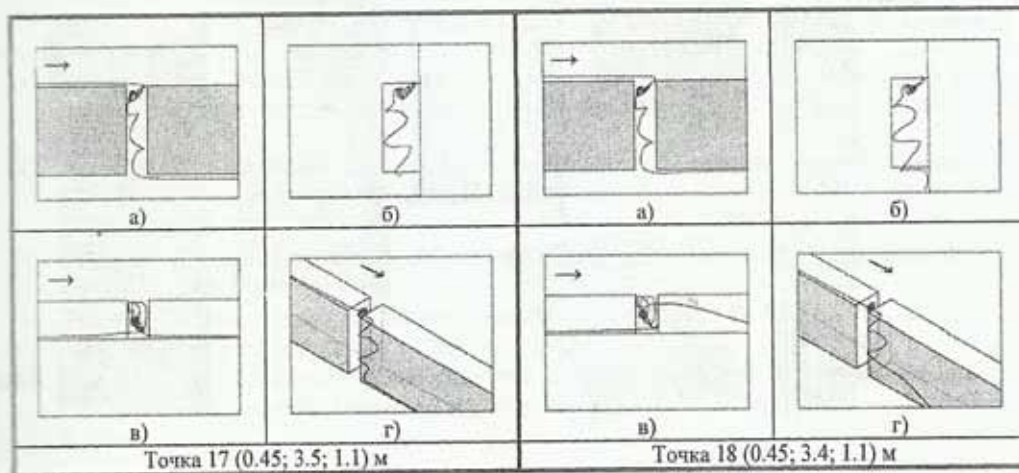


Рис. 10. Течення из центральной области вихря в верхней части межторцового пространства

Таким образом, установленная картина течення в межторцовой области двух призм над экраном принципиально отличается от аналогичной задачи в двумерной постановке [2; 3]. Некоторое внешнее сходство течений можно отметить, сравнивая вихревое течення в верхней части межторцового пространства и циркуляционное течення в каверне без дна над экраном. Однако, по существу, структура трехмерного течення в межторцовой области является гораздо более сложной. Возникает два вихревых течення: одно – спиралеобразное нисходящее, другое – вихревое, состоящее из периферийного и центрального, взаимодействующего со спиралеобразным нисходящим. Такой характер течення в межторцовом пространстве вызывает качественно иное распределение кинематических и динамических параметров в исследуемой области течення. А это означает, что корректное моделирование процессов, происходящих в межвагонном пространстве, возможно лишь при рассмотрении задачи в трехмерной постановке.

Выводы. Анализ структуры течення в межторцовом пространстве позволил выделить следующие основные потоки и вихревые образования:

- 1) спиралеобразное нисходящее;
- 2) вихревое, состоящее из периферийного и центрального, взаимодействующего со спиралеобразным нисходящим.

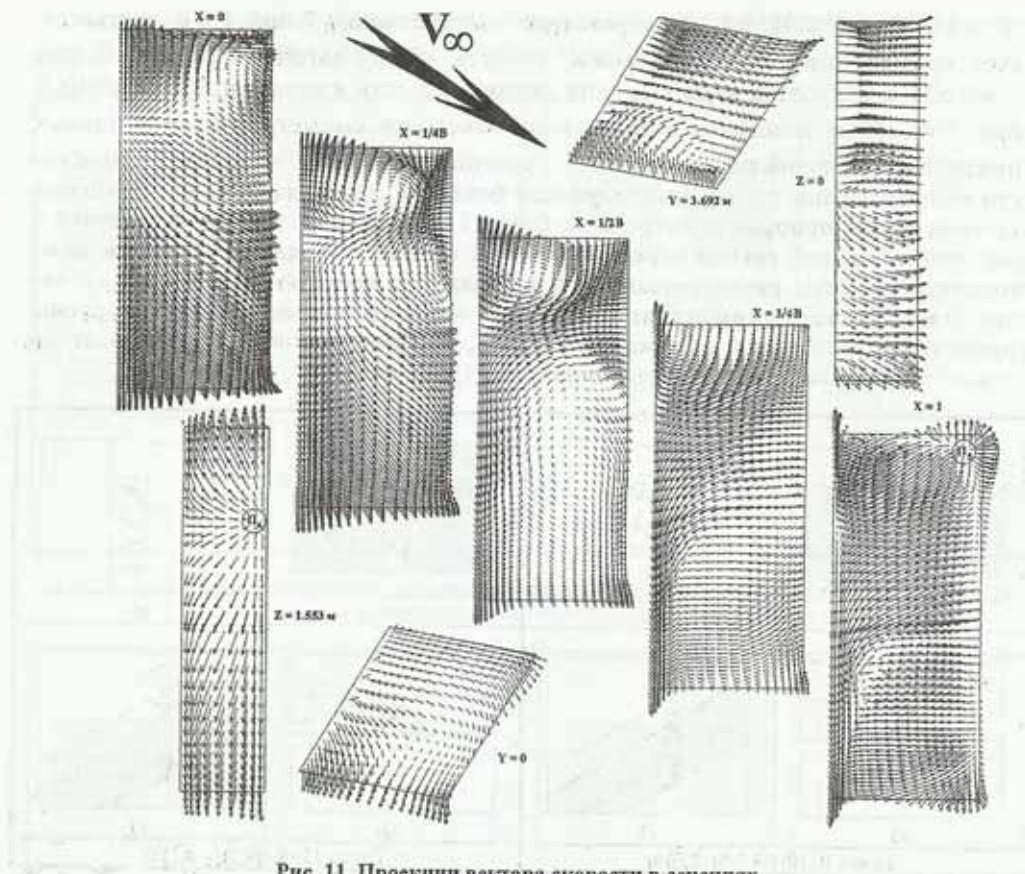


Рис. 11. Проекції вектора швидкості в сеченнях

1 ($X/B \approx 0$), 2 ($X/B = 0.25$),

3 ($X/B = 0.5$), 4 ($X/B = 0.75$),

5 ($X/B \approx 1$), 6 ($Z = 1.553$ м – площини симетрії),

7 ($Y = 0$), 8 ($Y = 3.692$ м), 9 ($Z = 0$)

між торцями прямокутних призм, розташованих тандемом над екраном

Бібліографічні посилання

1. Абрамович А.К. К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле / А.К. Абрамович. // Труды ЦАГИ. – 1939. – Вып. № 400. – 32 с.
2. Кравец Е.В. Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2006. – Вип. 10, т. 1, № 2/1. – С. 113–119.
3. Кравец Е.В. Сравнительный анализ течения в открытом и частично перекрытом межвагонном пространстве при движении скоростного поезда / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2004. – Вып. 8, т. 1. – С. 26–33.
4. Петров Г.И. Экспериментальное исследование аэродинамики скоростных поездов / Г.И. Петров, С.М. Горлин, Г.А. Романенко // Науч. труды НИИ механики МГУ. – 1966. – Вып. № 523. – 128 с.
5. Романенко Г.А. Влияние формы скоростного поезда на его воздушное сопротивление / Г.А. Романенко // Науч. труды НИИ механики МГУ. – 1967. – Вып. № 741. – 65 с.

6. **Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт.** В прошлом, настоящем и будущем. К 150-летию железнодорожной магистрали Санкт-Петербург–Москва. – Т.1 – СПб., 2001. – 320 с.
7. **Сюзюмова Е.М.** Анализ модельных испытаний в аэродинамической трубе поездов различной геометрической формы и сравнение результатов этих испытаний с натурными опытами для тех же поездов / Е.М. Сюзюмова, Г.А. Романенко // Науч. труды НИИ механики МГУ. – 1974. – Вып. № 21846. – 104 с.
8. **Сюзюмова Е.М.** Оценка количественных и качественных характеристик воздушного сопротивления скоростного поезда / Е.М. Сюзюмова, Г.А. Романенко // Вестник Всесоюз. научн.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 1979. – № 4. – С. 22–26.
9. **Сюзюмова Е.М.** Экспериментальное исследование поля скоростей вокруг скоростного поезда / Е.М. Сюзюмова, Г.А. Романенко // В кн.: Совершенствование процессов теплообмена и аэродинамики электроподвижного состава. Труды Всесоюзн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. М., 1979. – Вып. 617. – С. 86–96.
10. **Худяков Г.Е.** Исследование ветровых нагрузок, действующих на вагон / Г.Е. Худяков // Науч. труды НИИ механики МГУ. – 1987. – Вып. № 3408. – 21 с.
11. **Худяков Г.Е.** Обоснование выбора внешней геометрической формы скоростных поездов / Г.Е. Худяков // Науч. труды НИИ механики МГУ. – 1988. – Вып. № 3666. – 79 с.
12. **Sutter K.** Untersuchungen über den Luftwiderstand an Eisenbahnfahrzeugen in Tunneln / K. Sutter // Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt. – 1930 – № 18. – S. 109–122.
13. **Theopold L.** Reisezugwagen für 200 km/h / L. Theopold // Deutsches Eisenbahn technick. – 1967. – 15, № 6. – S. 156–162.
14. **Tollmien W.** Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge / W. Tollmien // Zeitschr. Angew. Mathem. u Mech. – 1926. – № 6. – S. 76–79.
15. **Vogelpohl G.** Windkanalversuche über den Luftwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen / G. Vogelpohl // Verein Deutscher Ingenieure. – Bd. 78. – 3 Feb. – 1934. – № 5. – S. 59–67.

Надійшла до редколегії 01.10.10

УДК 551.509

Е.В. Егоров, Н.Н. Лычагин

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ГОРОДСКОГО ЛАБИРИНТА

Розглянуто фільтраційну математичну модель розповсюдження забруднюючих домішок в атмосфері великих міст зі щільною та висотною забудовою (міський лабіринт). Запропоновано наближений метод розрахунку полів швидкості вітру та концентрацій забруднень у приземному шарі атмосфери від наземних точкових та лінійних джерел, які моделюють промислові димові труби на рух автомобільного транспорту вздовж вулиць міста.

Ключові слова: забруднення міської атмосфери, фільтраційна модель розповсюдження забруднень, точкові та лінійні джерела забруднення.

Рассмотрена фильтрационная математическая модель распространения загрязняющих примесей в атмосфере больших городов с плотной и высотной застройкой (городской лабиринт). Предложен приближенный метод расчета полей скорости ветра и концентрации загрязнений в приземном слое атмосферы, поступающих от наземных точечных и линейных источни-