

6. Wang Z. J. A fully automated Chimera methodology for multiple moving body problems / Z. J. Wang // AIAA Paper 1998-217.
7. Brown D. L. Overture – Object-oriented tools for overset grid applications / D. L. Brown, D. William // AIAA Paper 1999-3130.
8. Spalart P. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA Paper 1992-0439.
9. Spalart P. R. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature / P. R. Spalart, M. L. Shur // Aerospace Science and Technology. – 1997. – № 5. – P. 297–302.
10. Rung T. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation / T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P. 1396–1399.
11. Rogers S. E. An upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations / S. E. Rogers, D. Kwak // AIAA Journal. – 1990. – Vol. 28, № 2. – P. 253–262.
12. Roe P. L. Approximate riemann schemes / P. L. Roe // Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 43. – P. 357–372.
13. Zijlema M. On the construction of third-order accurate TVD scheme using Leonard's normalized variable diagram with application to turbulent flows in general domains / M. Zijlema // Delft University of Technology: Technical Report DUT-TWI-94-104. – 1994. – 25 p.
14. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер. – М., 1991. – Т. 1. – 501 с. – Т. 2. – 552 с.
15. Bonhaus D. L. Numerical study to assess sulfur hexafluoride as a medium for testing multielement airfoils / D. L. Bonhaus, W. K. Anderson, D. J. Mavriplis // NASA Technical Paper 3496, 1995. – 31 p.

Надійшла до редколегії 12.12.2011

УДК 533.601:656.2

**Е. В. Кравец**

*Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара*

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ МЕЖТОРЦЕВОГО ПРОСТРАНСТВА НА СТРУКТУРУ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЯЗКИМ НЕСЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРИЗМ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ТАНДЕМОМ НАД ЭКРАНОМ

Проведено тривимірний чисельний розрахунок течії нестисливої в'язкої рідини при обтіканні двох призм, що розташовані тандемом над екраном при наявності часткового перекриття міжторцевого простору. Система моделює рух повітря навколо вагонів з міжвагонними переходами поблизу поверхні землі при русі швидкісного потяга. Виконано аналіз структури течії та закономірностей вихороутворення в частково перекритому міжторцевому просторі призм. Визначено коефіцієнт аеродинамічного опору частково перекритого міжторцевого простору. Встановлено вплив часткового перекриття на структуру вихороутворення в міжторцевому просторі призм поблизу екрана.

**Ключові слова:** швидкісний потяг, обтікання двох призм тандемом поблизу екрана при наявності часткового перекриття, аеродинамічний опір міжторцевого простору з перекриттям, вплив часткового перекриття на структуру вихороутворення.

Проведен трехмерный численный расчет течения вязкой несжимаемой жидкости при обтекании двух призм, расположенных тандемом над экраном, при наличии частичного перекрытия межторцевого пространства. Система моделирует движе-



ние воздуха вокруг вагонов с межвагонными переходами вблизи поверхности земли при движении скоростного железнодорожного состава. Выполнен анализ структуры течения и закономерностей вихреобразования в частично перекрытом межторцовом пространстве призм. Определен коэффициент аэродинамического сопротивления частично перекрытого межторцевого пространства. Установлено влияние частичного перекрытия на структуру вихреобразования в межторцевом пространстве призм над экраном.

**Ключевые слова:** скоростной поезд, обтекание двух призм тандемом вблизи экрана при наличии частичного перекрытия, аэродинамическое сопротивление межторцевого пространства.

The three-dimensional numerical calculation of viscous incompressible liquid flow around two prisms tandem located above the screen at existence of partial blocking inter-end space is carried out. This system models the air movement around the cars with intercarload space at near-ground surface while the high-speed train moving. The analysis of flow structure and vortex formation laws in part blocked inter-end space prisms is executed. The drag coefficient of part blocked inter-end space is determined. Influence of partial blocking on structure of vortex formation in inter-end space prisms above the screen is established.

**Key words:** high-speed train, flow around two prisms tandem located above the screen, the drag coefficient of part blocked inter-end space, influence of partial blocking on structure of vortex formation.

**Введение.** К началу 30-х годов прошлого столетия максимальные скорости поездов достигли  $100 \div 120$  км/ч [6]. К концу XX века эксплуатационные скорости перевозок по железной дороге превысили 300 км/ч в Италии – с 1988 года, в Испании – с 1991 года, в Великобритании – с 1994 года, в Японии – с 1997 года, в Германии – с 1998 года (330 км/ч), во Франции – с 1989 года (350 км/ч).

Работы, начатые французскими и немецкими специалистами по модернизации подвижного состава и контактной сети, позволили реализовать еще более высокий скоростной режим движения колесного подвижного состава и в ряде других зарубежных стран.

Таким образом, к настоящему времени для колесного железнодорожного транспорта достигнуты следующие рекордные скорости: во Франции – 515 км/ч (1990), Японии – 443 км/ч (1996), Германии – 406 км/ч (1988), Испании – 359 км/ч (2001), Италии – 316 км/ч (1988).

Проведенные испытания показали, что существующая система рельсового транспорта имеет ограничение по скорости передвижения, которая определяется многими факторами, в том числе, геометрической формой внешних обводов локомотива и вагонов, т. е. аэродинамикой [7]. При движении с большими скоростями аэродинамическое сопротивление становится доминирующим над сопротивлением трения подвижных частей железнодорожного состава, поэтому исследования по выявлению структуры течения вблизи внешних границ скоростного поезда и расчеты его аэродинамического сопротивления приобретают актуальный характер.

**Постановка задачи.** Моделирование течения в межвагонном пространстве при движении скоростного поезда осуществлялось в задаче обтекания дозвуковым несжимаемым потоком двух призм, расположенных тандемом по отношению к направлению набегающего потока, над экраном, имитирующим поверхность земли. Исследование структуры образования вихревой системы в открытом межторцевом пространстве двух призм над экраном приведено в [2; 3], где описана модель обтекания и граничные условия во входном и выходном сечениях расчетной области, на ее границах, на экране (поверхности земли) с учетом пограничных слоев на верхней грани призмы (крыше вагона), боковых гранях прямоугольных призм (боковых стенках вагонов) и под нижней гранью (под днищем



вагонов). Наличие межторцевого перекрытия, моделирующего межвагонный переход, учитывалось заданием условия прилипания на верхней, нижней и боковых его стенках.

Целью работы является установление влияния частичного перекрытия, моделирующего межвагонный переход, на вихревой характер течения между призмами, а также на изменение аэродинамического сопротивления системы «две призмы – перекрытие» над экраном в сравнении с вариантом открытой межторцевой области.

На рис. 1 показана схема расположения частичного перекрытия между призмами над экраном.

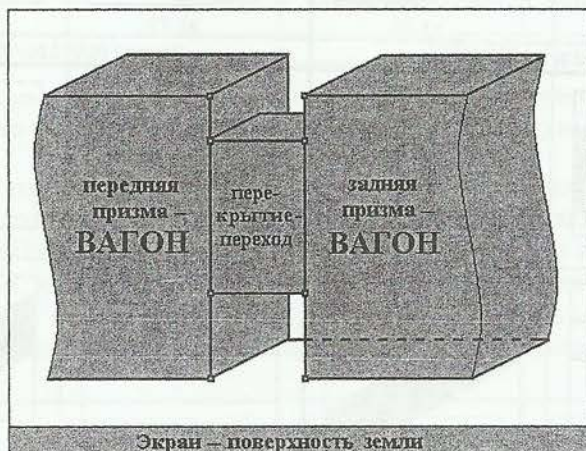


Рис. 1. Схема размещения частичного перекрытия межторцевого пространства двух призм над экраном

**Анализ результатов.** Наличие частичного перекрытия в межторцевом пространстве и его объемная протяженность способны вызвать не только качественную перестройку течения в остальной межторцевой области (по сравнению с обтеканием открытого межторцевого пространства), но и повлиять на количественные значения компонент скорости, давления, изменить распределение касательного напряжения на поверхности призм, что повлечет за собой изменение аэродинамического сопротивления межторцевого пространства.

Ниже рассмотрен случай, когда геометрия перекрытия по отношению к межторцевой области масштабировалась по аналогии с межвагонным переходом и межвагонным пространством.

Расчетами показано, что поток, отстоящий от боковой грани передней призмы на расстоянии  $Z = -0.1$  м по высоте  $3.8$  м  $\leq Y \leq -0.2$  м локально втекает со стороны боковой грани в межторцевую область с перекрытием (рис. 2) только в диапазоне  $0.5$  м  $\leq Y \leq 0.8$  м (рис. 3) и в окрестности нижнего наружного угла, образованного боковой, нижней и торцевой гранями (рис. 4).

При локальном втекании потока со стороны боковой грани передней призмы в межторцевой области в диапазоне  $0.5$  м  $\leq Y \leq 0.8$  м (рис. 3) возникает спиральное восходящее струйное течение с последующим растеканием вдоль верхней и боковой граней задней призмы в направлении основного потока.

Локальное стекание потока с боковой и нижней граней передней призмы в окрестности наружного угла нижней части межторцевой области (рис. 4) также перестраивается в струйный поток в области между нижней гранью задней призмы и экраном.



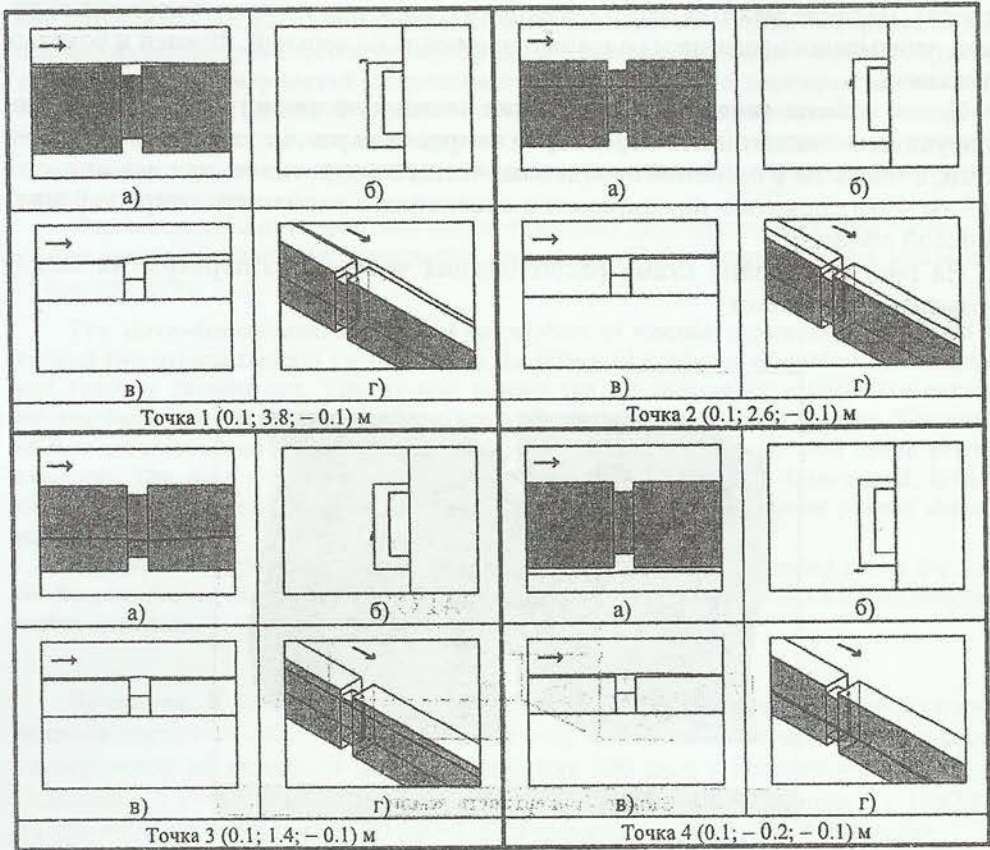


Рис. 2. Траектории движения частиц с координатами:  
 $X = 0.1 \text{ м}, -0.2 \text{ м} \leq Y \leq 3.8 \text{ м}, Z = -0.1 \text{ м}$

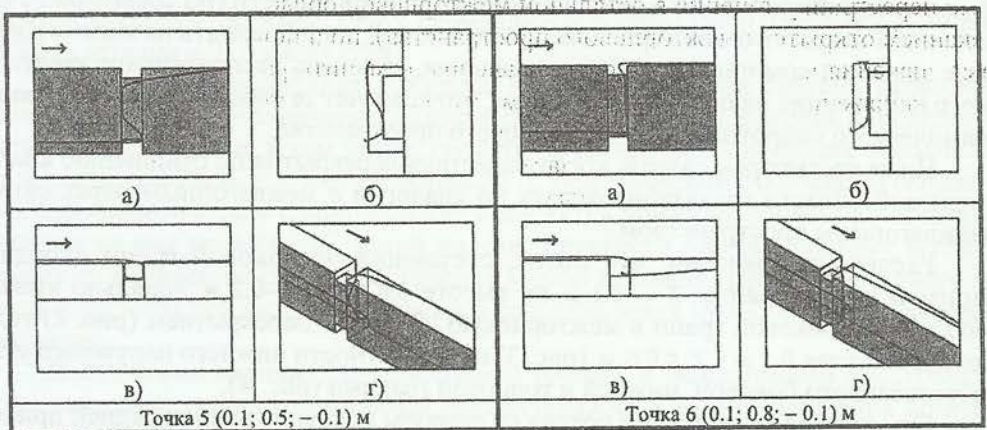


Рис. 3. Спиральная восходящая струя в межторцевой области

При расчете течения над верхней гранью передней призмы установлено, что втекание в межторцевую область характерно для линий тока, находящихся в непосредственной близости к верхней грани, а именно при  $Y \leq 3.7 \text{ м}$  (высота призмы  $Y = 3.692 \text{ м}$ ).



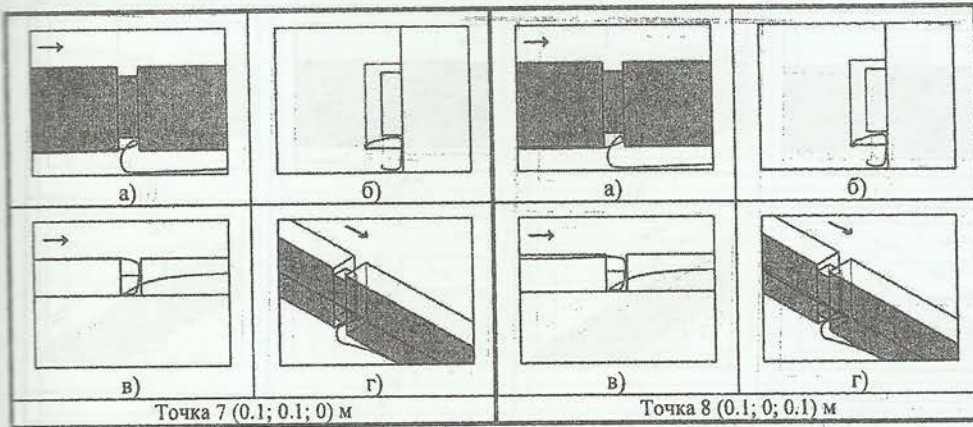


Рис. 4. Локальное стекание в межторцовую область в окрестности нижнего наружного угла (начало декартовой системы координат) передней призмы

Также расчетами подтверждено, что линии тока, имеющие координату  $Y = 3.8$  м, и расположенные по всей ширине этой грани, обтекают сформированные в межторцовую область вихревые структуры и не попадают в эту область.

Таким образом, в межторцовую область со стороны верхней грани втекает достаточно «тонкая» в виде ленты струя, шириной  $1.1$  м  $\leq Z \leq 1.553$  м, участвующая в создании вихревой структуры над верхней гранью перекрытия (рис. 5).

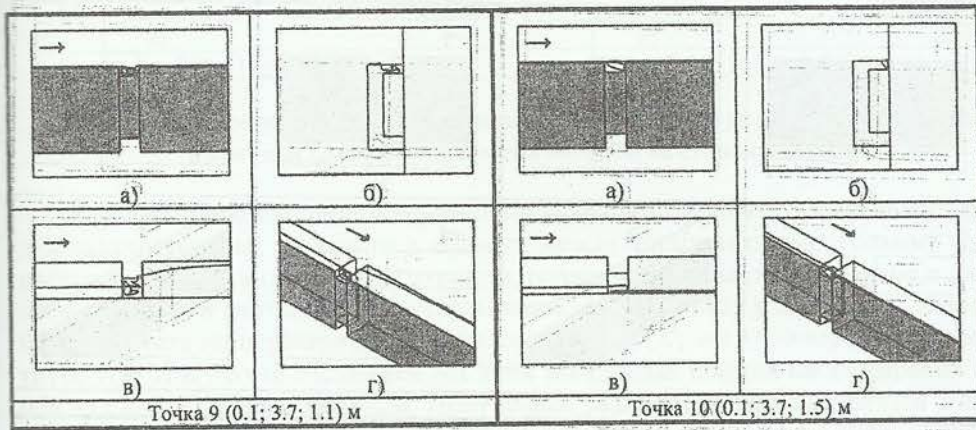


Рис. 5. Вихревая структура над верхней гранью частичного перекрытия

Поток между нижней гранью передней призмы и экраном также не попадает в межторцовую область по всей ширине нижней грани (рис. 6, точка 12). Однако, обнаружена группа линий тока, непосредственно примыкающих к нижней грани, а также отдельные линии тока, которые в зависимости от координаты  $Z$  различным образом отклоняются в межторцовую область. Например, согласно рис. 4 линия тока с точкой 8 (0.1; 0.0; 0.1) м огибает нижнюю часть межторцового пространства под перекрытием со стороны наружного угла призмы по направлению ее продольной плоскости симметрии, стекая под нижнюю грань задней призмы. Под перекрытие также попадают все линии тока, стекающие с нижней грани передней призмы и проходящие через точки с координатой  $1.2$  м  $\leq Z \leq 1.553$  м. Эти линии тока совместно со струйным потоком из окрестности нижнего наружного угла, формируют нижнюю вихревую структуру под перекрытием между торцами соседних призм (рис. 7).



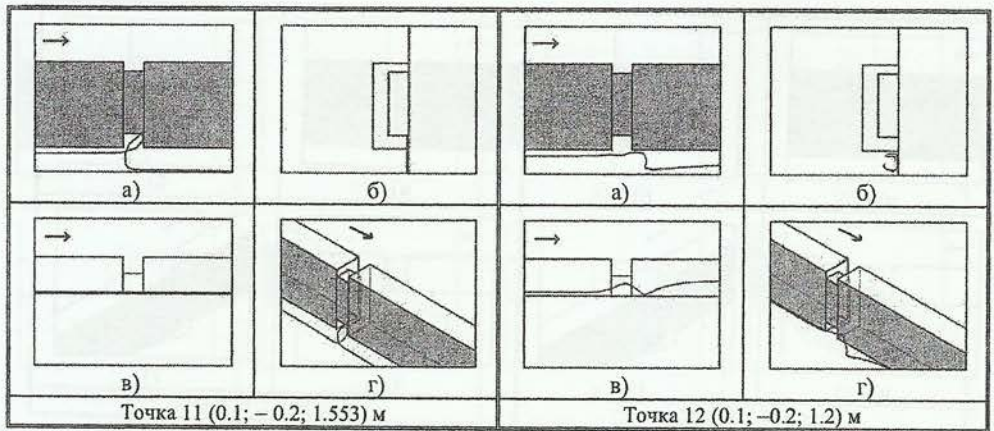


Рис. 6. Траектории движения частиц с координатами:  
 $X = 0.1 \text{ м}, Y = -0.2 \text{ м}, 1.2 \text{ м} \leq Z \leq 1.553 \text{ м}$

Другая группа линий тока, стекающих с нижней грани передней призмы через точки с координатами  $0.2 \text{ м} \leq Z \leq 0.8 \text{ м}$ , совместно с линиями тока, попадающими в нижнюю область межторцового пространства с боковой грани призмы, формируют вдоль боковой стенки перекрытия *спиральный восходящий поток* (рис. 8).

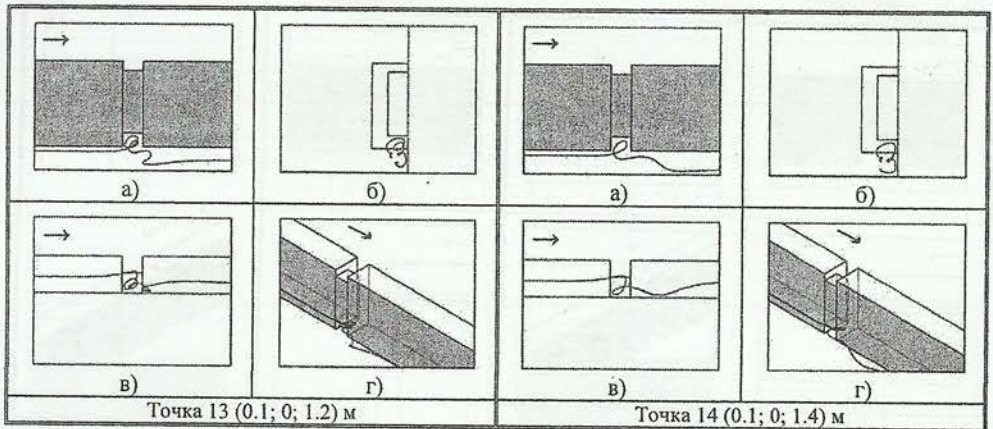


Рис. 7. Формирование вихревой структуры под перекрытием в межторцовом пространстве

Установлено, что слияние потоков из-под нижней и боковой граней передней призмы в межторцовом пространстве на боковой стороне перекрытия приводит к возникновению достаточно интенсивного спирального потока, который в дальнейшем растекается по верхней и боковой граням задней призмы.

Таким образом, спиральные восходящие потоки вдоль боковых стенок перекрытия совместно с вихревыми структурами на верхней и нижней гранях перекрытия вызывают в межторцовой области призм возникновение тороподобного циркуляционного течения с возрастающей интенсивностью по направлению  $Y$ .

**Расчет аэродинамического сопротивления межвагонного пространства.** На основании проведенных расчетов по полученным полям распределения скорости, давления и касательных напряжений на основании теоремы импульсов [2] были рассчитаны коэффициенты аэродинамического сопротивления открытого межторцового пространства ( $C_x = 0.026$ ) и межторцового пространства с перекрытием ( $C_x = 0.015$ ).



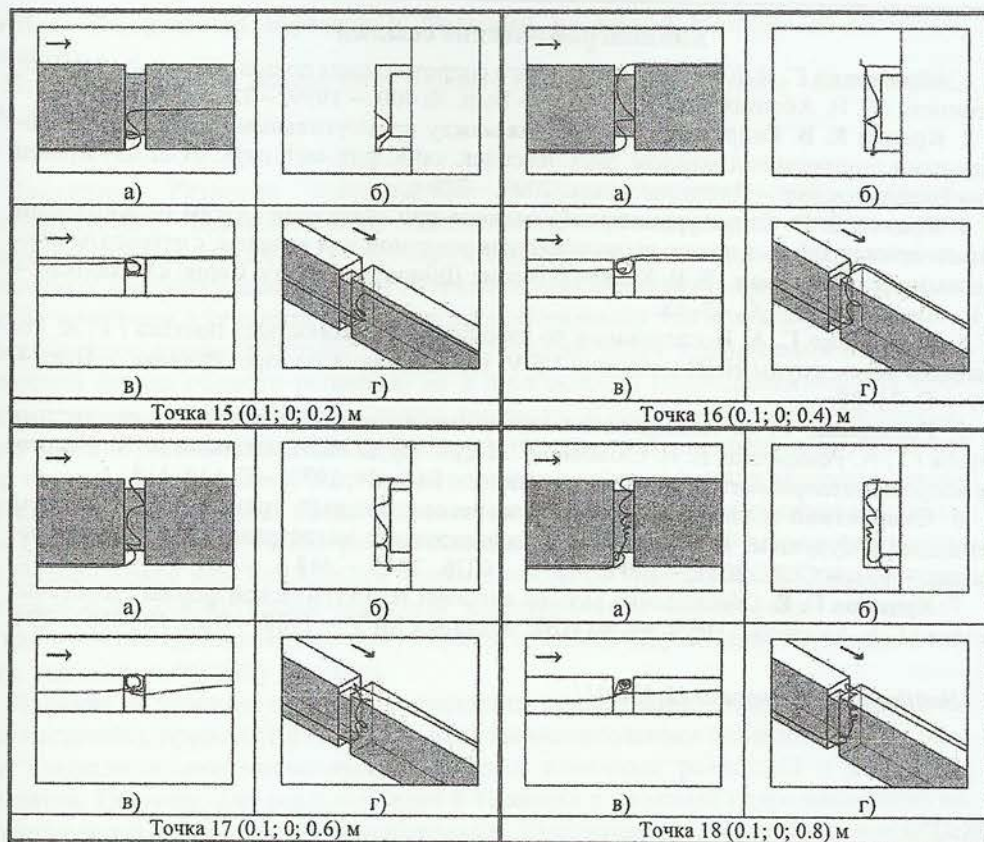


Рис. 8. Формирование восходящего спирального течения между торцами призм и боковой гранью перекрытия потоком со стороны экрана

Рассчитанные значения коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  для задачи течения жидкости в области между торцами прямоугольных призм, расположенных тандемом над экраном, позволили провести сравнение с данными инженерной методики Г.Н. Абрамовича [1] ( $C_x = 0.023$ ), а также со значениями результата эксперимента Г.А. Романенко [4; 5] ( $C_x = 0.02$ ) в аэродинамической трубе А-6 Института Механики МГУ на модельных копиях пассажирских вагонов над неподвижным экраном. Полученное различие между расчетным и экспериментальными значениями коэффициента сопротивления могут быть связаны, с одной стороны, влиянием замены подвижной поверхности земли неподвижным экраном при моделировании в процессе эксперимента, а с другой стороны – схематизацией в расчетах конфигурации вагонов и межвагонного пространства геометрическими фигурами в виде прямоугольных призм.

**Выводы.** Наличие частичного перекрытия в межторцовом пространстве приводит к изменению структуры образования системы вихрей, что влечет за собой снижение коэффициента аэродинамического сопротивления с  $C_x = 0.026$  (для открытого межторцового пространства) до  $C_x = 0.015$  (для межторцового пространства с частичным перекрытием). При этом изменения в структуре образования вихревой системы выражаются в следующем:

- 1) существовавшее в открытом межторцовом пространстве спиралеобразное нисходящее течение преобразуется в спиральный восходящий поток;
- 2) периферийное и центральное течения открытого межторцового пространства перестраиваются при появлении перекрытия в тороподобную циркуляционную вихревую структуру вокруг него.



## Бібліографічні посилання

1. Абрамович Г. Н. К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле / Г. Н. Абрамович // Тр. ЦАГИ. – Вып. № 400. – 1939. – 32 с.
2. Кравец Е. В. Гидродинамика течения между прямоугольными призмами, расположенными тандемом над экраном: дисс. на соиск. канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Кравец Елена Владимировна. – Днепропетровск, 2009. – 229 с.
3. Кравец Е. В. Структура вихребразования при обтекании вязким несжимаемым потоком прямоугольных призм, расположенных тандемом над экраном, с открытым межторцовым пространством / Е. В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: «Механіка». – 2011. – Вып. 15, т. 1. – С. 43–53.
4. Романенко Г. А. Исследования по аэродинамике скоростных поездов / Г. А. Романенко // Науч. труды НИИ механики МГУ. Исследования по аэродинамике. – Вып. 4, 1969. – С. 74–86.
5. Романенко Г. А. Исследования аэродинамического сопротивления скоростных поездов / Г. А. Романенко, Е. И. Сюзюмова // Науч. труды НИИ механики МГУ. Некоторые вопросы экспериментальной аэродинамики. – Вып. 24, 1973. – С. 110–118.
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. – Т. 2. – СПб., 2003. – 448 с.
7. Худяков Г. Е. Обоснование выбора внешней геометрической формы скоростных поездов / Г. Е. Худяков // Науч. труды НИИ механики МГУ. – 1988. – Вып. № 3666. – 79 с.

Надійшла до редколегії 12.12.2011.

УДК 532.5

Ю. В. Бразалук, Д. В. Евдокимов, В. Г. Решняк

Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

### РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ СЛОЖНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ

Узагальнено комбінований метод граничних елементів і дискретних вихорів для розрахунку течій навколо складних гідродинамічних конфігурацій. Концепція локалізованих об'єктів розглядається як природне узагальнення методу дискретних вихорів. Показано, що розгляд дискретних диполів разом із дискретними вихорами може поліпшити ефективність обчислювального алгоритму.

Ключові слова: течія в області складної форми, метод граничних елементів, метод дискретних вихорів, диполь, локалізація.

Комбинируемый метод граничных элементов и дискретных вихрей обобщен для расчета обтекания сложных гидродинамических конфигураций. Концепция локализованных объектов рассматривается как естественное обобщение метода дискретных вихрей. Показано, что введение в рассмотрение дискретных диполей наряду с дискретными вихрями может улучшить эффективность вычислительного алгоритма.

Ключевые слова: течение в области сложной формы, метод граничных элементов, метод дискретных вихрей, диполь, локализация.

The combined boundary elements and discrete vortex method is generalized for calculation of fluid flows near complex configurations. The localized object conception is natural generalization of discrete vortex method. It is shown that introduction of discrete dipoles together with discrete vortices can improve an effectiveness of computational