

В.В. КРАВЕЦ, д-р техн. наук, проф., ДИИТ (Украина)  
Е.В. КРАВЕЦ, ДНУ, (Украина)

## АЭРОДИНАМИКА ЧАСТИЧНО ПЕРЕКРЫТОГО МЕЖВАГОННОГО ПРОСТРАНСТВА СКОРОСТНОГО ПОЕЗДА

Розглянуто вплив аеродинамічних процесів на опір міжвагонного простору при зміні конфігурації його огороження і збільшення швидкості руху поїзда.

Рассмотрено влияние аэродинамических процессов на сопротивление межвагонного пространства при изменении конфигурации его ограждения и увеличения скорости движения поезда.

The influence of aerodynamic processes on resistance of intercarload space at change of a configuration of its protection and increase of speed of movement of a train is considered.

С увеличением скорости движения железнодорожного транспорта влияние аэродинамических процессов на сопротивление поезда становится доминирующим.

Из работ [1...4] следует, что при скорости движения 30 км/ч аэродинамическое сопротивление движущегося состава составляет всего 6% от полного сопротивления, обусловленного механическими факторами; с увеличением скорости движения до 100...160 км/ч роль процессов аэродинамики возрастает и составляет уже 35...40% и, наконец, при скорости 350 км/ч аэродинамическое сопротивление подвижного состава равно его полному сопротивлению. На рис. 1 показаны кривые зависимостей полного и аэродинамического сопротивлений от скорости движения поезда и его протяженности.

Верхняя группа сплошных кривых 1...5 относится к полному сопротивлению  $W_{\Pi}$ , а нижние кривые 1...5 – к аэродинамическому сопротивлению  $W_A$ . Сплошные кривые получены по результатам экспериментальных исследований [2, 4], пунктирные кривые 1 и 2 – из [1] и [3] соответственно. Следует учесть, что аэродинамическое сопротивление движению возрастает пропорционально квадрату скорости движения поезда, а механическое сопротивление, связанное с состоянием рельсовых путей, работой механизмов передачи тяги, весом состава и другими факторами, меняется линейно скорости. Поэтому при некотором значении скорости аэродинамическое сопротивление должно стать доминирующим по сравнению с механическим. Из рис. 1 следует, что это происходит при скоростях движения поезда 150...200 км/ч и более. С улучшением аэродинамической обтекаемости подвижного состава аэродинамическое сопротивление уменьшается. Поэтому решение тех-

нической задачи по созданию совершенной аэродинамической формы поезда является одной из наиболее важных проблем скоростного движения.

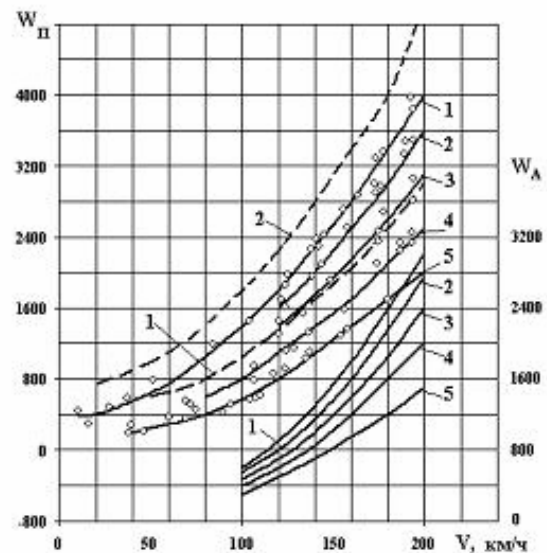


Рис. 1. Влияние на полное и аэродинамическое сопротивление скорости движения поезда и его протяженности:

1 – электровоз с четырьмя вагонами; 2 – электровоз с тремя вагонами; 3 – электровоз с двумя вагонами; 4 – электровоз с одним вагоном; 5 – электровоз.

На величину аэродинамического сопротивления подвижного состава влияет совершенство аэродинамических обводов локомотива, вагонов с межвагонным пространством и различными надстроечными элементами кузова, включая поручни дверей, фальшборта, фартуки тележек, перекрытия днища и обтекатель хвостового вагона.

Для уменьшения аэродинамического сопротивления выступающие элементы конструкции

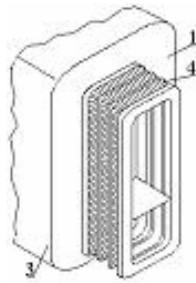
кузова вагона скоростного подвижного состава закрывают обтекателями, а для межвагонных промежутков используют геометрически деформированные ограждения. Наиболее широкое применение получили конструкции ограждений перехода, изображенные на рис. 2, а, с гофрированным гибким ограждением фирмы Hübner (рис. 2, б) или с ограждением из эла-

стичных овальных профилей (рис. 2, в). Такие типы ограждений осуществляют частичное перекрытие объема межвагонного пространства пассажирских вагонов и не оказывают заметного влияния на снижение аэродинамического сопротивления при нескоростном режиме движения с малым влиянием аэродинамических процессов.



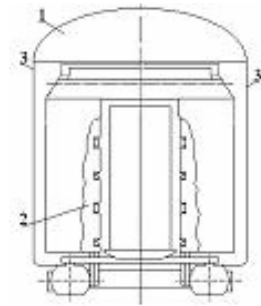
вагон (модель 61-821)

а)



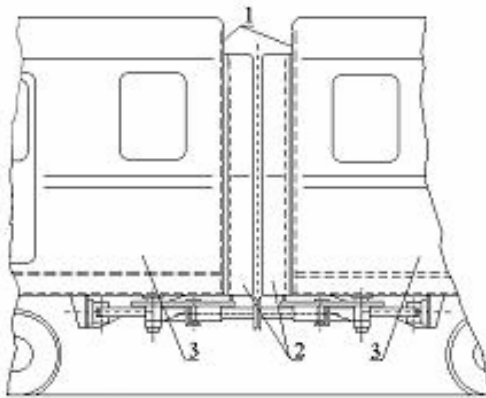
патент №2161575 (Россия)

б)



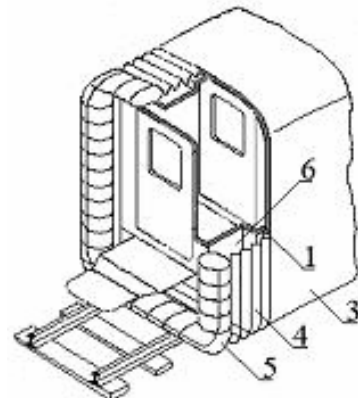
а.с. №1079510 (СССР)

в)



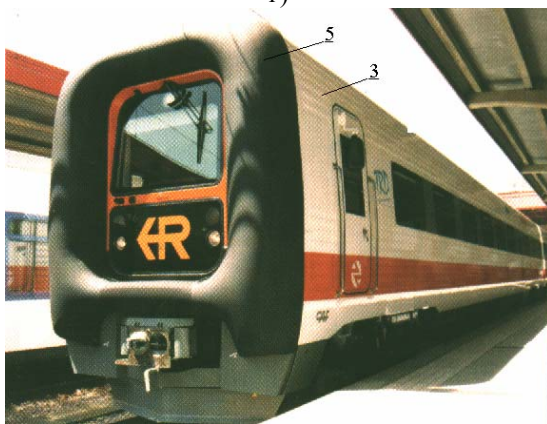
а.с. №1313754 (СССР)

г)



патент №68309 (Германия)

д)



TRD 594 (Испания), max. speed 160 km/h

е)



ETR 500 (Италия), max. speed 300 km/h

ж)

Рис.2. Способы перекрытия межвагонного пространства

Основное назначение ограждений этого типа связано с обеспечением безопасности и комфортных условий перехода пассажиров из вагона в вагон. Для предотвращения попадания пассажира в межвагонный промежуток при падении с платформы предназначено ограждение в виде двух створок 2, являющихся продолжением боковых стенок 3 вагона (рис. 2, г). Створки выполнены шарнирно закрепленными на торцах 1 смежных вагонов с возможностью поворота при вхождении подвижного состава в поворот. В этом случае за счёт изменения взаимного положения торцов смежных вагонов со стороны центра кривой поворота створки, сближаясь, поворачиваются, а на противоположной стороне межвагонного промежутка створки расходятся, но остаются в габарите состава. Такое ограждение перекрывает межвагонное пространство и позволяет на большой скорости движения поезда снизить аэродинамическое сопротивление.

На рис. 2, д, 2, е показана торцовая часть 1 вагона, снабженная по её периметру эластичным перекрытием межвагонного пространства. Ограждение состоит из эластичного гофрированного профиля 4, эластичной оболочки 5, жестко соединяемой гофрированным профилем с торцевой стенкой 1 по периферии. Помимо ограждения торцевая часть вагона снабжена открывающейся промежуточной дверью, главной сцепкой, средствами уплотнения и экранирования межвагонного перехода, которые в совокупности с аналогичными средствами прицепляемого вагона обеспечивают защиту пассажирского межвагонного перехода. Описанная конструкция ограждения является типовой как

для прицепных вагонов со сквозным проходом, так и для головного вагона, когда гофрированная оболочка складывается в специальную нишу 6 (рис. 2, д). Это ограждение на скоростных режимах движения поезда предназначено снизить аэродинамическое сопротивление, обеспечить звуко-тепло-гермоизоляцию и уменьшить воздействие резких перепадов давления в помещении вагона при разъездах со встречными поездами, при въезде в туннель и т.д.

В поездах «Shinkansen» торцы сцепленных вагонов также оборудованы межвагонными гармошками, состоящими из внутренней и наружной частей и обеспечивающими герметичное соединение [5].

Конструкция межвагонного перекрытия, примененного на скоростных поездах Италии, показана на рис. 2, ж. Конструкция ограждения включает две функциональные основные части: герметичный межвагонный переход 4 и жестко закрепленные створки 2 по периметру торца вагона. Причем между створками предусмотрен необходимый зазор, который является достаточным при движении подвижного состава по колею с минимально принятым радиусом кривизны.

С учетом результатов экспериментальных исследований [2, 4] можно оценить влияние внешней геометрии вагона (в том числе, и влияние межвагонного пространства) на абсолютное ( $C_x$ ) и относительное ( $\Delta C_x/nC_x$ ) аэродинамическое сопротивление скоростного поезда, состоящего из трех, шести и десяти вагонов (рис. 3) с конфигурациями лобовой части головного вагона, разработанными специалистами Италии, России и Японии.

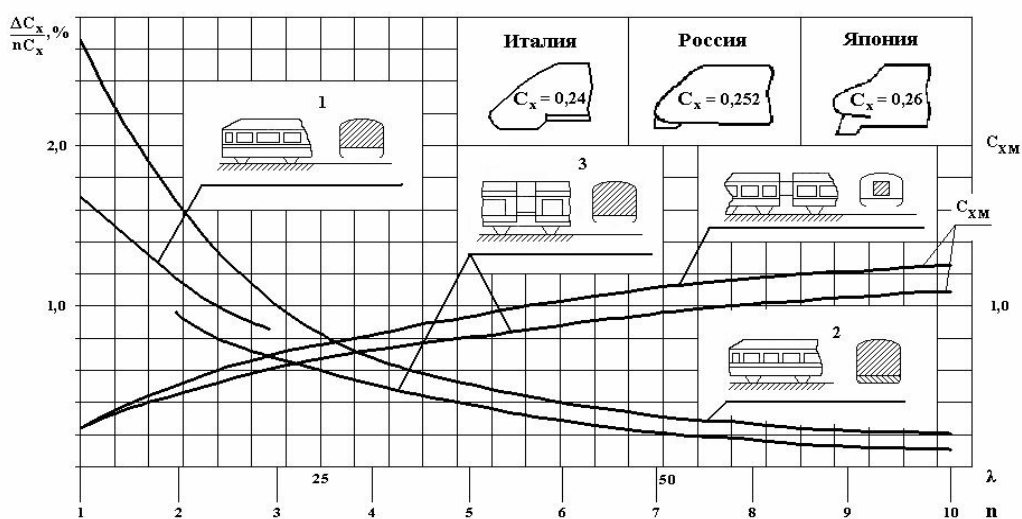


Рис. 3. Влияние установки фальшбортов 1, закрытия днища вагона 2 и межвагонного пространства 3 на аэродинамическое сопротивление поезда  $C_x$  и его относительное изменение  $\Delta C_x/nC_x$ ;  $n$  – количество вагонов,  $\lambda$  – удлинение поезда

Из кривых относительного изменения аэродинамического сопротивления  $\Delta C_x/nC_x$  следует, что большее уменьшение аэродинамического сопротивления происходит при закрытии днища вагона (кривая 2), меньшее – при перекрытии межвагонного промежутка (кривая 3). Для скоростного поезда с тремя вагонами –  $\Delta C_x/nC_x = 7\%$ ; с шестью вагонами –  $\Delta C_x/nC_x = 3\%$ ; с десятью вагонами –  $\Delta C_x/nC_x = 1,35\%$ .

Вторая группа кривых характеризует изменение абсолютного значения аэродинамического

сопротивления, обусловленного перекрытием межвагонного пространства (шкала справа) в зависимости от числа вагонов. Наличие перекрытого межвагонного пространства существенно снижает величины коэффициента сопротивления.

Изменение полного аэродинамического сопротивления и сопротивления межвагонного пространства в зависимости от числа Рейнольдса для трех- и десятивагонного скоростного поезда показано на рис. 4.

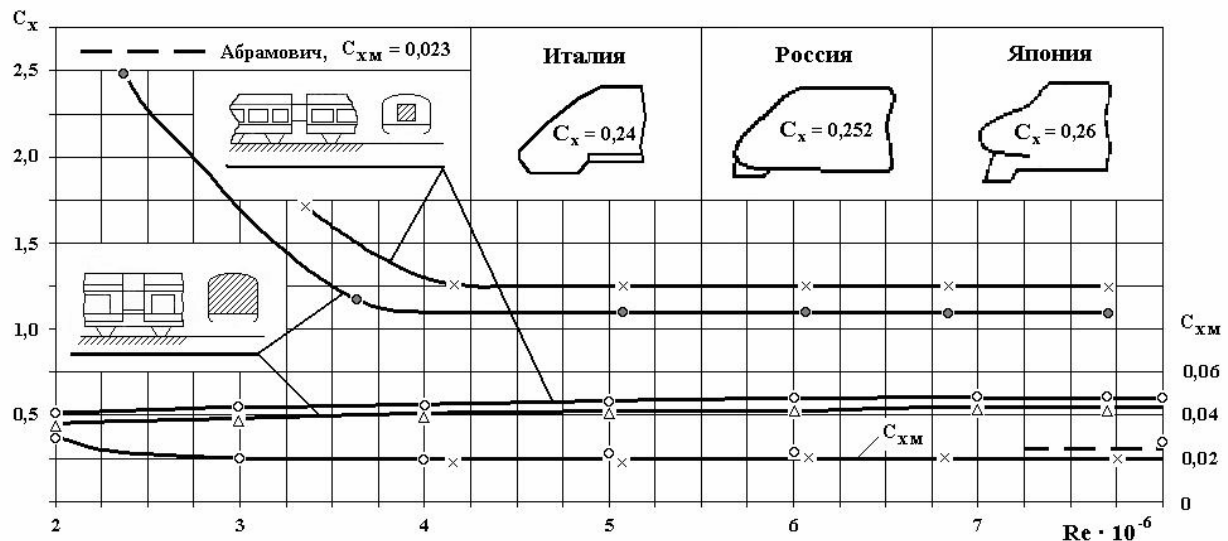


Рис. 4. Влияние межвагонного пространства на  $C_x = f(Re)$  для трех- ( $\Delta$ ,  $\circ$ ) и десяти- ( $\bullet$ ,  $\times$ ) вагонного скоростного поезда

Особенностью зависимости  $C_x = f(Re)$  является неизменный коэффициент полного аэродинамического сопротивления  $C_x$  и коэффициент сопротивления  $C_x^{MB}$  межвагонного пространства для скоростей движения поезда соответствующих числу Рейнольдса  $Re \geq 4,2 \cdot 10^6$ . Из рис. 4 следует, что полное закрытие межвагонных пространств даёт уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления на величину  $\Delta C_x = 0,06$  для трехвагонного и  $\Delta C_x = 0,15$  для десятивагонного поезда с хорошообтекаемой головной и хвостовой частями. Таким образом, полное перекрытие межвагонных промежутков практически ликвидирует срывные зоны и вихреобразование, что и приводит к снижению аэродинамического сопротивления вагона и поезда в целом. Поскольку полное перекрытие межвагонного промежутка представляет определенные технические сложности, возникает необходимость рассмотрения задачи с частичным перекрытием межвагонного пространства.

Ниже исследовано вязкое вихревое течение в области, моделирующей межвагонное пространство с различной степенью его перекрытия (рис. 5). Интегрирование системы уравнений движения и неразрывности выполнено методом конечных элементов с использованием k-ε модели турбулентности потока. Схема расчетной области включала межвагонное пространство, область протекающего потока над крышами вагонов и область течения между его днищем и поверхностью земли. В невозмущенном потоке течение предполагалось слоистым со скоростью  $V_\infty$ , поэтому на границе расчетной области поперечная компонента скорости задавалась равной нулю. На боковой поверхности вагонов и межвагонного промежутка задавалось условие прилипания. Профили скорости на боковой поверхности вагонов и под его днищем на входе расчетной области принимались по данным натуральных экспериментов Романенко Г.А.



Рис. 5. Схема частично перекрытого межвагонного пространства

Результаты расчета приведены для трех значений скорости движения подвижного состава,

наиболее типичных для железных дорог Украины.

На рис. 6...9 показаны изолинии, полученные для открытого межвагонного промежутка  $\bar{L} = 1.0$  на скорости  $V_\infty = 60, 100$  и  $140$  км/ч соответственно для линий тока, изобар, продольной и поперечной компонент скорости.

Анализ приведенных результатов показывает, что в межвагонном пространстве образуется один устойчивый вихрь с ядром, расположенным ближе к верхней части вагона (рис. 6). С увеличением скорости движения поезда  $V_\infty$  интенсивность вращения вихря увеличивается.

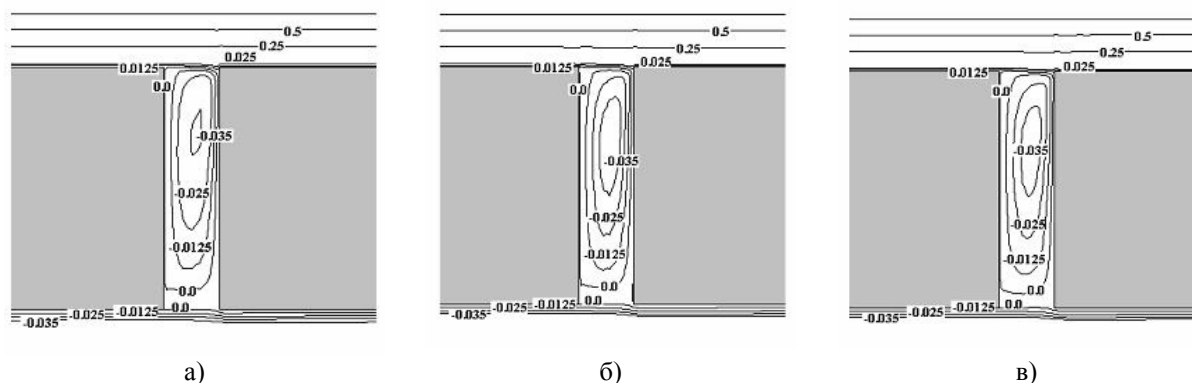


Рис. 6. Картина линий тока при  $\bar{L} = 1.0$

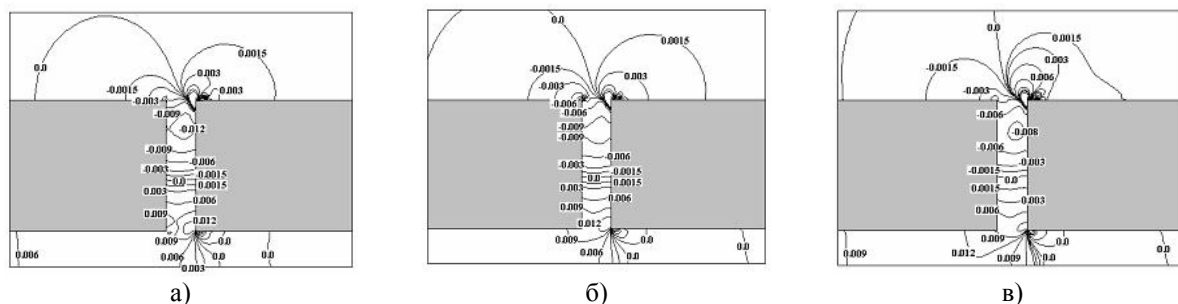


Рис. 7. Изобары при  $\bar{L} = 1.0$

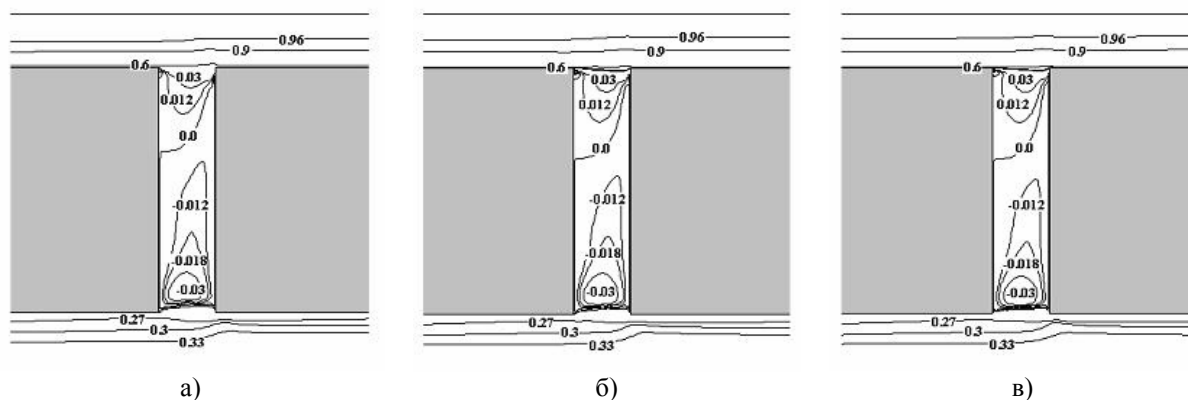


Рис. 8. Изолинии продольной компоненты скорости при  $\bar{L} = 1.0$

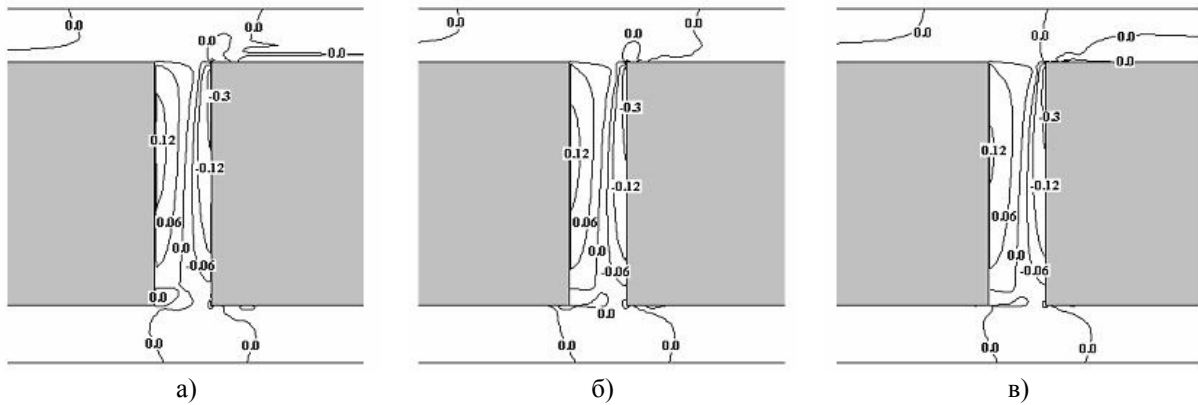


Рис. 9. Изолинии поперечной компоненты скорости при  $\bar{L} = 1.0$

Сгущение изобар вблизи верхнего и нижнего правых углов межвагонного пространства (рис. 7) указывает на область повышенного давления в этих зонах, которое увеличивается с ростом скорости. Изолинии продольной компоненты скорости (рис. 8) образуют два противоположно вращающихся вихря. О перетекании воздуха в вертикальном направлении можно судить по изолиниям поперечной компоненты скорости (рис. 9). Воздушный поток, движущийся параллельно крыше вагона, натекает на правый верхний угол межвагонного пространства и направляется вниз, вдоль правой стенки (отрицательные значения компоненты). Так как в межвагонном пространстве существует устойчивый циркуляционный вихрь (см. рис. 6), то часть воздуха будет двигаться снизу вверх вдоль левой стенки (положительные значения поперечной компоненты скорости).

На такую схему течения также указывают профили продольной и поперечной компонент скоростей в центральных сечениях межвагонного пространства (рис. 10).

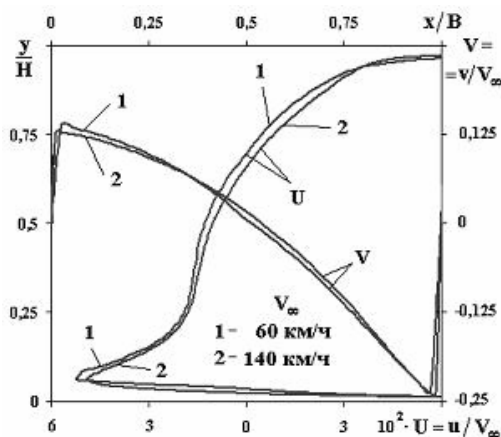


Рис. 10. Профили продольной и поперечной компонент скоростей в центральных сечениях межвагонного пространства

По профилю поперечной компоненты скорости (см. рис. 10) можно судить об уменьшении толщины пограничного слоя вблизи вертикальных стенок с ростом скорости  $V_\infty$  и о более интенсивном течении вдоль правой стенки (в направлении сверху вниз) по сравнению с течением на левой в обратном направлении.

Графики коэффициента давления  $\bar{P}$  и касательных напряжений  $\tau_w$  на торцовых стенках открытого межвагонного пространства приведены на рис. 11 и рис. 12 соответственно. Распределение давления на стенках межвагонного пространства имеет сложный характер. Максимальные значения  $\bar{P}$  реализуются вблизи угловых точек D и C, как это уже было указано выше. В окрестности угловой точки A разрежение потока характеризуется отрицательными величинами коэффициента давления. С увеличением скорости  $V_\infty$  градиент давлений по длине стенок уменьшается.

Кривые распределения касательных напряжений (рис. 12) вблизи угловой точки D имеют четко выраженный минимум, модуль которого увеличивается с ростом скорости  $V_\infty$ .

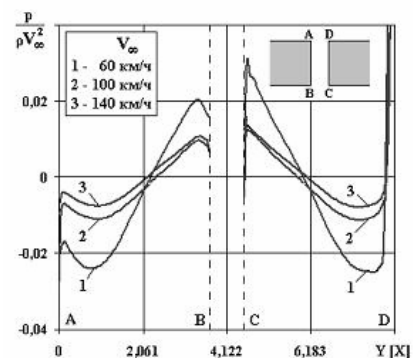


Рис. 11. Распределение давления на неподвижных стенках межвагонного пространства

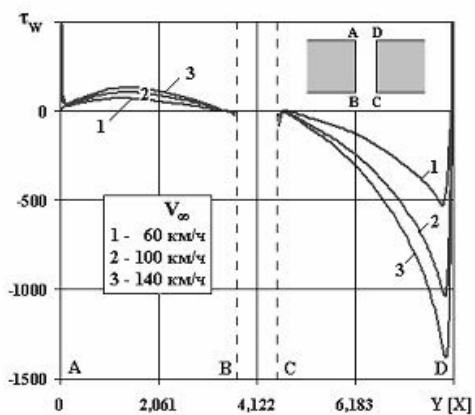


Рис. 12. Распределение касательных напряжений на неподвижных стенках межвагонного пространства

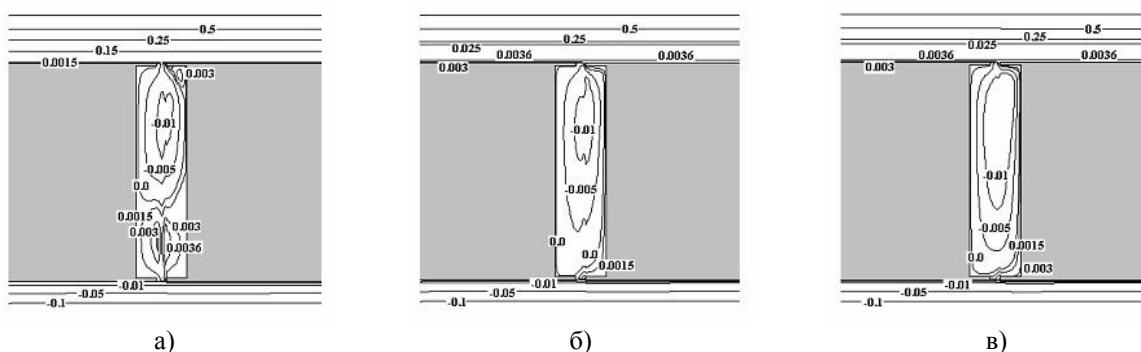


Рис. 13. Линии тока при  $\bar{L} = 0.2$

Анализ линий тока на рис. 6 и рис. 13 показывает, что при всех конфигурациях  $\bar{L}$  и  $V_\infty$  (исключая единственный случай на рис. 13, а, при  $\bar{L}=0,2$ ,  $V_\infty=60$  км/ч) во всем межвагонном пространстве доминирует один основной вихрь, вращающийся по часовой стрелке, как показывают отрицательные значения функции тока. Увеличение скорости  $V_\infty$  и длины  $\bar{L}$  приводят к интенсификации вихревого движения в межвагонном пространстве, что сопровождается увеличением значений функции тока в ядре вихря.

При  $\bar{L}=0,2$  и  $V_\infty=60$  км/ч вихревое течение в межвагонном пространстве образовано двумя противоположно вращающимися вихрями, располагающимися один над другим. Верхний вихрь является основным; вызван потоком с крыши вагона и обладает большей интенсивностью вращения. Нижний вихрь вызывается менее интенсивным потоком из-под днища вагона и характеризуется меньшими на порядок значениями функции тока с увеличением как скорости  $V_\infty$ , так и длины  $\bar{L}$ .

По аналогии с обтеканием открытого межвагонного промежутка (рис. 7) поток, огибая

С целью снижения силовых нагрузок, действующих на торцовые стенки межвагонного пространства, осуществлено частичное его перекрытие. Исследовано влияние этого перекрытия на аэродинамическое сопротивление.

Численные расчеты проведены при следующих значениях относительной длины  $\bar{L} = L/B=0,2; 0,5; 0,8; 1,0$ , где  $B$  – ширина межвагонного пространства.

На рис. 13...16 представлены результаты расчетов в виде изолиний функции тока и давления для межвагонного пространства  $\bar{L} = 0,2$  и скорости  $V_\infty = 60, 100, 140$  км/ч.

верхнее перекрытие, натекает на правую стенку межвагонного пространства, движется вдоль неё, взаимодействует со встречным течением из-под днища вагона или нижним перекрытием и обтекает левую стенку с меньшим давлением по сравнению с правой стенкой (рис. 14-16).

Сгущение изобар, характеризующее большой градиент давления, происходит, как показано на рис. 14...16, в окрестности правого верхнего и нижнего перекрытий межвагонного пространства. Большому перекрытию соответствуют меньшие градиенты давления, что должно сопровождаться снижением аэродинамического сопротивления.

По полям распределения давления и касательных напряжений рассчитан коэффициент аэродинамического сопротивления для каждого из рассмотренных случаев (рис. 17), а механическое сопротивление по соотношению из [6]

$$\Delta W_{\text{МЭХ}} = (c \cdot V_\infty + d) \Delta m \cdot g,$$

где  $\Delta m$  – изменение массы вагона при наличии межвагонного ограждения.

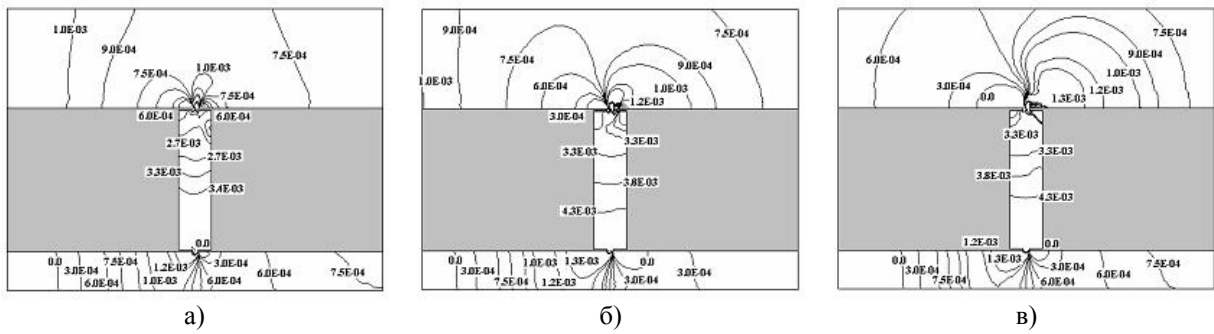


Рис. 14. Изобары при  $\bar{L} = 0.2$

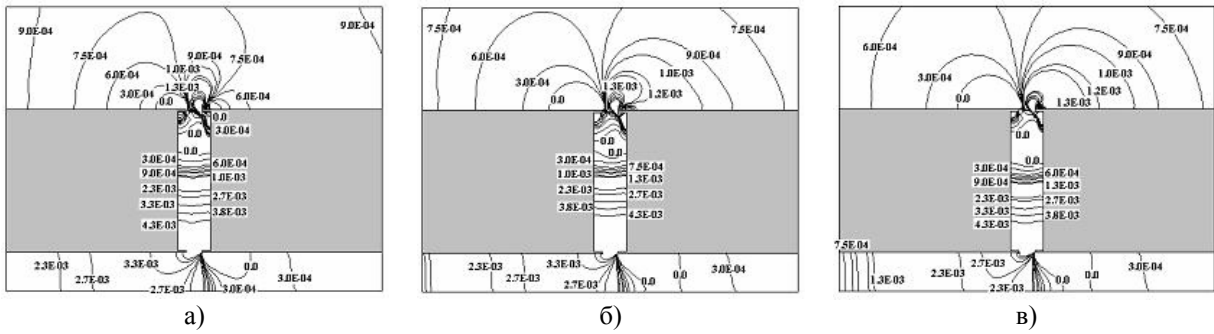


Рис. 15. Изобары при  $\bar{L} = 0.5$

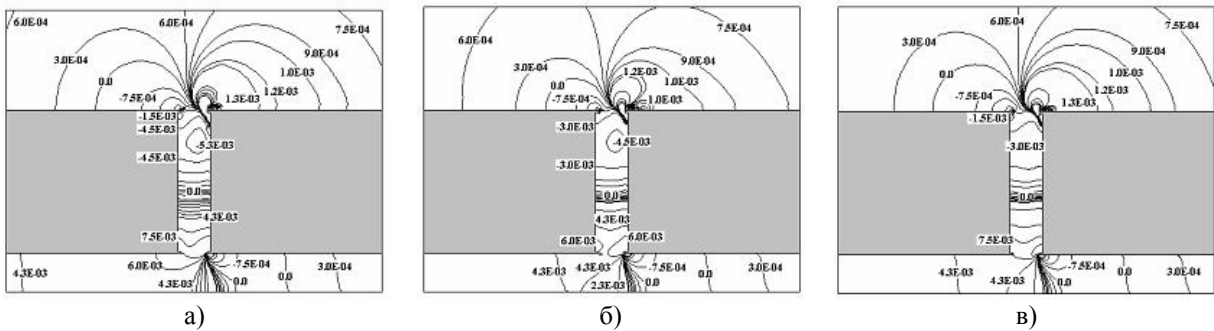


Рис. 16. Изобары при  $\bar{L} = 0.8$

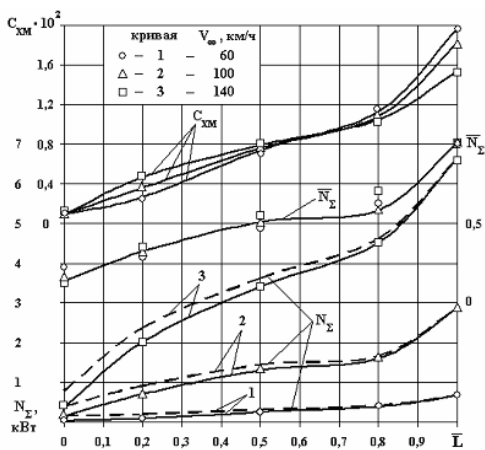


Рис. 17. Влияние длины  $\bar{L}$  межвагонного пространства на коэффициент сопротивления  $C_{xm}$

Коэффициенты  $c = 1,07$  и  $d = 0,0119$  характеризуют тип передачи нагрузки на оси цельнометаллического пассажирского вагона.

Для массы межвагонного перекрытия по мере изменения длины  $\bar{L}$  принята линейная зависимость и  $\Delta m \approx 400$  кг при  $\bar{L} = 0$ , если принять, что межвагонное перекрытие конструктивно выполнено по аналогии с внешней подкрепленной оболочкой скоростного пассажирского вагона поезда ЭР-200.

Потери мощности тягового привода на преодоление аэродинамического сопротивления одного межвагонного пространства (сплошные кривые 1...3) показаны в виде  $N_z(\bar{L})$  для трех скоростных режимов движения поезда (рис. 17). Здесь же нанесены пунктирные кривые 1...3, построенные с учетом потерь мощности и на механическое сопротивление при соответствующем межвагонном ограждении ( $\bar{L} < 1.0$ ).

Из кривых  $N_z(\bar{L})$  следует, что при скорости движения  $V_x = 60$  км/ч открытое межвагонное



пространство вызывает малые абсолютные потери мощности, а при достижении скорости  $V_{\infty}=140$  км/ч эти потери увеличиваются почти в 10 раз, хотя и остаются небольшими. При дальнейшем увеличении скорости движения сохраняется тенденция роста абсолютных потерь мощности тягового привода. Поэтому для больших скоростей движения поезда становится актуальным решение задачи перекрытия межвагонного пространства. При скорости  $V_{\infty}=140$  км/ч полностью перекрытое межвагонное пространство по сравнению с открытым уменьшает почти в 18 раз потери мощности, связанные с сопротивлением межвагонного промежутка.

Кривая  $\bar{N}_{\Sigma}(\bar{L})=N_{\Sigma}/N_{\Sigma \text{ MAX}}$  характеризует относительные потери мощности  $N_{\Sigma}$  по мере перекрытия межвагонного пространства по отношению к их максимальной величине  $N_{\Sigma \text{ MAX}}(\bar{L}=1)$  при фиксированной скорости движения поезда. Эта кривая соответствует результатам расчетов для трех рассмотренных скоростных режимов и из которой следует, что относительное влияние степени перекрытия межвагонного пространства на величину потерь мощности для этих режимов движения является близким, тогда как ранее отмечалось, что абсолютное значение  $N_{\Sigma}$  имеет тенденцию к росту с увеличением скорости движения.

На характер изменения мощности при обтекании межвагонного промежутка влияет величина его аэродинамического сопротивления.

Из кривых графика  $C_{\text{XM}}(\bar{L})$  следует, что с началом перекрытия межвагонного пространства вплоть до  $\bar{L} \cong 0.8$  его коэффициент аэродинамического сопротивления интенсивно снижается и при полном перекрытии ( $\bar{L} = 0$ ) уменьшается в 18...20 раз.

Характер изменения кривых на рис. 17 показывает, что с ростом относительной длины  $\bar{L}$  в пределах  $0.2 \leq \bar{L} \leq 0.8$  коэффициент сопро-

тивления  $C_{\text{XM}}$  растет незначительно. Это означает, что практически близкие значения коэффициента сопротивления  $C_{\text{XM}}$  реализуются при относительно малом размере перекрытия. Таким образом, если принять  $\bar{L} \approx 0.8$ , то длина перекрытия со стороны торца каждого вагона составит всего  $\approx 0.1$ , что качественно соответствует конструктивному решению для ограждения, принятому на вагоне поезда ETR 500 (рис. 2, ж). На окончательный же выбор длины перекрытия могут оказать влияние другие факторы вплоть до принятого на железной дороге минимального радиуса горизонтальной кривой колеи, на которой намечается эксплуатация скоростного подвижного состава.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Laszlo de Koranyi. Calculation of Energy is necessary for the high Speed // "Railway Gazette", № 13, 1966, p. 10-14.
2. Романенко Г.А. Исследования по аэродинамике скоростных поездов // Исследования по аэродинамике. – М.: МГУ. – 1969. – Вып. 4 – С. 74-86.
3. Bernard M. L'aerodynamique des Trains // "Extrait de la Revue Generale des Chemins de Fer", Fevrier, 1971, p. 28-32.
4. Романенко Г.А., Сюзюмова Е.И. Исследования аэродинамического сопротивления скоростных поездов // Некоторые вопросы экспериментальной аэродинамики. – М.: МГУ. – 1973. – Вып. 24. – С. 110-118.
5. Скоростные железные дороги Японии (Синкансен) / Под ред. В.Г.Альбрехта. – М.: Транспорт, 1984. – 198 с.
6. Романенко Г.А., Сюзюмова Е.И. Худяков Г.Е. Аэродинамика скоростных поездов. Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Каз. ССР. – Алма-Ата: Наука, 1981. – С. 56-57.