

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ,
ВОЗНИКАЮЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА,
И РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

А.А. Мирошниченко, Е.В. Соломин

В статье были исследованы воздушные потоки вдоль движущегося железнодорожного поезда. Скорости потоков, а также их интенсивность в зависимости от удаленности относительно боковой стенки подвижного состава были изучены методом имитирования движения в среде путем обдува поезда струей воздуха. После обработки полученных результатов произведено рассмотрение вариантов утилизации воздушных потоков, например, благодаря установке вдоль железной дороги ветроэнергетических установок. Произведен расчет, демонстрирующий численные значения количества вырабатываемой электрической энергии, получаемой ветрогенераторами вследствие естественного движения воздуха и от проходящего железнодорожного состава. Благодаря произведенному моделированию и расчету доказана возможность практического применения полученных результатов, а также определено количество электрической энергии, которую возможно использовать как источники аварийного питания для объектов железнодорожного транспорта или инфраструктуры, либо полностью обеспечить электрической энергией, например, сигнальную аппаратуру (светофоры, семафоры и т.д.).

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроэнергетические установки, распределение поля скоростей потока воздуха, железнодорожный транспорт, аэродинамика, ветровые нагрузки, ветроэнергетические установки, аэродинамические испытания, компьютерное моделирование.

На сегодняшний день проблемы использования возобновляемых источников энергии мировым сообществом являются очень важными и насущными. Запасы традиционных источников энергии имеют тенденцию к ис-

тощению, и человечество уже прилагает серьезные усилия по разработке альтернативных генерирующих устройств. Кроме этого, потребление электроэнергии в мире растет с каждым днем. Рост потребления возникает в основном за счет увеличения спроса на электроэнергию в развивающихся странах. Промышленные потребители электроэнергии (фабрики, заводы, сельское хозяйство, горнодобывающая отрасль и др.) потребляют около 37 % от всей произведенной энергии. Личный и коммерческий транспорт потребляет около 20 %; отопление, освещение, система канализации и электроприборы используют 16 %. Оставшиеся 27 % мирового потребления энергии являются потерями при ее производстве и транспортировке.

Особый интерес при рассмотрении потребления энергии занимает железнодорожный транспорт. На него ежегодно приходится примерно 50 % всех перевезенных жителей России при годовых расходах более 30 млн тонн условного топлива. Этот вид транспорта потребляет около 7 % энергии, производимой всеми электростанциями России. В основном она расходуется на обеспечение тяги поездов и питания нетяговых потребителей, к которым относятся станции, депо, мастерские и устройства регулирования движения поездов. Кроме того, к системе электроснабжения железной дороги могут быть подключены расположенные вблизи нее предприятия и небольшие населенные пункты [1].

В России, как и во многих странах мира, происходит увеличение пассажирских и грузовых перевозок с использованием железнодорожного транспорта. В связи с этим возникает гипотеза о том, что при движении на такой высокой скорости вокруг состава возникают значительные воздушные возмущения [2], которые могут быть утилизированы с помощью ветроэнергетических установок.

На сегодняшний день поле распределения скоростей вокруг движущегося подвижного состава является объектом исследования многих ученых в мире. Действительно, при повышении скорости поезда возникают проблемы, связанные с воздействием нестационарной воздушной волны на объекты инфраструктуры, расположенные в непосредственной близости к железнодорожным путям, – опоры сигнальной аппаратуры, напольные устройства СЦБ (сигнализации, централизации и блокировки) и прочие объекты, часть которых была построена задолго до внедрения высокоскоростного транспорта на железной дороге. Исследование данных проблем подробно изложено в [3]. Также стоит обратить внимание на вопрос обеспечения безопасности людей, находящихся на пассажирских платформах при прохождении высокоскоростного поезда и на встречные поезда при их скрещении.

Движущееся тело внедряется в воздушную среду, уплотняя передние слои воздуха и раздвигая воздушные массы в стороны [4]. Одновременно с этим остальные части тела подвергаются вязкому трению о воздух. Спо-

койное состояние воздушных масс наблюдается лишь на определенном расстоянии от боковой стенки движущегося объекта, при этом градиент снижения скорости зависит от целого ряда параметров среды (рис. 1).

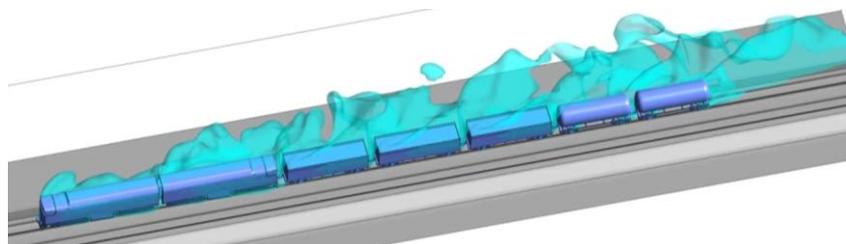


Рис. 1. Взаимодействие поезда и воздушной среды

Исследуемая модель состоит из 10 пассажирских вагонов и тягового локомотива. В качестве тягового локомотива был выбран электровоз ВЛ 65 [5]. В табл. 1 приведены технические характеристики электровоза ВЛ 65.

Таблица 1

Технические характеристики электровоза ВЛ 65

Род службы	грузопассажирский
Длина локомотива	22 500 мм
Ширина	3232 мм
Максимальная высота	4250 мм
Ширина колеи	1520 мм
Скорость длительного режима	70,2 км/ч
Конструкционная скорость	120 км/ч



Рис. 2. Внешний вид электровоза ВЛ65

В качестве прицепных вагонов были выбраны классические плацкартные вагоны серии 61-4194, повсеместно используемые на железных дорогах России (рис. 3). Их технические характеристики приведены в табл. 2.

Расчет проведем в программном комплексе SolidWorks с установленным пакетом Flow Simulation (рис. 4).

Таблица 2

Технические характеристики плацкартного вагона серии 61-4194

Масса тары вагона, т	56,9
Длина вагона по осям сцепления автосцепок, мм	24537±20
Ширина кузова наружная, мм	3105 (+3; -12)
Конструкционная скорость, км/ч	160
Габарит по ГОСТ 9238	I-ВМ



Рис. 3. Внешний вид плацкартного вагона серии 61-4194

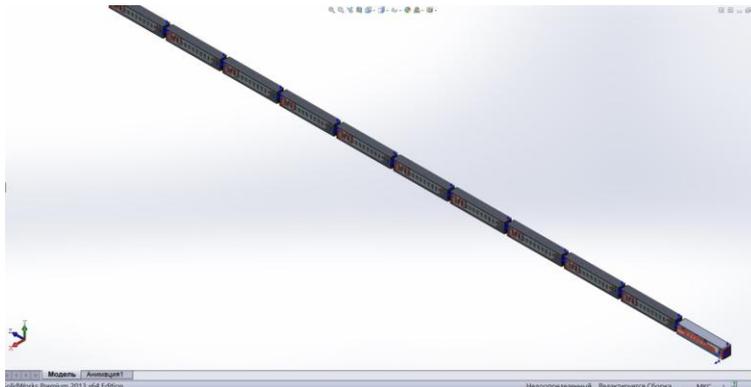


Рис. 4. Общий вид состава в программной среде SolidWorks

Наибольший интерес в нашем случае представляет область около боковой стенки состава, т.е. горизонтальная плоскость с осью X. Однако ограничить обдув сверху и снизу состава будет неверным решением, т.к. в действительности поток обтекает поезд равномерно со всех сторон. Таким образом, поезд, состоящий из 10 пассажирских вагонов и локомотива, оказался заключен в аэродинамическую трубу (в нашем случае короб), внутрь которого будет направлен воздушный поток на скорости 70 км/ч.

Основной целью является получение значения скоростей в горизонтальной плоскости поезда в зависимости от удаленности от боковой стенки. После обдува получены следующие результаты (рис. 5–8).

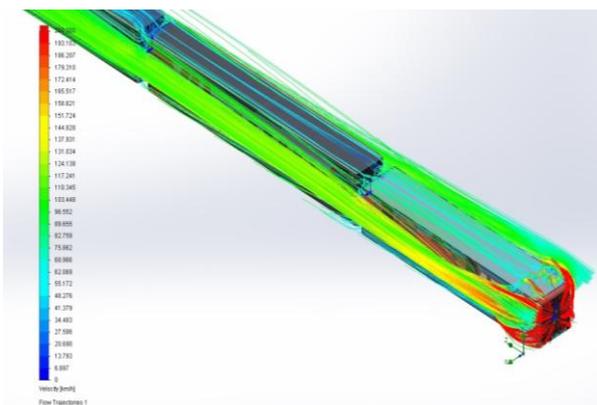


Рис. 5. Результаты обдува, общий вид

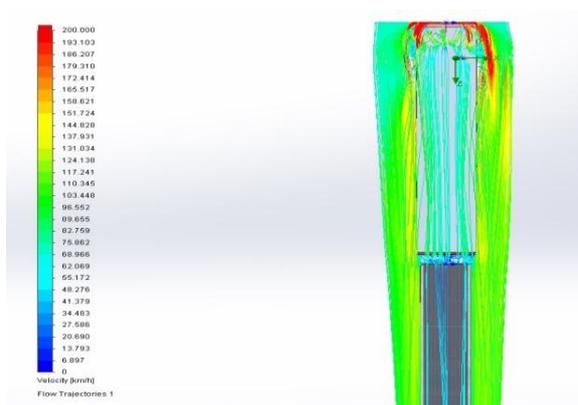


Рис. 6. Результаты обдува, вид сверху

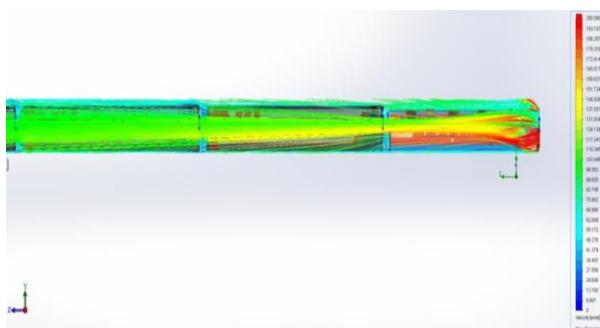


Рис. 7. Результаты обдува, вид сбоку

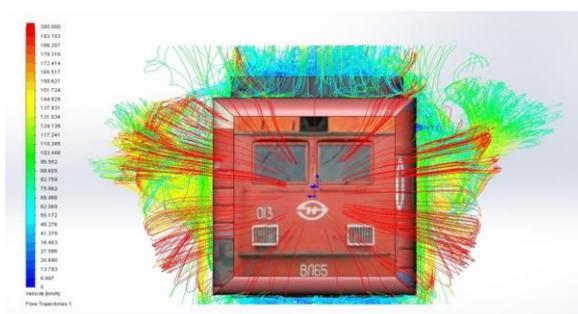


Рис. 8. Результаты обдува, вид спереди

Наглядно видно, что в горизонтальной плоскости при движении подвижного состава возникают значительные потоки воздуха, которые наблюдаются в виде градиента даже на расстоянии трех метров от боковой стенки. Движущийся поезд придает ускорение частицам воздуха до 200 км/ч, которое уменьшается по мере удаления. В целом, область взаимодействия подвижного состава и окружающего его воздуха разделим на три зоны.

Первая зона – лобовая часть поезда. Именно там движение локомотива вызывает значительное ускорение воздушных масс (красные области на рисунках), вследствие чего возникает головная волна сжатия. Поскольку воздух обладает свойством неразрывности, то следом за волной сжатия образуется волна разряжения.

Вторая зона – боковая, в которой ускорение воздушных потоков определяется вязкостным трением воздуха о стенки вагонов. Очевидно, что из-за прилипания воздушных частиц непосредственно к боковой стенке поезда их скорость приблизительно равна скорости движущегося состава [6]. Из этого следует, что воздух, обладая определенной вязкостью, тянет за собой воздушные массы.

Третья зона – хвостовая часть состава. Там из-за той же вязкости уничтожается энергия потоков воздуха. Непосредственно за последним вагоном возникает разряжение, ранее описанное в [7], т.е. неконтролируемый турбулентный поток (рис. 9–10).

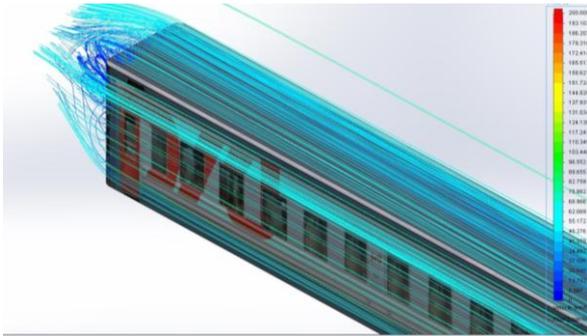


Рис. 9. Турбулентный поток, образующийся за последним вагоном

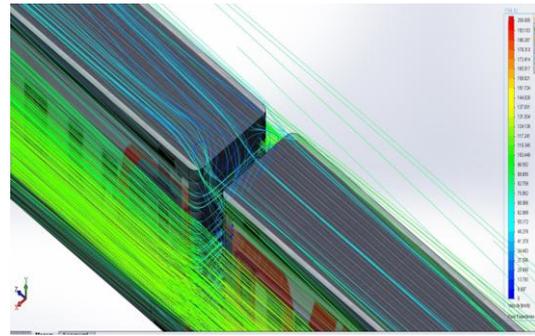


Рис. 10. Турбулентный поток в межвагонном промежутке

Анализируя вышесказанное и основываясь на результаты проведенного моделирования, можно сделать вывод о том, что вокруг движущегося поезда возникают воздушные потоки, которые несут в себе значительную энергию. Исходя из этого, возникает вопрос об использовании этой энергии. При проведении дальнейших исследований движения воздушных масс возможно преобразование энергии ветра в электрическую энергию путем установки вдоль железнодорожных путей ветроэнергетических установок (рис. 11).



Рис. 11. Вариант установки вдоль путей ветроэнергетических установок

Конкретный пример: предположительно на перегоне за сутки ежедневно проходит 15 поездов, состоящих из 15 вагонов и тягового локомотива. Общая длина состава составит:

$$L_{\text{состава}} = 15 \cdot L_{\text{вагонов}} + L_{\text{локомотива}}, \text{ м} \quad (1)$$

$$L_{\text{состава}} = 15 \cdot 23,6 + 22,5 = 376,5, \text{ м.}$$

Предусматривается размещение ветроэнергетической установки около ж/д путей. Поезд проходит вдоль ВЭУ на скорости 70 км/ч за время:

$$t = \frac{L_{\text{локомотива}}}{V}, \text{ с} \quad (2)$$

$$t = \frac{376,5 \cdot 3600}{70 \cdot 1000} = 19,36, \text{ с.}$$

Время прохождения состава вдоль пути принимается как время воздействия состава на ветроэнергоустановку. Если за сутки по перегону проходит, к примеру, 15 поездов, то за сутки время воздействия $t_{\text{возд}}$ составит 290,4 секунд.

Мощность воздушного потока, создаваемая поездом, составит:

$$P = dE/dt = \frac{C_p \cdot m \cdot v^2}{2} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3}{2}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра. Для выбранной ветроустановки Windside WS-2B [8] $C_p = 0,19$;

V – скорость воздушного потока, м/с;

S – ометаемая площадь, м^2 . Для выбранной ветроустановки $S = 2 \text{ м}^2$.

По результатам исследования видно, что скорость потока воздуха от проходящего поезда составляет около 65 км/ч, или 18,05 м/с.

$$P = \frac{0,19 \cdot 1,226 \cdot 2 \cdot 16,67^3}{2} = 1371,12 \text{ Вт.}$$

За время прохождения поезда, т.е. за 19,36 секунд имеем реально полученную электроэнергию:

$$E = P \cdot t, \text{ Вт} \cdot \text{с} \quad (4)$$

$$E = 1371,12 \cdot 19,36 = 26544,96, \text{ Вт} \cdot \text{с} = 7,37, \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Тогда от 15 поездов в сутки получаем 110,6 Вт·ч энергии, а в год:

$$E_{\text{год}} = 110,6 \cdot 365 = 40,37 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При размещении, например, 15 установок с каждой стороны получаем выработку энергии, равную:

$$E_{\text{потока}} = 30 \cdot 40,37 = 1211,1, \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Далее производится расчет естественной генерации за счет ВЭУ в предположении, что в отсутствие поезда ВЭУ работают в обычном режиме за счет естественных ветров. Причем создание ветропарка из нескольких ВЭУ, стоящих вдоль путей, предусматривается в регионе с благоприятными погодными условиями, к примеру в Краснодарском крае, в районе города Армавир. Там, согласно [9], средняя скорость ветра за год составляет 6,3 м/с. Тогда по формуле (5):

$$P = \frac{0,19 \cdot 1,226 \cdot 2 \cdot 6,3^3}{2} = 58,25, \text{ Вт.}$$

Выработанная энергия за год составит:

$$E_{\text{год}} = 58,25 \cdot 24 \cdot 365 = 510,27, \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Тогда при размещении, например, 15 установок с каждой стороны получается выработка энергии, равная:

$$E_{ест} = 510,27 \cdot 30 = 15308,1, \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарная мощность, вырабатываемая ветропарком, составит:

$$E_{сум} = E_{ест.} + E_{потоков}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (5)$$

$$E_{сум} = 15308,1 + 1211,1 = 16519,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 16,52 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Полученную электроэнергию можно использовать по-разному, например, для электроснабжения сигнальной аппаратуры (светофоры, семафоры и т.д.). Железнодорожный светофор вместе с сигнальной аппаратурой имеет мощность 30 Вт и при непрерывной работе (т.е. когда светофор постоянно показывает определенный сигнал) за год потребляет 282,8 кВт·ч электрической энергии. Таким образом, используя выработанную ВЭУ энергию ветра, можно обеспечить электроэнергией 58 светофоров на участке пути в течение года либо использовать ее для зарядки аккумуляторов, тем самым обеспечивая их бесперебойную работу в аварийных ситуациях.

Заключение. В статье была исследована возможность получения электрической энергии от ветроэнергетических установок, расположенных вдоль железнодорожных путей и использующих энергию воздушных потоков проходящего состава для выработки электрической энергии, наряду с естественной генерацией в отсутствие поезда. Достоверно показано и рассчитано, что такая система работоспособна и применима на практике. В качестве ВЭУ была принята система с ротором Савониуса, который имеет самый низкий коэффициент использования энергии ветра, однако в то же время обладает высоким крутящим моментом. В статье показано, что на выработку энергии влияет диаметр ветроколеса, конфигурация ветроэнергоустановок, которая может составлять несколько уровней, скорость движущегося состава, его длина, количество проходящих поездов на участке и их аэродинамические характеристики.

Библиографический список

1. Общий курс железных дорог: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю.И. Ефименко, М.М. Уздин, В.И. Ковалев и др.; Под ред. Ю.И. Ефименко. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.
2. Сетуха, А.В. Проблемы аэродинамического воздействия скоростных поездов и объектов инфраструктуры / А.В. Сетуха // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2016. – № 1–2. – С. 39–46.
3. Горелик, А.В. Аэродинамическое воздействие скорости движения поезда на напольные устройства СЦБ / А.В. Горелик, В.В. Шуваев, Д.Е. Минаков // Наука и техника транспорта. – М.: МГУПС (МИИТ), 2013. – С. 67–74.
4. Астахов, П.Н. Соппротивление движению железнодорожного подвижного состава / П.Н. Астахов. – М.: Транспорт, 1966. – 178 с.

5. Абрамов, Е.Р. Электровозы ВЛ65, ЭП1 и их разновидности / Е.Р. Абрамов // Электроподвижной состав отечественных железных дорог. – М., 2015. – С. 234–241.

6. Исанов, Р.Ш. Двухслойный поток при обтекании высокоскоростного транспорта / Р. Ш. Исанов // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4. – С. 127–134.

7. Кулекина, А.В. Исследование аэродинамических характеристик подвижного состава электрического транспорта / А.В. Кулекина, В.В. Бирюков // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – 2014. – № 3. – С. 112–116.

8. Каталог ветроустановок компании Windside [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.windside.com/filebank/134-WS2B-dte08.pdf>.

9. Среднегодовая скорость ветра по регионам России [Электронный ресурс]. – URL: <http://namteplo.org.ua/articles/50.html>.

[К содержанию](#)