



## Методика определения интегрального распределения сил, действующих на путь



*Краснов Олег Геннадьевич – Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия\*.*

**Олег КРАСНОВ**

Необходимым условием внедрения тяжеловесного движения на железных дорогах мира является комплексная оценка его эффективности, включающая исследование влияния повышенных осевых нагрузок на деградацию элементов верхнего строения пути, деформационные параметры балластного слоя и нижнего строения пути и мероприятий по соответствующему усилению железнодорожной инфраструктуры. Необходимо достаточно точно учитывать силовые факторы, воздействующие на путь со стороны разных типов подвижного состава с различной осевой нагрузкой. Распределение силовых факторов для конкретного участка железнодорожного пути является многофакторным процессом, количественные параметры которого зависят от структуры поездопотока, типа подвижного состава и его доли в суточном пакете поездов, проходящем по данному участку, установленной скорости движения, профиля пути (прямая, кривая), технического состояния подвижного состава и элементов верхнего строения пути.

Целью работы явилась разработка методики определения интегрального закона распределения

вертикальных и боковых сил, действующих на путь от колёс разного типа подвижного состава в зависимости от его доли в суточном пакете поездопотока. Использовались методы математической статистики.

В процессе экспериментальных исследований воздействий разного типа подвижного состава определены статистические распределения вертикальных и боковых сил. Гистограммы вертикальных и боковых сил аппроксимированы теоретическими законами. Для подтверждения справедливости выбранных функций аппроксимации использовался критерий согласования Колмогорова–Смирнова. Для смешанного движения на железных дорогах разработана методика, позволяющая учитывать вклад доли каждого типа подвижного состава в силовое воздействие на путь при расчёте суммарного воздействия. Методика базируется на реальных, экспериментально установленных распределениях с учётом сезонности (зима, лето) вертикальных и боковых сил, скорости движения по рассматриваемому участку пути и может использоваться на участках, где внедряется тяжеловесное движение.

*Ключевые слова:* железная дорога, тяжеловесное движение, подвижной состав, повышенные осевые нагрузки, вертикальные и боковые силы, закон распределения, воздействие, путь.

\*Информация об авторе:

**Краснов Олег Геннадьевич** – кандидат технических наук, заведующий отделом пути и специального подвижного состава акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, [vnikti@pti-kolomna.ru](mailto:vnikti@pti-kolomna.ru).

Статья поступила в редакцию 25.04.2019, актуализирована 29.07.2019, принята к публикации 12.08.2019.

For the English text of the article please see p. 14.

Работа выполнена по проекту РФФИ 17-20-01-088/17.

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение тяжеловесного движения уже многие годы находится в центре внимания железных дорог мира в качестве одного из инструментов повышения эффективности грузовых железнодорожных перевозок. Действует неправительственная международная ассоциация тяжеловесного движения<sup>1</sup>, одной из задач которой является проведение научных исследований, призванных способствовать решению технологических проблем, связанных с развитием подвижного состава и инфраструктуры.

Во многих странах проводятся исследования, связанные с различными аспектами внедрения тяжеловесного движения. В частности, в работе [1] выполнены исследования динамического отклика железнодорожного пути от продольных сил, возникающих в тяжеловесных поездах в режимах торможения, и влияния вертикальных сил на продольные нагрузки в рельсах.

В [2] исследовано вертикальное смещение шпал, влияние давлений «вывешенных» шпал на балласт в зависимости от их положения при движении тяжеловесных поездов. Величины давлений на балласт и ускорений шпал определены в зависимости от их вертикального положения для случаев укладки георешётки и без неё. В работе [3] на 3D-модели тяжеловесного поезда исследовалось динамическое взаимодействие подвижного состава и пути с учётом продольных сил в поезде. Разработан метод повышения эффективности вычислений для сложных систем «тяжеловесный поезд–путь», определены основные принципы повышения точности расчётов. В работе [4] разработаны технические требования для элементов верхнего строения пути для условий эксплуатации тяжеловесного движения в пустыне Саудовской Аравии. Учитывались максимальные температуры, широкий диапазон перепада температур, ультрафиолетовое излучение, существенное перемещение песков от воздействия ветра.

В исследованиях [5] приведена методика расчёта срока службы элементов верхнего строения пути рассмотренной кон-

струкции для тяжеловесного движения на основании учёта деградации и суммарных деформаций пути на углевозной железной дороге в ЮАР. Прогнозируемый ресурс был рассчитан при эксплуатации подвижного состава с нагрузкой 26 т/ось на период 40 лет с суммарным пропущенным тоннажем 4000 млн тонн брутто и коэффициентом безопасности от 2,4 до 6,0.

В исследовании, представленном в [6], разработан метод диагностики воздействия железнодорожного подвижного состава на путь на основе измерения вертикального и горизонтально-поперечного ускорения рельсов. Представлен сравнительный анализ статистических параметров напряжений в рельсах и ускорений при прохождении маневровых локомотивов и полувагонов, который показал удовлетворительные результаты по определению давлений от колёс на рельсы.

В работе [7] представлены исследования проблемы моделирования случайного распределения неровностей на поверхности катания головки рельса. Описывается двухслойная модель, позволяющая рассматривать механические свойства конструктивных элементов пути и анализировать взаимодействие между рельсами и шпалами. Динамический отклик пути от прохождения поезда представлен для линейной и детерминистической модели.

Таким образом за рубежом при внедрении тяжеловесного движения проводятся обширные исследования по воздействию подвижного состава на путь.

В России для освоения прогнозных грузопотоков и снижения транспортных издержек Генеральной схемой развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 и 2025 годов [8] предусматривается развитие на грузонапряжённых направлениях тяжеловесного движения. Одновременно в соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [9] поставлена задача доведения технического и технологического уровня инфраструктуры, сферы её содержания и ремонта до лучших мировых стандартов. Организация тяжеловесного движения путём использования вагонов с повышенной осевой нагрузкой формирует технологическую эффективность, которая выражается в вы-

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]: <https://ihha.net/>.





свобождении пропускной способности направлений сети и, как следствие, даёт возможность осуществления дополнительных перевозок массовых грузов.

Однако процесс внедрения подвижного состава с увеличением осевой нагрузки требует проведения дополнительных исследований для оценки влияния повышенных осевых нагрузок на деградацию элементов верхнего строения пути, деформационные параметры балластного слоя и нижнего строения пути. При формировании комплексной оценки эффективности тяжеловесного движения необходимо учитывать требуемые мероприятия по усилению железнодорожной инфраструктуры, что можно сделать при достаточно точном учёте силовых факторов, воздействующих на путь со стороны разных типов подвижного состава и их осевых нагрузок.

Распределение силовых факторов для конкретного участка железнодорожного пути является многофакторным процессом, количественные параметры которого зависят от структуры поездопотока, типа подвижного состава и его доли в суточном пакете поездов, проходящем по данному участку, установленной скорости движения, профиля пути (прямая, кривая), технического состояния подвижного состава и элементов верхнего строения пути.

Целью работы является разработка алгоритма определения интегрального закона распределения вертикальных и боковых сил от разного подвижного состава для произвольного участка.

Для теоретических разработок использовались *методы* математической статистики и теории вероятностей [10, 11]. В отличие от Методики [12], где воздействие определяется расчётным путём, для получения количественных параметров интегрального распределения вертикальных и боковых сил предложено использовать результаты экспериментальных исследований по воздействию разных типов подвижного состава на путь, в том числе от грузовых поездов, сформированных из вагонов с осевыми нагрузками 23,3, 25, 27 тс, пассажирских, высокоскоростных поездов, моторвагонного и других видов подвижного состава, проведённых учёными ВНИКТИ и ВНИИЖТ и представленных в трудах [13–18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ

Принимаются следующие допущения:

- суточный пакет поездов, а также уровень их технического состояния принимаются одинаковыми в течение длительного срока;
- климатические условия распределяются на две составляющие – зима и лето. Соответственно, они определяют разницу силового воздействия из-за изменения жёсткости пути.

С учётом принятых допущений интегральное распределение вертикальных сил может быть определено в следующей последовательности.

На основании значительного количества экспериментальных исследований по воздействию грузовых, пассажирских, высокоскоростных поездов, моторвагонного подвижного состава на железнодорожный путь установлено, что по критерию согласования Колмогорова–Смирнова распределение от вертикальных сил, полученное от воздействия поездов, сформированных из однородных вагонов с близкими осевыми нагрузками, локомотивов, моторвагонного подвижного состава, достаточно хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения.

Плотность распределения вероятностей вертикальных сил определяется по нормальному закону:

$$f(F_i) = \frac{1}{\sigma_{F_i} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_i - \bar{m}_{F_i})^2}{2\sigma_{F_i}^2}},$$

где  $F_i$  – текущее значение вертикальной силы;  
 $\bar{m}_{F_i}$  – математическое ожидание ансамбля вертикальных сил;

$\sigma_{F_i}$  – среднеквадратическое отклонение ансамбля вертикальных сил.

Распределение вертикальных сил (при учёте вертикальных сил ударного характера) от грузовых поездов, сформированных из разнородных вагонов с разными осевыми нагрузками (порожние, малонагружённые и полнонагружённые), более точно описывается логарифмическим нормальным законом.

Плотность распределения вероятностей случайной величины, логарифм которой распределяется по нормальному закону, описывается соотношением:

$$f(F_i) = \frac{1}{\sigma_{F_i} F_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\ln(F_i - \bar{m}_{F_i})}{2\sigma_{F_i}^2} \right\},$$

где  $F_i$  – текущее значение вертикальной силы;  
 $\sigma_{F_i}$  – среднее квадратическое отклонение

вертикальных сил;

$\bar{m}_{F_i}$  – математическое ожидание вертикальных сил.

При наличии в составе поездов гружёных и порожних вагонов распределение представляет суперпозицию законов распределения вероятностей вертикальных или боковых сил, определённых по экспериментальным статистическим данным со своими математическими ожиданиями и среднее квадратическими отклонениями.

Выражение для интегральной частоты вертикальной силы  $F_i$  от разных типов подвижного состава  $k_1, k_2, \dots, k_j$ , участвующих в формировании закона распределения частот для сил  $F_i$ , можно записать в виде:

$$F_1 \rightarrow P_1^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_1}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_1}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_1}^{k_j};$$

$$F_2 \rightarrow P_2^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_2}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_2}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_2}^{k_j};$$

$$F_i \rightarrow P_i^\Sigma = \gamma_{k_1} P_{F_i}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_i}^{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} P_{F_i}^{k_j},$$

где  $P_1^\Sigma, P_2^\Sigma, \dots, P_i^\Sigma$  – интегральные частоты вертикальных сил  $F_1, F_2, \dots, F_i$  от суточного пакета поездов;

$P_{F_i}^{k_1}, P_{F_i}^{k_2}, \dots, P_{F_i}^{k_j}$  – частоты вертикальных

сил  $F_i$  от конкретного типа подвижного состава  $k_1, k_2, \dots, k_j$  (статистические характеристики частот для вертикальных сил должны быть экспериментально установлены отдельно для каждого типа подвижного состава);

$k_j$  – тип подвижного состава, курсирующий на данном участке ( $k_1$  – локомотивы);

$k_2$  – грузовые поезда из полногружёных вагонов с нагрузкой до 23,5 тс/ось на тележках 18–100;

$k_3$  – грузовые поезда из малогружёных вагонов на тележках 18–100;

$k_4$  – грузовые поезда из инновационных вагонов с осевой нагрузкой 25 тс/ось;

$k_5$  – грузовые поезда инновационных вагонов с нагрузкой 27 тс/ось;

$k_6$  – пассажирские поезда;

$k_7$  – скоростные пассажирские поезда («Невский экспресс» и др.);

$k_8$  – высокоскоростные поезда («Сапсан»);

$k_9$  – моторвагонный подвижной состав;

$\gamma_{k_1}, \gamma_{k_2}, \dots, \gamma_{k_j}$  – доля  $k_j$  подвижного состава, курсирующего в суточном пакете поездов,  
 $\gamma_{k_1} + \gamma_{k_2} + \dots + \gamma_{k_j} = 1$ ;

$F_1, F_2, \dots, F_i$  – вертикальные силы в законе статистического распределения вертикальных сил с шагом  $\Delta F_i$ .

Для определения интегрального закона распределения необходимо учитывать фактически установленные скорости движения и климатические условия эксплуатации.

Для случая, когда установленные скорости подвижного состава занимают промежуточное положение между скоростями  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$ , для которых определены статистические параметры законов распределения, требуется выполнить дополнительный расчёт  $\bar{m}_{F_\phi}$  и  $\bar{\sigma}_{F_\phi}$  для фактически установленной скорости  $V_\phi$ .

Если допустить, что значения математического ожидания и среднее квадратическое отклонения линейно изменяются с повышением скорости, то для фактически установленной скорости движения  $V_\phi$  величина математического ожидания определится как:

$$\bar{m}_{F_\phi} = m_{F_{\min}} + \Delta \bar{m}_F \cdot \frac{V_\phi - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

где  $\bar{m}_{F_\phi}$  – математическое ожидание вертикальных сил для фактически установленной скорости  $V_\phi$  на рассматриваемом участке;

$\Delta \bar{m}_F = \bar{m}_{F_{\max}} - \bar{m}_{F_{\min}}$  – изменение значения

математического ожидания вертикальных сил при повышении скорости с  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ .

Величина среднее квадратического отклонения определяется аналогично:

$$\bar{\sigma}_{F_\phi} = \bar{\sigma}_{F_{\min}} + \Delta \bar{\sigma}_F \cdot \frac{V_\phi - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

где  $\bar{\sigma}_{F_\phi}$  – среднее квадратическое отклонение вертикальных сил для фактически установленной скорости  $V_\phi$  на рассматриваемом участке;

$\Delta \bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_{F_{\max}} - \bar{\sigma}_{F_{\min}}$  – изменение значения

среднее квадратического отклонения вертикальных сил при повышении скорости с  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ .

Для уточнённых значений  $\bar{m}_{F_\phi}, \bar{\sigma}_{F_\phi}$ , характерных для установленной скорости движения поездов, строятся законы распределения вертикальных сил для каждого типа подвижного состава, участвующего в суточном пакете поездов, и определяется интегральный закон распределения вертикальных сил для фактической скорости  $V_\phi$ .





Для учёта климатических условий с учётом продолжительности летнего и зимнего периодов, принимая период эксплуатации участка железнодорожного пути для летних условий за  $l$ , а для эксплуатации в зимних условиях за  $z$ , определяются интегральные распределения для летнего и зимнего периодов эксплуатации участка:

$$P_{i,l}^v \rightarrow f(F_i);$$

$$P_{i,zv}^v \rightarrow f(F_i).$$

Тогда для конкретного значения вертикальной силы  $F_i$  интегральная частота определяется как  $F_i \rightarrow P_{i,l+z}^{\Sigma} = \alpha P_{i,l}^{\Sigma} + \beta P_{i,z}^{\Sigma}$ , где  $P_{i,l+z}^{\Sigma}$  — интегральная частота для всех типов подвижного состава, проходящего по рассматриваемому участку в течение года, с учётом установленной скорости движения и климатических условий «зима—лето».

#### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БОКОВЫХ СИЛ

Для определения интегрального закона распределения боковых сил будем использовать методические подходы, которые были применены для определения интегрального закона распределения для вертикальных сил.

Характер нагружения рельсов железнодорожного пути в кривых участках пути имеет особенности, которые определяются радиусами кривых, скоростями движения и величинами возвышений наружного рельса над внутренним, поэтому при определении интегрального закона распределения необходимо учитывать указанные особенности.

Интегральная частота от разных типов подвижного состава  $k_j$ , например, для боковой силы  $H_{b0}$  с учётом количества  $j$  типов подвижного состава, которые оказывают влияние на формирование интегральной частоты боковой силы, определяется как:

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^v = \sum_{j=1}^{k_j} \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b0}}^{k_j}$$

или в развёрнутом виде:

$$H_{b1} \rightarrow P_{H_{b1}}^{\Sigma} = \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b1}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b1}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b1}}^{k_j};$$

$$H_{b2} \rightarrow P_{H_{b2}}^{\Sigma} = \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b2}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b2}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b2}}^{k_j};$$

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^{\Sigma} = \gamma_{k_1} \cdot P_{H_{b0}}^{k_1} + \gamma_{k_2} \cdot P_{H_{b0}}^{k_2} \dots + \gamma_{k_j} \cdot P_{H_{b0}}^{k_j};$$

где  $\gamma_j^{k_j}$  — доля типов подвижного состава  $k_j$ , участвующих в суточном пакете поездов;

$k_j$  — тип подвижного состава;

$H_{b1}, H_{b2}, \dots, H_{b0}$  — значения боковых сил;

$P_{H_{b1}}^{k_1} \dots P_{H_{b0}}^{k_j}$  — частоты боковых сил от  $k_j$  подвижного состава;

$P_{H_{b0}}^{\Sigma}$  — интегральная частота для боковой

силы  $H_{b0}$ , сформированная от разных типов подвижного состава  $k_j$ , участвующих в формировании боковой силы  $H_{b0}$ , с учётом их количества;

$P_j^{H_{b0}}$  — частота воздействия на путь; опре-

деляется из плотностей распределения боковых сил по теоретическим законам распределения с учётом экспериментально установленных статистических параметров, доли каждого типа подвижного состава  $k_j$ , определяющего формирование боковой силы  $H_{b0}$ .

При попадании исходных данных в промежуточное положение между экспериментально установленными значениями параметров  $\bar{m}_{H_b}$  и  $\bar{\sigma}_{H_b}$  для скоростей  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$  частоты интегрального распределения боковой силы  $H_{b0}$  определяются методами линейной интерполяции (аналогично тому, как это делается для вертикальных сил при определении интегрального закона распределения вертикальных сил). Здесь  $\bar{m}_{H_b}$  и  $\bar{\sigma}_{H_b}$  — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение боковых сил, определённых экспериментально для кривых конкретного радиуса, установленной скорости, для наружного и внутреннего рельсов, возвышения наружного рельса над внутренним, для летних и зимних условий эксплуатации.

При этом особенно важно увязать плотность распределения боковых сил по наружному и внутреннему рельсам со скоростью движения и возвышением. В развёрнутом виде выражение для определения интегральных частот для соответствующих им боковых сил может быть записано в виде:

$$H_{b1} \rightarrow P_{H_{b1}}^y;$$

$$H_{b2} \rightarrow P_{H_{b2}}^y;$$

$$H_{b0} \rightarrow P_{H_{b0}}^y.$$

Далее строятся интегральные плотности распределения для боковых сил от суточного пакета поездов, проходящих по данному участку.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И БОКОВЫХ СИЛ

На основании установленных экспериментальных распределений вертикальных и боковых сил от типов подвижного состава, их статистических параметров разработана методика определения интегрального закона их распределения в зависимости от структуры поездопотока, установленной скорости движения, профиля пути, климатических условий.

В качестве примера рассчитаем интегральный закон распределения вертикальных сил на прямом участке перегона Голутвин—Подлипки Московской железной дороги, 2-й главный путь. Известно, что на участке установлена скорость движения  $V_{\text{уст}} = 80$  км/ч.

По данным технического отдела Голутвинской дистанции пути: путь — 1-го класса, группа — особогрузонапряжённая, код группы — О, грузонапряжённость по перегону 106,8 млн т брутто, количество пассажирских поездов — 46, грузовых — 78, моторвагонный подвижной состав 11.

Рассчитаем долю по типам подвижного состава  $\gamma^{k_i}$  пропорционально количеству колёсных пар.

Количество колёсных пар определялось исходя из следующих соображений — вес грузовых поездов 3600...4000 тс при весе гружёных грузовых вагонов 94 тс.

Грузовой поезд весом 4000 тс в среднем состоит из 42 вагонов, тогда для четырёхосных вагонов количество колёсных пар в одном поезде составит 170 шт., а для 78 грузовых поездов — 13260 шт.

Суммарное количество локомотивов определялось суммированием от грузовых и пассажирских поездов  $\Sigma_{\text{л}} = 78 + 46 = 124$ . Для расчётов рассматриваем двухсекционные электровозы с двумя двухосными тележками в каждой секции и количеством колёсных пар в локомотиве, равном 8, тогда суммарное количество определится как  $8 \cdot 124 = 992$  колёсных пар.

Количество вагонов в пассажирских поездах принимаем равным 16 единицам, тогда суммарное количество колёсных пар пассажирских поездов:  $46 \cdot 16 \cdot 4 = 2944$  к.п.

Количество колёс моторвагонного подвижного состава:  $4 \cdot 11 \cdot 12 = 528$  к.п.

Суммарное количество колёсных пар, проходящих по рассматриваемому участку за сутки:

$$\Sigma k_j = 13260 + 992 + 2944 + 528 = 17724.$$

При этом набор элементов множества  $k_j$  следующий:

$$k_1 = 992, k_2 = 13260, k_3 = 0, k_4 = 0, k_5 = 0, k_6 = 2944, k_7 = 0, k_8 = 0, k_9 = 528.$$

Доля каждого типа подвижного состава в общем поездопотоке составляет:

- доля локомотивов:

$$\gamma_{11}^{k_1} = \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9} = \frac{992}{992 + 13269 + 2944 + 528} = \frac{992}{17724} = 0,056;$$

- доля грузовых вагонов:

$$\gamma_{12}^{k_2} = \frac{13260}{17724} = 0,747;$$

- доля пассажирских вагонов:

$$\gamma_{16}^{k_6} = \frac{2944}{17724} = 0,167;$$

- доля моторвагонного подвижного состава:

$$\gamma_{19}^{k_9} = \frac{528}{17724} = 0,03.$$

Для построения функции распределения и плотности вероятности вертикальных сил на данном участке пути определяем функции плотности распределения для каждого типа подвижного состава для летних и зимних условий эксплуатации:

$$P_i^{\Sigma} = \gamma^{k_1} \cdot P_{F_i}^{k_1} + \gamma^{k_2} \cdot P_{F_i}^{k_2} + \gamma^{k_6} \cdot P_{F_i}^{k_6} + \gamma^{k_9} \cdot P_{F_i}^{k_9}.$$

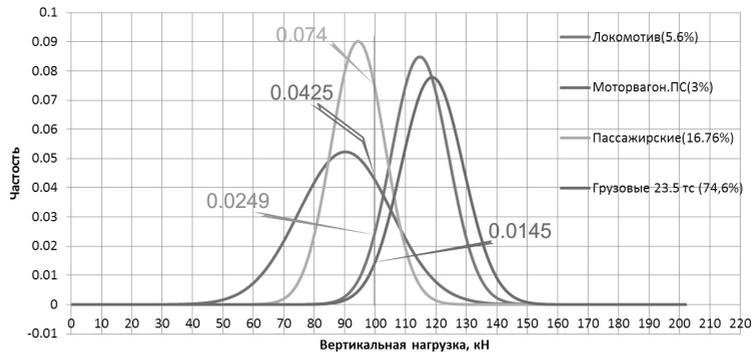
Для построения функции распределения вертикальных сил на данном участке определим функции плотности распределения с учётом доли каждого типа подвижного состава для летних и зимних климатических условий.

Для построения интегральной функции необходимо для каждой точки по оси абсцисс взять сечение и просуммировать значения изображённых на рис. 1 функций с учётом коэффициентов  $k$ , отображающих долю подвижного состава в общем поездопотоке на этом участке.

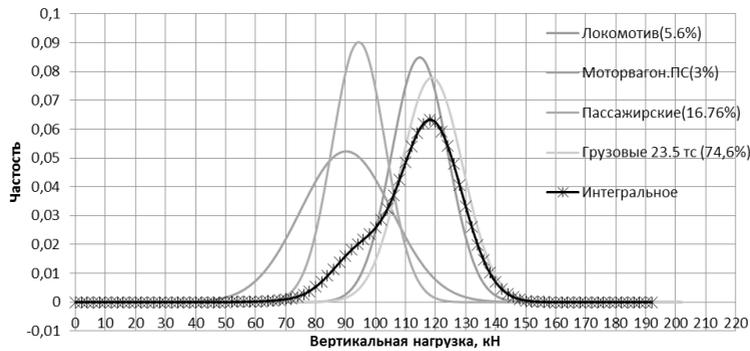
Пример суммирования для вертикальной силы  $F_i = 100$  кН показан на рис. 1.

Через точку  $F_i = 100$  кН проведём вертикальную линию, и в точках пересечения с графиками распределений вертикальных сил для разного подвижного состава определим частоты появления силы  $F_i = 100$  кН с учётом доли воздействия на путь разного подвижного состава. Получив исходные данные по каждому





**Рис. 1. Исходные данные для расчёта интегральной частоты для вертикальной силы  $F_i = 100$  кН (летний период).**



**Рис. 2. Интегральный закон распределения вертикальных сил, действующих на рельсы от суточного пакета поездов с учётом летнего и зимнего периодов эксплуатации.**

типу подвижного состава, определим величину интегральной частоты для силы  $F_i$  как:  
 $P_{л}^{100} = 0,056 \cdot 0,0249 + 0,747 \cdot 0,0145 + 0,03 \cdot 0,0425 + 0,167 \cdot 0,074 = 0,0262$ .

Аналогичные операции выполняются для каждой вертикальной силы  $F_i$  с выбранным шагом (в данной работе шаг принят 10 кН). Для автоматизации данного процесса разработана специальная программа. В итоге проведения расчёта получится набор интегральных частот для последовательных вертикальных сил, которые используются для построения интегрального закона распределения для летнего периода.

По аналогичному алгоритму определяем интегральный закон распределения плотности вероятности вертикальных сил для зимнего периода.

В итоге получится набор значений для построения интегральной функции для летнего и зимнего периода. В связи с различием в уровнях силового воздействия в системе «колесо—рельс» в летний и зимний периоды из-за разной жёсткости пути введены коэффициенты времени года. Для средней полосы принято, что в летних условиях путь работает  $0,6 T_r$ , в зимних  $0,4 T_r$ , где  $T_r$  — годового периода.

Для полученных наборов значений необходимо выполнить суммирование в соответствии с коэффициентом времени года (для летнего периода — 0,6; для зимнего — 0,4).

Суммарный  $P^{\Sigma} = 0,6 \cdot P_{л} + 0,4 \cdot P_{з}$ , например, для  $F_i = 100$  кН:  
 $P^{\Sigma} = 0,6 \cdot P_{л}^{100} + 0,4 \cdot P_{з}^{100} \cdot 0,6 = 0,0262 + 0,4 \cdot 0,025011 = 0,0257244$ .

В результате расчётов получен интегральный закон распределения вертикальных сил на перегоне, который показан на рис. 2.

Анализ построенного интегрального закона распределения показал:

- полученная плотность распределения вертикальных сил позволит проводить расчёты на прочность элементов верхнего строения пути от доли типов подвижного состава участвующего в поездопотоке, в том числе на контактно-усталостную долговечность рельсов с учётом доли грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками;

- просматривается подобие итогового распределения к распределению от подвижного состава, доля которого наибольшая в поездопотоке. Для рассмотренного случая это распределение от грузовых вагонов;

– учёт пассажирских поездов и моторвагонного подвижного состава вносит изменения в форму распределения от грузовых вагонов, повышая значения частот для вертикальных сил этих типов подвижного состава.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Разработанная методика позволяет определять суммарное воздействие на рельсы и верхнее строение пути с учётом доли каждого типа подвижного состава, установленной скорости движения, климатических условий эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для внедрения на железных дорогах технологии тяжеловесного движения с целью более точного учёта силового воздействия на путь со стороны разных типов подвижного состава, в том числе грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками, разработана методика определения интегральных законов распределения вертикальных и боковых сил.

2. Методика позволяет учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учётом конструкции ходовых частей и величины осевых нагрузок, скорости движения, жёсткости подрельсового основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, долю каждого типа подвижного состава в суммарном воздействии на путь.

3. Определённые по представленной методике интегральные распределения вертикальных и боковых сил позволят проводить расчёты на прочность элементов верхнего строения пути в вероятностном аспекте от доли типов подвижного состава, участвующего в движении на конкретном перегоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Czyczula W., Chudyba Ł. Dynamic response of rail track in longitudinal direction // *Transportation Overview [Przegląd Komunikacyjny]*. – No. 7. – July 2018. – pp. 1–9. – DOI: 10.35117/A\_ENG\_18\_07\_01.
2. Askarinejad H., Barati P., Dhanasekar M., Gallage C. Field studies on sleeper deflection and ballast pressure in heavy haul track // *Australian Journal of Structural Engineering*. – Vol. 19. – Iss. 2. – March 2018. – pp. 1–9. – DOI: 10.1080/13287982.2018.1444335.
3. Pengfei Liu, Wanming Zhai, Kaiyun Wang. Establishment and verification of three-dimensional dynamic model for heavy-haul train–track coupled system // *Vehicle System Dynamics (International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility)*. – Vol. 54. – Iss. 11. – August 2016. – pp. 1511–1537. – DOI: 10.1080/00423114.2016.1213862.
4. Rhodes D. Technical Standards for Heavy Haul Track Components in the Middle East // *9<sup>th</sup> International Heavy Haul Conference*. – 2009. – pp. 993–997. –

[Электронный ресурс]: <http://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctID=MTk4MTRjNDUtNlWQ0My00OTBmLTlYlYUWtZWZjM2U2OTE0ZDY3&rlD=MjYyOA==&pID=NzIx&attchmnt=VHJlZQ==&uSesDM=False&rIdx=MjE5MQ==&rCFU=>. Доступ 29.07.2019.

5. Gräbe H., Shaw F. J. Design life prediction of a heavy haul track foundation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2010. – Vol. 224. – Iss. 5. – pp. 337–344. – DOI: 10.1243/09544097JRR371.

6. Gerlici J., Nozhenko O., Chemiak G., Gorbunov M., Domin R., Lack T. The development of diagnostics methodological principles of the railway rolling stock on the basis of the analysis of dynamic vibration processes of the rail. – *MATEC Web of Conferences* 157, 03007. – January 2018. – DOI: 10.1051/mateconf/201815703007.

7. Koziol P., Kudla D. Vertical vibrations of rail track generated by random irregularities of rail head rolling surface. – *Journal of Physics: Conference Series. – Modern Practice in Stress and Vibration Analysis (MPSVA)* 2018. – 1106 012007. – DOI: 10.1088/1742–6596/1106/1/012007.

8. Об актуализации основных параметров генеральной схемы развития сети железных дорог РЖД до 2020 и 2025 гг. в региональном разрезе. – Заседание НТС ОАО «РЖД» от 16.03.2016 г. [Электронный ресурс]: [http://www.rzd.ru/best/public/ru?STRUCTURE\\_ID=886&layer\\_id=5176&refererLayerId=5175&id=354](http://www.rzd.ru/best/public/ru?STRUCTURE_ID=886&layer_id=5176&refererLayerId=5175&id=354). Доступ 12.08.2019.

9. Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. [Электронный ресурс]: <https://www.mintrans.ru/documents/1/1010>. Доступ 29.07.2019.

10. Виленкин С. Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. – М.: Энергия, 1979. – 210 с.

11. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 767 с.

12. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надёжности: ЦПТ-52. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 г. № 2706р. [Электронный ресурс]: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=713998&dst=4294967295&date=18.10.2019>. Доступ 29.07.2019.

13. Коссов В. С., Лунин А. А. Исследования продольной динамики и воздействия на путь соединённых поездов массой 12600 т // *Тяжёлое машиностроение*. – 2016. – № 9. – С. 21–26.

14. Коссов В. С. Результаты экспериментальных и теоретических исследований воздействия подвижного состава на путь в перспективных условиях эксплуатации // *Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД»*. – 2013. – № 5. – С. 27–36.

15. Коссов В. С., Лунин А. А., Краснов О. Г., Спириков А. В. Оценка воздействия на путь грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25 тс // *Железнодорожный транспорт*. – 2018. – № 3. – С. 63–68.

16. Коссов В. С., Лунин А. А., Краснов О. Г., Спириков А. В. Воздействие на путь грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками // *Путь и путевое хозяйство*. – 2018. – № 3. – С. 19–23.

17. Третьяков В. В., Петропавловская И. Б., Певзнер В. О., Громова Т. И. и др. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой // *Вестник ВНИИЖТ*. – 2016. – № 4. – С. 233–238.

18. Степов В. В. Эксплуатация вагонов с повышенной осевой нагрузкой на участке Ковдор–Мурманск // *Железнодорожный транспорт*. – 2016. – № 10. – С. 19–22.

