

А.М. Сафронов*

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина.
Телефон: (05366) 6-03-24

А.А. Сулим

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина.
Телефон: (05366) 6-03-34

Ю.Я. Водяников

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина.
Телефон: (05366) 6-13-24

П.А. Хозя

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина.
Телефон: (05366) 6-20-43

В.С. Речкалов

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина.
Телефон: (05366) 6-13-24

**ПРОЦЕДУРА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С УЧЕТОМ
СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ**

Повышение достоверности результатов испытаний достигается применением более совершенных методов записи и обработки результатов. Поэтому важным разделом исследования прочности грузовых вагонов является выбор методов получения, обработки и анализа экспериментальных данных.

В статье изложена процедура и алгоритмы определения эквивалентных напряжений при воздействии продольных и динамических нагрузок, действующих в процессе эксплуатации.

© Сафронов А.М., Сулим А.А., Водяников Ю.Я., Хозя П.А., Речкалов В.С., 2021

Показано, что алгоритмы определения напряжений от динамических продольных и вертикальных сил имеют существенные отличия, обусловленные различием схем приложения нагрузок. Так, испытания грузовых вагонов на динамические продольные нагрузки проводятся методом ударного воздействия на опытный вагон, а на динамические вертикальные – в процессе движения вагона в составе опытного поезда на характерных, заранее выбранных (намеченных) участках железнодорожного пути, при заданных скоростях.

Для оценки уровня нагруженности конструкции грузового вагона от вертикальных динамических нагрузок используется метод, основанный на замене реального случайного процесса некоторым схематизированным процессом, который по уровню накопления усталостного повреждения должен быть эквивалентен реальному процессу. Из всего многообразия методов схематизации выделяются два метода – метод полных циклов и метод «дождя», которые наиболее полно отражают реальный процесс. Преимуществом метода «дождя» является возможность обработки процесса в реальном режиме времени. Однако, алгоритм метода «дождя» является достаточно сложным и не позволяет обрабатывать большие объемы информации. В этой связи был предложен метод максимальных размахов, который является разновидностью метода полных циклов и позволяет в режиме онлайн обрабатывать неограниченный объем информации.

Для сравнительного анализа методов схематизации «дождя» и максимальных размахов был использован пример, приведенный в ГОСТ 25.101. Анализ показал удовлетворительное совпадение обеих методов.

На основании изложенной процедуры, предложена блочная структура вычислительного процесса для определения эквивалентной приведенной амплитуды напряжений.

Каждый блок отображает воздействие сил в зависимости от условия нагружения – ударные продольные силы и динамические силы при движении вагона по прямым, кривым и стрелочным переводам железнодорожного пути.

Ключевые слова: грузовой вагон, процесс, динамическая нагрузка, продольная нагрузка, напряжение, амплитуда, алгоритм, эквивалентное напряжение, коэффициент запаса, прочность.

О.М. Сафронов*

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна.

Телефон: (05366) 6-03-24

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька 33, м.Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна.

Телефон: (05366) 6-03-34

Ю.Я. Водянніков

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»
вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна.
Телефон: (05366) 6-13-24

П.О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»
вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна.
Телефон: (05366) 6-20-43

В.С. Речкалов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»
вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна.
Телефон: (05366) 6-13-24

ПРОЦЕДУРА ТА АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПАСУ МІЦНОСТІ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ ВИМОГ

Підвищення достовірності результатів випробувань досягається застосуванням більш досконалих методів запису і обробки результатів. Тому важливим розділом дослідження міцності вантажних вагонів є вибір методів отримання, обробки і аналізу експериментальних даних.

У статті викладена процедура і алгоритми визначення еквівалентних напружень при впливі поздовжніх і динамічних навантажень, що діють в процесі експлуатації.

Показано, що алгоритми визначення напружень від динамічних поздовжніх і вертикальних сил мають істотні відмінності, обумовлені розходженням схем прикладання навантажень. Так, випробування вантажних вагонів на динамічні поздовжні навантаження проводяться методом ударного впливу на дослідний вагон, а на динамічні вертикальні - в процесі руху вагона в складі дослідного поїзда на характерних, заздалегідь обраних (намічених) ділянках залізничної колії, при заданих швидкостях.

Для оцінки рівня навантаженості конструкції вантажного вагона від вертикальних динамічних навантажень використовується метод, заснований на заміні реального випадкового процесу деяким схематизувати процесом, який за рівнем накопичення втомного пошкодження повинен бути еквівалентний реального процесу. З усього різноманіття методів схематизації виділяються два методи - метод повних циклів і метод «дощу», які найбільш повно відображають реальний процес. Перевагою методу «дощу» є можливість обробки процесу в реальному режимі часу. Однак, алгоритм методу «дощу» є досить складним і не дозволяє обробляти великі обсяги інформації. У зв'язку з цим було запропоно-

вано метод максимальних розмахів, який є різновидом методу повних циклів і дозволяє в режимі онлайн обробляти необмежений обсяг інформації.

Для порівняльного аналізу методів схематизації «дощу» і максимальних розмахів був використаний приклад, наведений в ГОСТ 25.101. Аналіз показав задовільний збіг обох методів.

На підставі викладеної процедури, запропонована блокова структура обчислювального процесу для визначення еквівалентної наведеної амплітуди напружень.

Кожен блок відображає вплив сил в залежності від умови навантаження – ударні позовдовжні сили і динамічні сили під час руху вагона по прямим, кривим і стрілочним переводам залізничної колії.

Ключові слова: вантажний вагон, процес, динамічне навантаження, позовдне навантаження, напруга, амплітуда, алгоритм, еквівалентне напруження, коефіцієнт запасу, міцність.

Вступлення. Увеличивающийся объем перевозок грузов и создание транспортных коридоров обусловило, в качестве одного из стратегических направлений научно-технического развития грузового железнодорожного транспорта, создание грузовых вагонов с повышенной осевой нагрузкой до 30 тс и скоростями движения до 160 км/ч. Кроме того, в последние годы, мировым трендом становится создание высокоскоростных грузовых поездов со скоростями 200 км/ч и более.

Анализ исследования и постановка проблемы. Безопасность движения и эффективность работы подвижного состава железных дорог зависят от многих факторов, в том числе от прочности и надежности конструкций грузовых вагонов. Поэтому улучшение динамических качеств вагонов является одной из самых актуальных проблем железнодорожного транспорта.

Для объективной оценки безопасной работы подвижного состава требуется применение все более совершенных норм и правил обоснования работоспособности [1], что возможно только на основе более точного прогнозирования и подтверждения ресурса (расхода ресурса) грузовых вагонов в зависимости от условий и режимов эксплуатации [2, 3].

Цель статьи. Разработать процедуру и алгоритм определения коэффициента запаса прочности с учетом современных требований.

Материал изложения процедуры и алгоритма. В большинстве конструкций вагонов возникают знакопеременные напряжения, которые носят случайный характер. Знакопеременные напряжения обуславливают процесс постепенного накопления повреждений, приводящий вначале к образованию микроскопической трещины, а затем к ее развитию и последующему внезапному разрушению – усталости металла.

Оценочные характеристики динамических и прочностных качеств вагона устанавливаются по результатам экспериментальных исследований, к основным из которых следует отнести поездные (ходовые) испытания, а также испытания на ударные нагрузки.

Методика проведения испытаний разрабатывается в зависимости от поставленной задачи и состоит:

- ✓ в подготовке вагона к испытаниям;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- ✓ в определении видов и объемов измерительной регистрирующей аппаратуры, а также ее размещение на вагоне;
- ✓ в определении режимов нагружения испытываемого вагона;
- ✓ в порядке проведения испытаний;
- ✓ в выборе опытного участка пути и его характеристик;
- ✓ в выборе методов автоматической обработки опытных данных и применяемой при этом аппаратуре.

В основу исследования прочности грузовых вагонов положена модель многоциклового усталости, использующая линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений [2]. В рамках данной модели рассматривается упругая работа материала с учетом гипотезы о его сплошности, бездефектности и безструктурности. Влияние существующих в реальных материалах дефектов, несплошностей и пластических деформаций опосредованно учитывается в величинах допускаемых напряжений. Указанные факторы способствуют образованию трещин особенно в зонах концентраторов, каковыми являются сварные швы.

Сопротивление усталости оценивается для амплитуд действующих напряжений не менее 10 МПа для сталей и не менее 3 МПа для алюминиевых сплавов, а также не более 75 % от значения предела текучести (условного предела текучести) материала [2].

Усталостная прочность узла или детали оценивается по эквивалентному значению амплитуды напряжений в конструкции ($\sigma_{a,э}$) и предельной амплитуде напряжений (предел выносливости соответствующий вероятности неразрушения) по формуле [2]:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,э}} \geq [n], \quad (1)$$

где $\sigma_{a,N}$ – предел выносливости по амплитуде в расчетном сечении при вероятности неразрушения 0,95, МПа и базовом числе циклов $N_0 = 10^7$;

$\sigma_{a,э}$ – приведенная амплитуда динамического напряжения МПа, эквивалентная по повреждающему действию распределению амплитуд напряжений за расчетный срок службы.

[n] – минимально допустимое значение коэффициента запаса сопротивления усталости.

При использовании надежных экспериментальных данных о режимах эксплуатационной нагруженности и прочностных характеристиках детали с учетом вероятностного рассеивания допустимые коэффициенты запаса принимаются в диапазоне от 1,3 до 1,7. Наличие приближенных данных о прочности детали или режимах ее нагруженности требует использования значений коэффициентов запаса от 1,5 до 1,9. Использование же приближенных данных о прочности детали и режимах ее нагруженности принимаются повышенные значения коэффициентов запаса от 1,8 до 2,2 [4, 5].

Если проектируемое или сертифицируемое изделие является ответственной деталью подвижного состава, то для нее принимают большие значения коэффициентов запаса усталости. Так, например, при одних и тех же исходных

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

данных для элементов кузова будет принят коэффициент запаса равный 1,5, а для колесной пары – 1,9.

Предел выносливости по амплитуде $\sigma_{a,N}$, МПа, для сварных составных частей несущих элементов конструкции грузового вагона определяется расчетным способом по формуле [4]:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_M}{K_\sigma}, \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_M$ — значение предела выносливости базового материала (листа, проката) при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$ и односторонней доверительной вероятности 95 %, принимается равным $\bar{\sigma}_M = 47$ МПа и $\bar{\sigma}_M = 23,5$ МПа соответственно для стали и алюминиевых сплавов;

K_σ — коэффициент снижения предела выносливости для различных типов сварных соединений, приведен в [2].

Для литых стальных несущих конструкций пределы выносливости по амплитуде определяются по формуле (2) при значении предела выносливости базового материала $\bar{\sigma}_M = 47$ МПа и коэффициентах снижения предела выносливости, определяемых для различных зон литых деталей [2], или по результатам испытаний в соответствии с действующими стандартами.

Приведенная амплитуда динамического напряжения $\sigma_{a,\varepsilon}$, эквивалентная по повреждающему действию за расчетный ресурс составной части конструкции грузового вагона, определяется по формуле [2]:

$$\sigma_{a,\varepsilon} = \sqrt[m_1]{\frac{1}{N_0} \left(\sum n_i \cdot (\sigma_{a,i}^{\prime\prime})^{m_1} + \sigma_{a,N}^{(m_1-m_2)} \cdot \sum n_j \cdot (\sigma_{a,j}^{\prime})^{m_2} \right)} \quad (3)$$

где $\sigma_{a,N}$ - предел выносливости по амплитуде (точка перелома кривой выносливости для больших и малых амплитуд напряжения) при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$, определяется по формуле (2);

m_1 — показатель степени первой ветви кривой выносливости, для сварных соединений принимается равной $m_1 = 3$ (для литых деталей $m_1 = 4$);

m_2 — показатель степени второй ветви кривой выносливости, для сварных соединений принимается равной $m_2 = 5$ для основного металла и литых деталей $m_2 = 9$.

Допускается в формуле (3) принимать $m_1 = m_2$;

$\sigma_{a,i}^{\prime\prime}$ — амплитуда динамического напряжения при $\sigma_{a,i} \geq \sigma_{a,N}$;

n_i — количество циклов амплитуд динамического напряжения $\sigma_{a,i}$;

$\sigma_{a,j}^{\prime}$ — амплитуда динамического напряжения при $\sigma_{a,j} < \sigma_{a,N}$;

n_j — количество циклов амплитуд динамического напряжения $\sigma_{a,j}$.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Первое слагаемое подкоренного выражения формулы (3) учитывает продольные нагрузки, а второе – вертикальные динамические.

Алгоритм определения эквивалентных напряжений от продольных сил приведен на рис. 1, а пример определения эквивалентных напряжений – в таблице 1 [6].

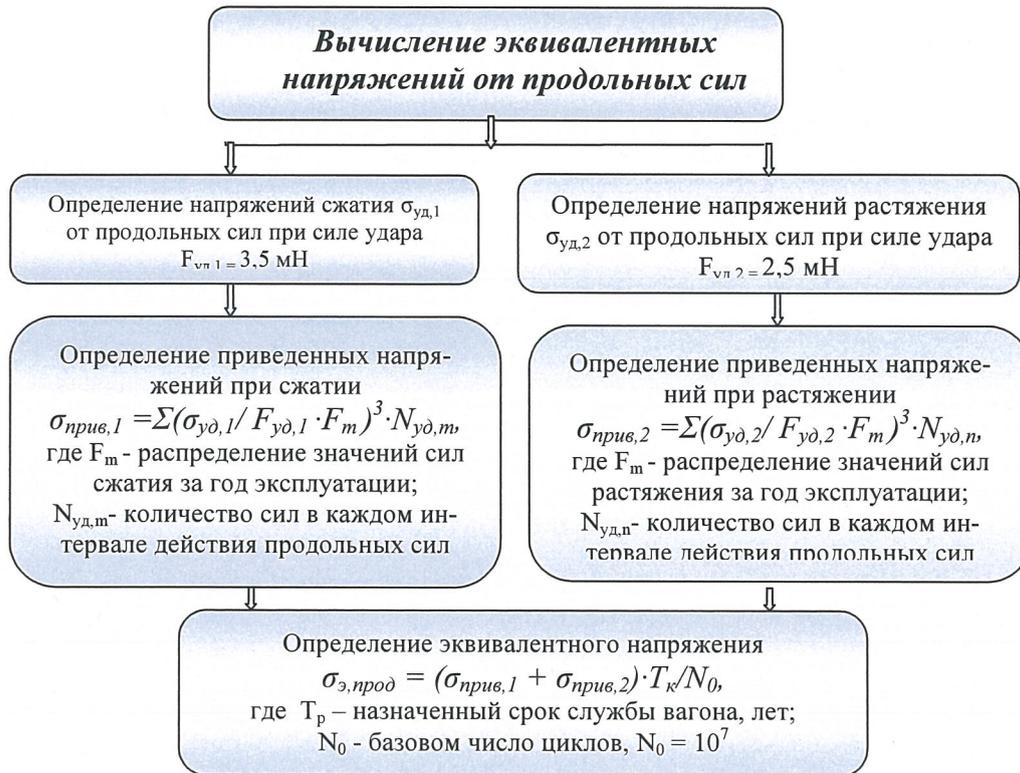


Рис. 1. Алгоритм определения эквивалентных напряжений от продольных сил

Таблица 1.- Пример определение эквивалентных напряжений от продольных сил [6]

F_i , МН	$N_{уд,j}$	$\sigma_{уд}$	$\frac{\sigma_{уд} F_i}{F_{уд}}$	$\left(\frac{\sigma_{уд} F_i}{F_{уд}}\right)^3$	T_k	$\left(\frac{\sigma_{уд} F_i}{F_{уд}}\right)^{m_1} \cdot N_{уд,j} \cdot T_k$
1	2	3	4	5	6	7
Сжимающие силы						
0,3	800	120,82424	10,356363	1110,764	32	28435559,61
0,6	2000	120,82424	20,712726	8886,1124	32	568711192,2

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення табл. 1

1,0	2230	120,82424	34,521211	41139,409	32	2935708237
1,4	1410	120,82424	48,329695	112886,54	32	5093440627
1,8	800	120,82424	62,138179	239925,03	32	6142080876
2,2	200	120,82424	75,946663	438052,43	32	2803535544
2,6	50	120,82424	89,755147	723066,26	32	1156906009
3,0	9	120,82424	103,56363	1110764	32	319900045,6
3,35	1	120,82424	115,64606	1546651,5	32	49492848,47
Растягивающие силы						
0,3	2432	81,154475	9,738537	923,5941	32	71877787,35
0,6	5700	81,154475	20,196	8237,5125	32	1502522278
1,0	5120	81,154475	33,66	38136,632	32	6248305770
1,4	3050	81,154475	47,124	104646,92	32	10213539189
1,8	800	81,154475	60,588	222412,84	32	5693768633
2,2	180	81,154475	74,052	406078,86	32	2339014213
$\left[\sum_{m=1}^k \left(\left(\frac{\sigma_{уд,1} F_m}{F_{уд,1}} \right)^3 \cdot N_{уд,m} \right) + \sum_{n=1}^p \left(\left(\frac{\sigma_{уд,2} F_n}{F_{уд,2}} \right)^3 \cdot N_{уд,n} \right) \right] \cdot T_k$						45167238809

Амплитуды напряжений при действии вертикальных динамических нагрузок являются случайными величинами, что обусловлено случайными возмущающими воздействиями со стороны рельсового пути.

При проведении комплексных динамических испытаний выбираются характерные заранее выбранные (намеченные) участки железнодорожного пути фиксированной ограниченной длины, причем максимальная скорость движения при испытаниях должна превышать проектную конструкционную скорость опытного вагона не менее чем на 15—20 км/ч.

В процессе данного вида испытаний контролируются динамические напряжения в наиболее нагруженных несущих элементах конструкции вагона в виде последовательного набора записей (реализаций) при различных скоростях и режимах движения опытного поезда [2]:

- на прямом участке пути – 20, 40, 60, 80, 100, 120 км/ч;
- на кривой $R300$ – 10, 20, 40, 60 км/ч;
- на кривой $R700$ – 20, 40, 60, 80, 100, 110 км/ч;
- на стрелочном переводе марки 1/11 (по боковому направлению) – 10, 20, 30, 40 км/ч.

Для получения статистических представительных результатов исследования, длительность записи или длина реализации процесса нагружения должна содержать не менее 1000 экстремумов n , процесса. Полуцикл нагружения составляет часть цикла регулярного нагружения [2, 7, 8], которая соответствует половине периода изменения нагрузки.

Зарегистрированные динамические напряжения подвергаются систематизации и отбраковке недостоверных данных. При обработке временных зависимостей сил и напряжений учитываются частоты в диапазоне от 0,1 до 20,0 Гц.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Эквивалентные динамические напряжения определяются по формуле [2, 9]:

$$\frac{T_p}{N_0} \sum_{j=1}^n K_{yчj} \sum_{i=1}^{k_{vj}} P_{vj} f_{эvj} \sum_{i=1}^{k_{ai}} \sigma_{ai}^{m_2} P_{ai} \quad (4)$$

- где m_2 – показатель степени в уравнении кривой усталости, $m_2 = 5$;
 T_p – суммарное время действия динамических напряжений за расчетный срок службы, с;
 $f_{эvj}$ – центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений, Гц;
 N_0 – базовое число циклов динамических напряжений (для стальных конструкций $N_0 = 10^7$);
 n – число учитываемых характерных режимов движения (прямая, кривая, стрелочный перевод);
 j – счетчик характерных режимов движения;
 $K_{yчj}$ – доля протяженности характерных участков пути в общей длине железнодорожных линий: прямых ($j = 1$), кривых ($j = 2$) и стрелочных переводов ($j = 3$), принимается: $K_{yч1} = 0,75$, $K_{yч2} = 0,23$, $K_{yч3} = 0,02$;
 j – счетчик диапазонов скоростей;
 K_{vj} – принятое число диапазонов скоростей для j -го характерного участка пути;
 P_{vj} – вероятность движения вагона, приходящаяся на эксплуатацию со скоростью V_j ;
 k_{ai} – число разрядов дискретизации амплитуд напряжений;
 σ_{ai} – средняя амплитуда напряжений в i -ом диапазоне (для j -го характерного участка пути в j -ом диапазоне скоростей);
 P_{ai} – вероятность появления амплитуд напряжений с уровнем σ_{ai} в i -ом интервале скоростей движения вагона.
Суммарное время действия динамических напряжений за расчетный срок службы T_p определяется по формуле [2, 9]:

$$T_p = 365 \cdot 10^3 \frac{\bar{L}}{\bar{V}} T_k \quad (5)$$

- где \bar{L} – проектный среднесуточный пробег вагона, м/сут;
 \bar{V} – средняя техническая скорость движения вагона, м/с, (табл. 2);
 T_k – расчетный ресурс (назначенный календарный срок службы вагона), лет.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблица 2. - Средняя техническая скорость движения для различных значений конструкционной скорости вагона в километрах в час [2, 4]

Конструкционная скорость, км/ч	Средняя техническая скорость, м/с	Конструкционная скорость, км/ч	Средняя техническая скорость, м/с
200	31,1	120	22,5
160	25,6	100	19,2
140	24,7	90	16,9

Динамические силы (динамические напряжения), действующие на несущую конструкцию кузова вагона при движении определяют с учетом вероятности распределения скоростей движения [2, 4] (табл. 3)

Для оценки уровня нагруженности используются методы, основанные на замене реального случайного процесса некоторым схематизированным процессом, который по уровню накопления усталостного повреждения должен быть эквивалентен реальному процессу [10].

Таблица 3 - Распределение скоростей движения для определения сопротивления усталости

Интервал скорости движения, м/с	Средняя скорость интервала, м/с	Вероятность движения в диапазоне скорости для вагона с конструкционной скоростью, м/с (км/ч)				
		44,4 (160)	38,9 (140)	33,3 (120)	27,8 (100)	25,0 (90)
1	2	3	4	5	6	7
от 0,00 до 12,5	6,25	0,02	0,02	0,03	0,05	0,15
свыше 12,5 до 15,0	13,75	0,05	0,06	0,07	0,12	0,30
свыше 15,0 до 17,5	16,25	0,07	0,07	0,10	0,30	0,35
свыше 17,5 до 20,0	18,75	0,09	0,10	0,18	0,20	0,13
свыше 20,0 до 22,5	21,25	0,11	0,15	0,15	0,15	0,05
свыше 22,5 до 25,0	23,75	0,13	0,15	0,15	0,10	0,02
свыше 25,0 до 27,5	26,25	0,15	0,15	0,15	0,06	-
свыше 27,5 до 30,0	28,75	0,13	0,10	0,09	0,02	-
свыше 30,0 до 32,5	31,25	0,09	0,08	0,06	-	-
свыше 32,5 до 35,0	33,75	0,06	0,05	0,02	-	-
свыше 35,0 до 37,5	36,25	0,04	0,05	-	-	-
свыше 37,5 до 40,0	38,75	0,03	0,02	-	-	-
свыше 40,0 до 42,5	41,25	0,02	-	-	-	-
свыше 42,5 до 45,0	43,75	0,01	-	-	-	-
свыше 45,0 до 47,5	46,25	-	-	-	-	-
свыше 47,5 до 50,0	48,75	-	-	-	-	-
свыше 50,0 до 52,5	51,25	-	-	-	-	-
свыше 52,5 до 55,0	53,75	-	-	-	-	-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

В качестве примера рассматривается динамический процесс показанный на рис. 2, для которого выполнена схематизация. Размахи и амплитуды напряжений приведены в таблице 4.

Распределение амплитуд напряжений и их частота по классам приведены в таблице 5.

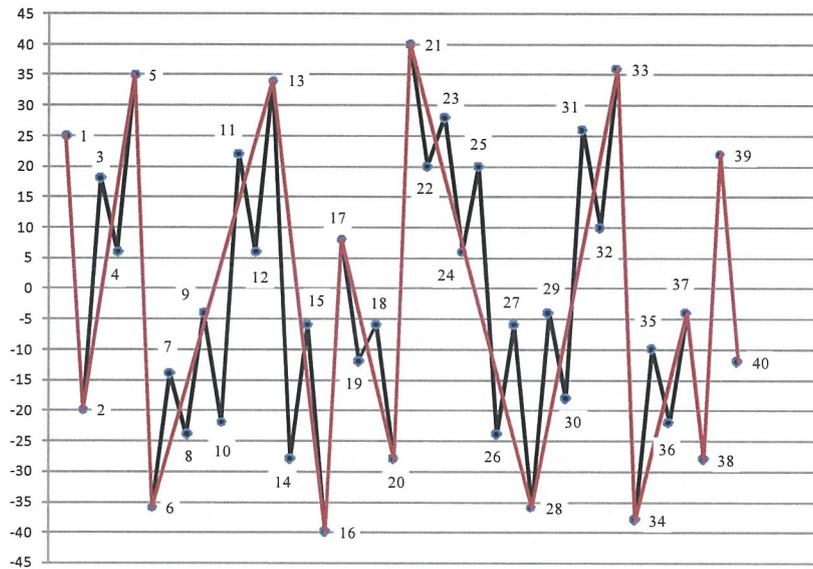


Рис. 2. Схематизация динамического процесса

Таблица 4. - Размахи и амплитуды напряжений

Точки размаха	$2\sigma_a$, МПа	σ_a , МПа	Точки размаха	$2\sigma_a$, МПа	σ_a , МПа
1	2	3	4	5	6
1-2	45	22,5	21-28	76	38
2-5	55	27,5	22-23	8	4
3-4	12	6	23-22	8	4
4-3	12	6	24-25	14	7
5-6	71	35,5	25-24	14	7
6-13	70	35	26-27	18	9
7-8	10	5	27-26	18	9
8-7	10	5	28-33	72	36
9-10	18	9	29-30	14	7
10-9	18	9	30-29	14	7
11-12	16	8	31-32	16	8

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення табл. 4

1	2	3	4	5	6
12-11	16	8	32-31	16	8
13-16	74	37	33-34	74	37
14-15	22	11	34-37	34	17
15-14	22	11	35-36	12	6
16-17	48	24	36-35	12	6
17-20	36	18	37-38	24	12
18-19	6	3	38-39	50	25
19-18	6	3	39-40	34	17
20-21	68	34			

Таблиця 5. - Розбиение амплитуд напруг на класи

№ класу	Інтервал класу, МПа	Амплитуди напруг, попавши в інтервал, МПа	Частота попадання в інтервал	Середнє значення амплитуди, МПа	Вероятність амплитуди
1	2	3	4	5	6
14	38-40	38	1	38	0,0625
13	36-38	36; 37; 37	3	36,67	0,1875
12	34-36	34; 35; 35,5	3	34,83	0,1875
11	32-34	0	0	0	0
10	30-32	0	0	0	0
9	28-30	0	0	0	0
8	26-28	27,5	1	27,5	0,0625
7	24-26	24; 25	2	24,5	0,125
6	22-24	22,5	1	22,5	0,0625
5	20-22	0	0	0	0
4	18-20	18	1	18	0,0625
3	16-18	17	1	17	0,0625
2	14-16	0	0	0	0
1	10-14	11; 11-12	3	11,3	0,1875
Σ			= 16	Σ	= 1

Для визначення частоти коливань для кожного фрагмента підраховується кількість екстремумів, причому сусідні екстремуми, що утворюють розмах менше ширини класу, не підраховують. Значення частоти ($F_{i,\phi}$) для i – го фрагмента визначається за формулою [2, 8]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$F_{i,\phi} = \frac{\sum a_{i,\phi,эк}}{2 \cdot t_{i,\phi}} \quad (6)$$

где $\sum a_{i,\phi,эк}$ - сумма экстремумов (максимальных и минимальных);
 $t_{i,\phi}$ - время.

По аналогичной методике определяются амплитуды напряжений и частоты по всем фрагментам записанного динамического процесса. Окончательным этапом является определение средних амплитуд напряжений с учетом всех фрагментов и их распределение по классам, а также вероятности попадания в класс соответственно по формулам (7) и (8):

$$\sigma_{ai} = \frac{\sum_{j=1}^m (\sigma_{cp,i})^{\phi,j}}{m}, \quad (7)$$

где $\sigma_{cp,i}$ - средние значения амплитуд напряжений в i - ом классе;
 m – количество фрагментов;
 j – номер фрагмента.

$$P_{ai} = \frac{\sum_{j=1}^m (n_i)^{\phi,j}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (n_i)^{\phi,j}}, \quad (8)$$

где n_i - частота попадания амплитуды в i - ый класс;
 K – количество классов.

Вычислительный процесс распределения амплитуд динамических напряжений по классам приведен на рис. 3.

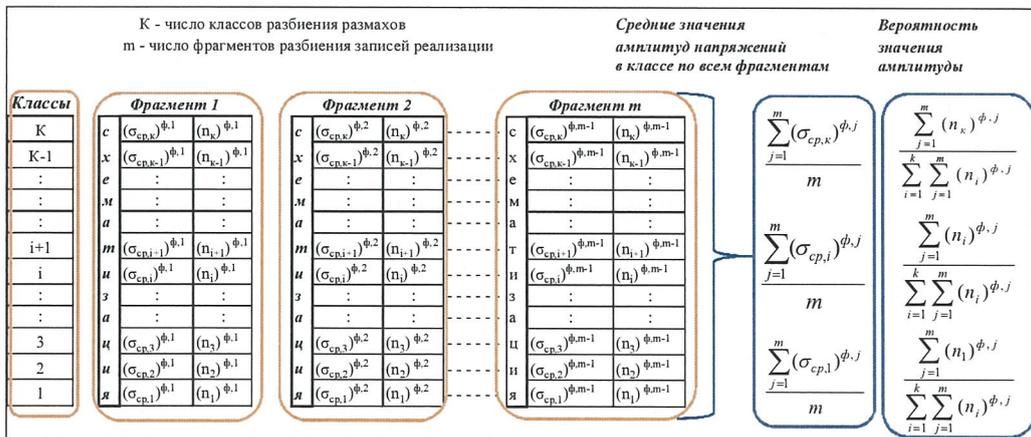


Рис. 3. Вычислительный процесс распределения амплитуд динамических напряжений по классам

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Окончательный результат определения приведенных амплитуд динамических напряжений показан на примере грузового вагона (для упрощения выполнен для одного фрагмента) для конструкционной скорости 100 км/ч при движении на прямом участке пути со скоростью 60 км/ч (рис. 4).

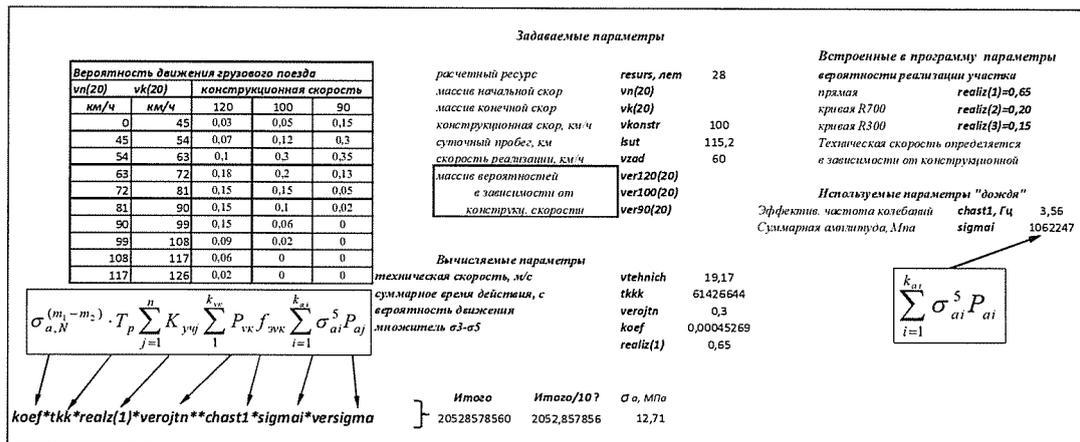


Рис. 4. Результаты определения эквивалентных динамических напряжений от вертикальной нагрузки

С учетом изложенной методики, разработана блочная структура алгоритма вычислительного процесса для определения эквивалентной приведенной амплитуды напряжений (рис. 5).

Каждый блок отображает воздействие сил в зависимости от условия нагружения – продольные и динамические силы при движении вагона по прямым, кривым и стрелочным переводам железнодорожного пути.

Блок 1 - Вычисление приведенных эквивалентных напряжений при ударных нагрузках (рис. 6);

Блок 2 - Вычисление приведенных эквивалентных напряжений на прямых участках пути (рис. 7);

Блок 3 - Вычисление приведенных эквивалентных напряжений на кривых участках пути радиусом 700 м (рис. 8);

Блок 4 - Вычисление приведенных эквивалентных напряжений на кривых участках пути радиусом 300 м (рис. 9);

Блок 5 - Вычисление приведенных эквивалентных напряжений на стрелочных переводах пути (рис. 10).

Во **Блоках 2-5** используется **Блок R** для вычисления амплитуд напряжений по каждой реализации (опыта) (рис. 11).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

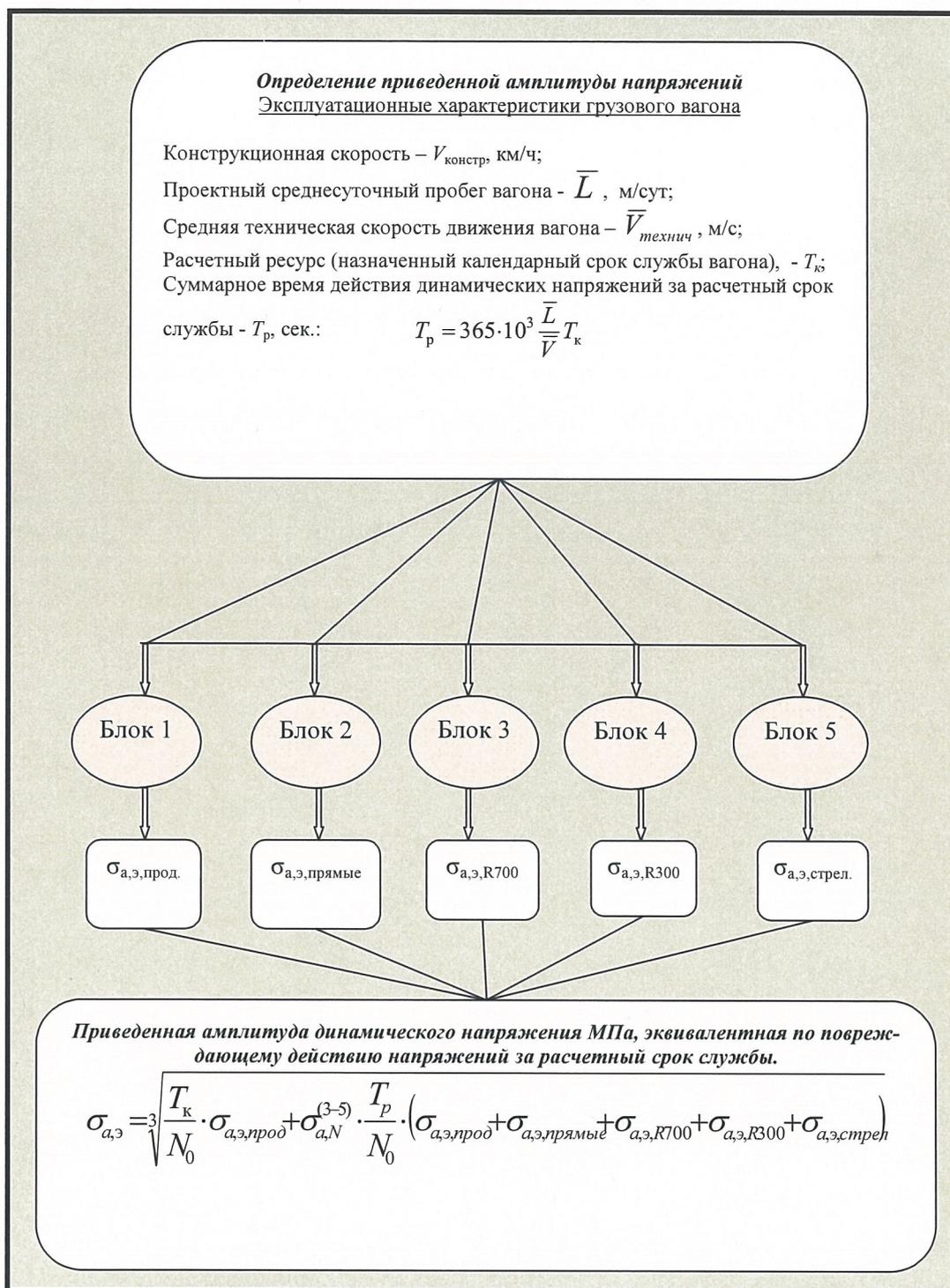


Рис. 5. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

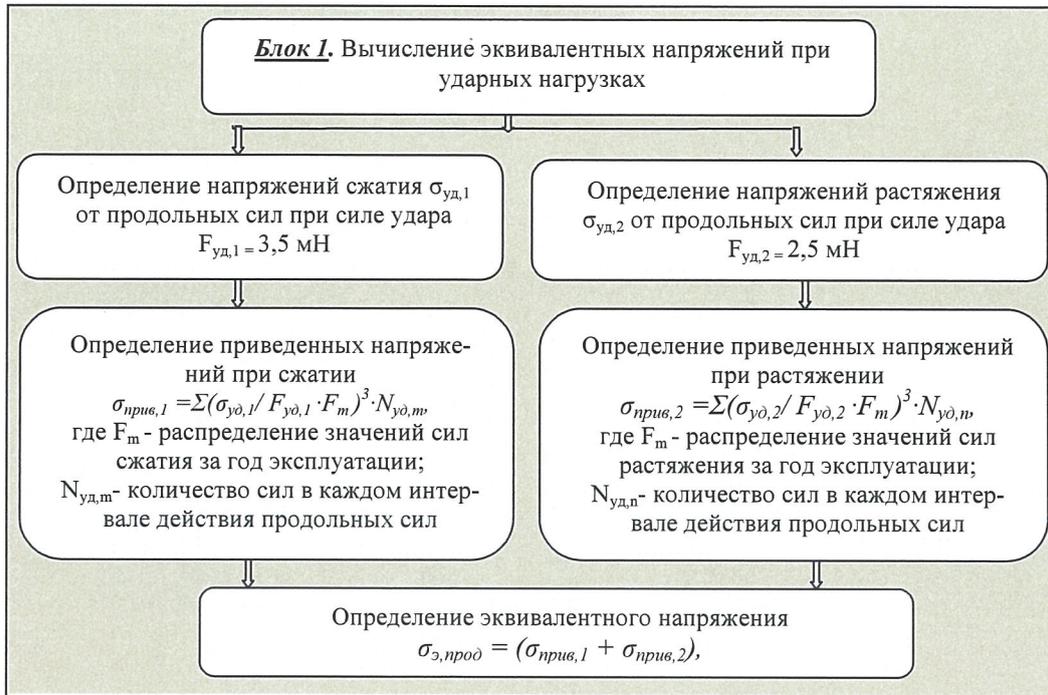


Рис. 6. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

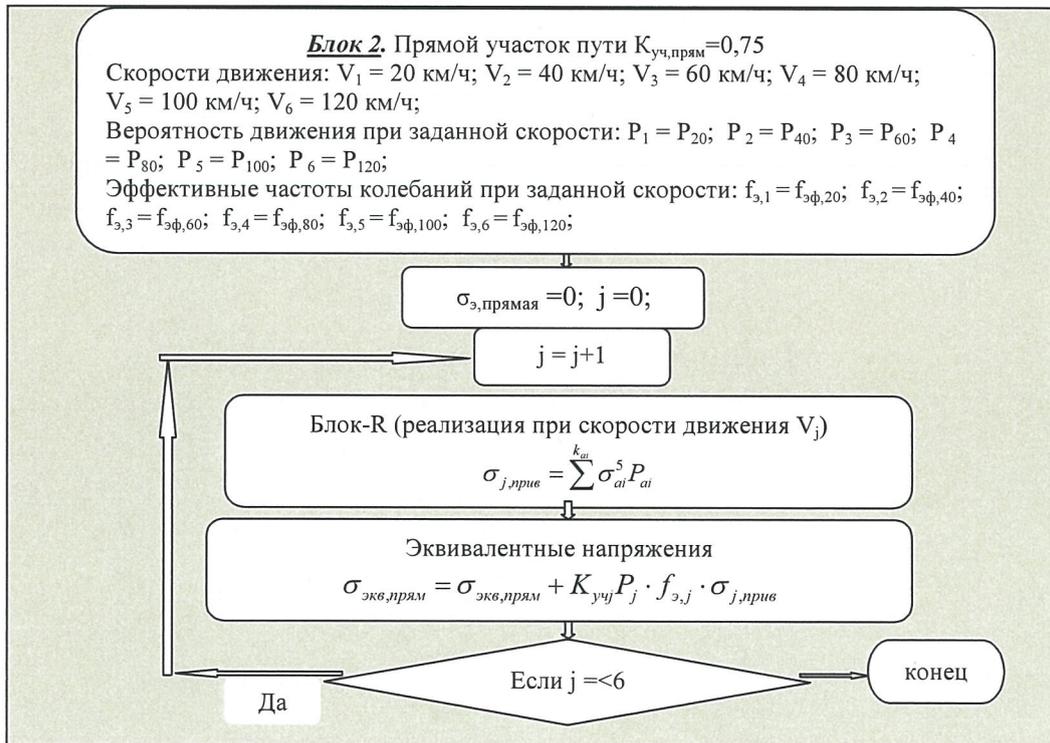


Рис. 7. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

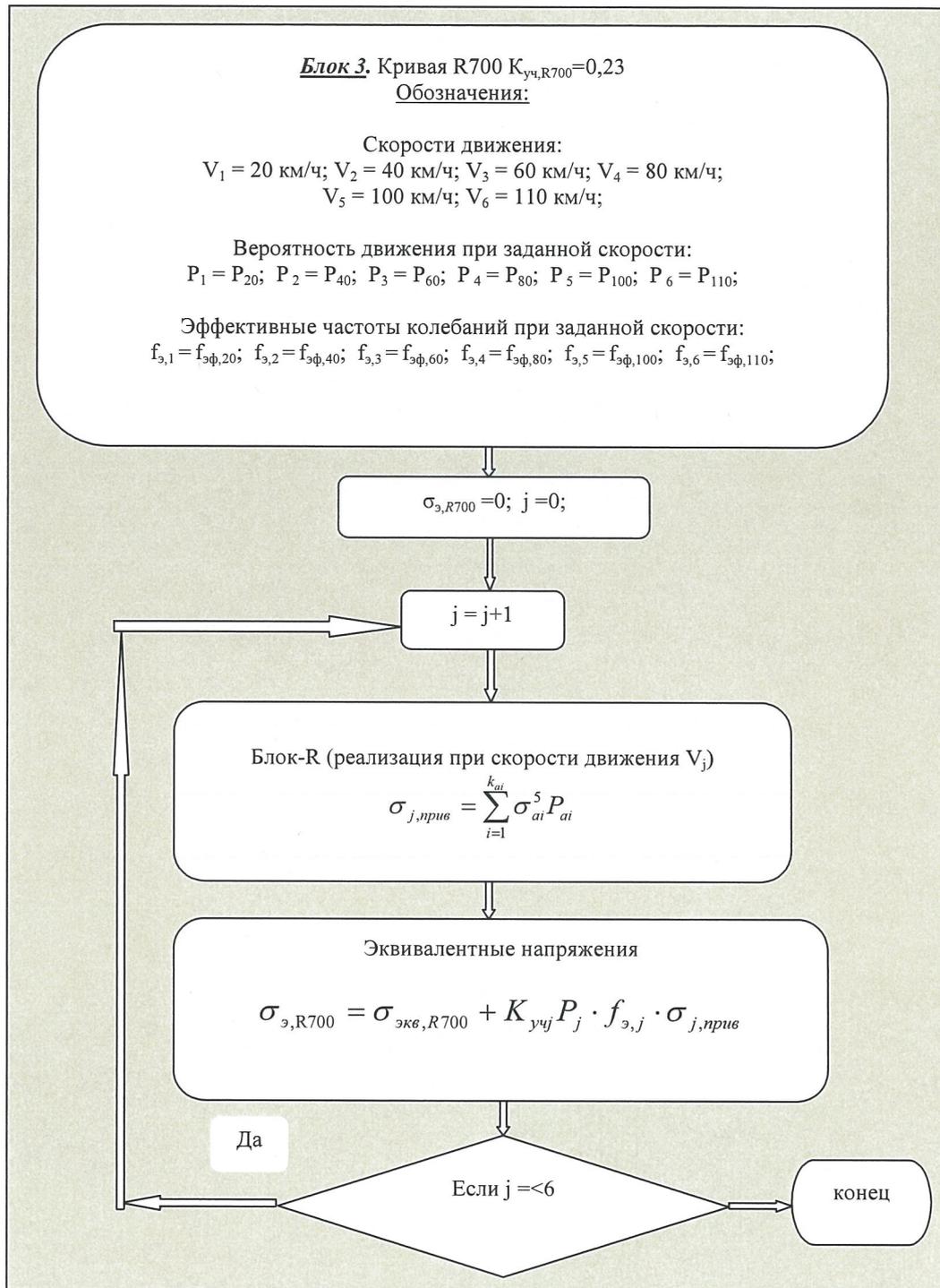


Рис. 8. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

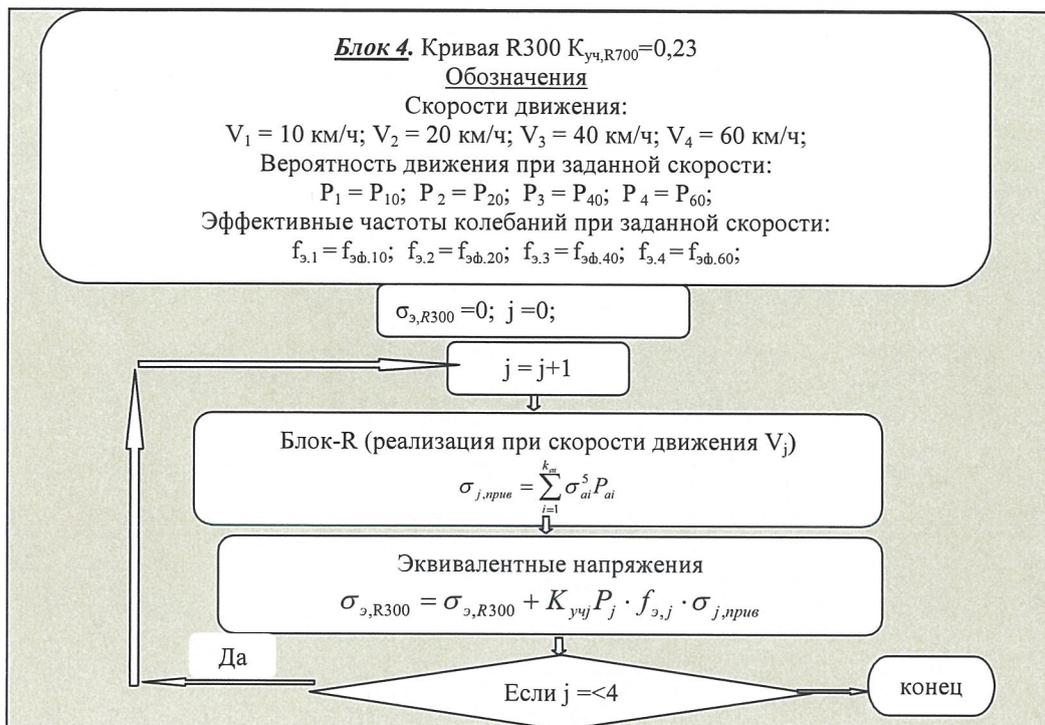


Рис. 9. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

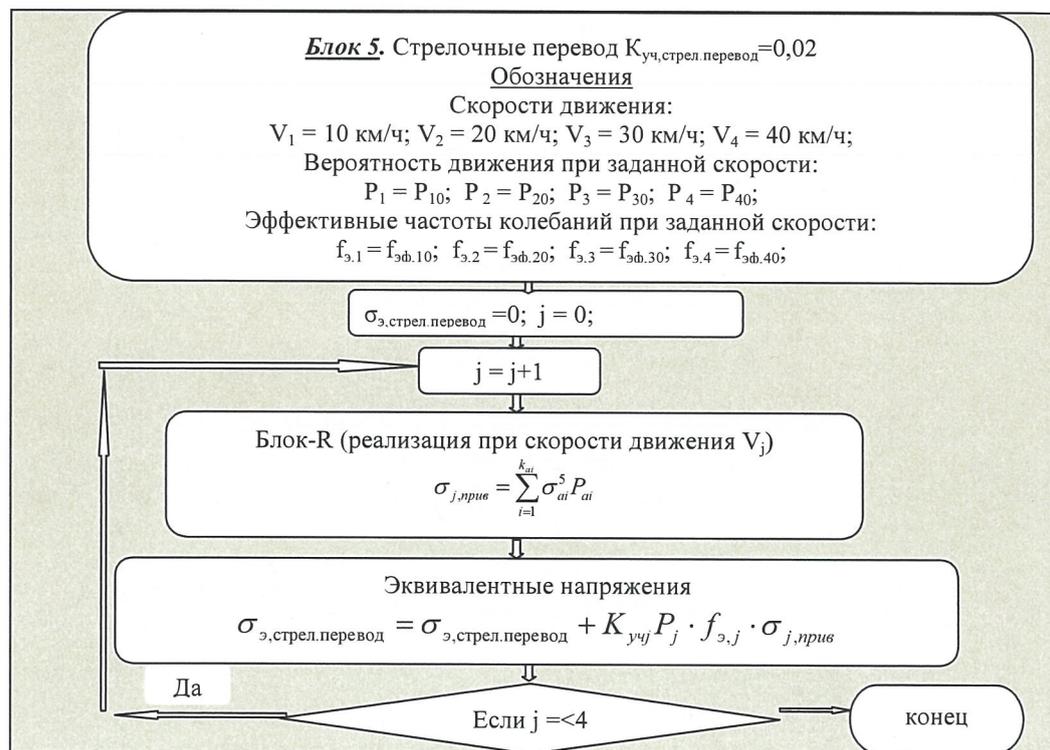


Рис. 10. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

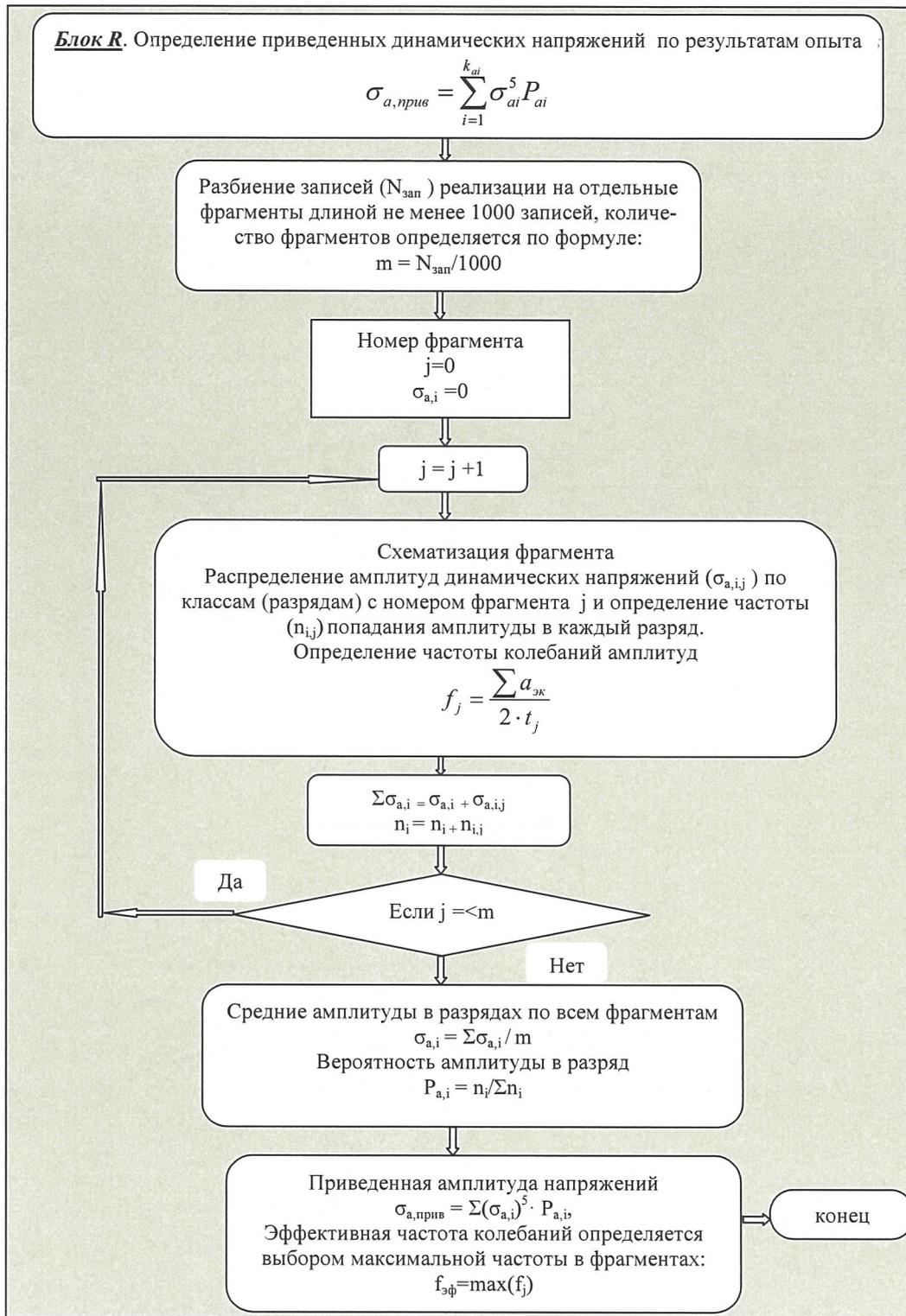


Рис. 11. Вычислительный процесс определения приведенной амплитуды

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Вместе с тем следует отметить, что гипотеза линейного накопления повреждений не описывает влияния очередности воздействия напряжений различных уровней и предполагает одинаковую скорость накопления повреждений при нагружении заданного уровня независимо от предыдущей истории нагружения. Однако экспериментальные данные [11, 12] показывают, что порядок приложения нагрузки на самом деле играет значительную роль, а скорость накопления повреждений при заданном уровне нагружения является функцией истории циклического нагружения. В результате чего использование гипотезы линейного суммирования может привести к завышению долговечности.

В настоящее время нашли практическое применение и другие гипотезы. Все они носят вероятностный характер и имеют равные права на существование [13], а определение усталостной прочности технических устройств по различным имеющимся гипотезам позволит снизить риск ошибки при определении ресурса конкретного изделия.

Выводы. Предложенный алгоритм определения коэффициента запаса прочности грузовых вагонов разработан в виде блочной структуры, которая позволяет повысить степень автоматизации обработки экспериментальных данных. При этом каждый блок реализует отдельный вид нагружения грузового вагона при движении по рельсовому пути – прямые, кривые, стрелочные переводы, в результате уменьшается количество данных, задаваемых при испытаниях. Для каждого блока основными данными являются скорости движения вагона.

Предложенная процедура и алгоритм определения коэффициента запаса прочности грузовых вагонов позволяет повысить качество полученных результатов испытаний и исключить ошибки при обработке данных, связанные с человеческим фактором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
2. ДСТУ ГОСТ 33211-2017. Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014. IDT). [Чинний від 2017-07-11]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 58 с. (Національний стандарт України).
3. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. М.: Стандартинформ, 2016. 41 с. (Межгосударственный стандарт).
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 352 с.
5. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. М.: ГосНИИ вагоностроения, 1995. 101 с.
6. А.О. Сулим, П.О. Хозя, Ю.Я. Водяніков, С.О. Столетов, І.І. Федорак. Алгоритм визначення еквівалентних напружень в рамі вантажного вагона від поздовжніх сил за результатами випробувань на співудар // «Рейковий рухомий склад». Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». 2021. Вип. 22, С. 3-17.
7. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. 48 с.
8. ГОСТ 25.101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 25 с.
9. Сенько В.И., Макеев С.В., Комиссаров В.В. Методические основы определения коэффициента запаса сопротивления усталости при натурных испытаниях подвижного состава. //

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО : Опыт и перспективы развития : сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Е. Г. Зудова (8–9 февраля 2018 г.) : в 2-х т. Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. Т. 1. С. 201-212.

10. А.М. Сафронов, П.А. Хозя, Ю.Я. Водяников, В.С. Речкалов, О.В. Орлов Методы схематизации эксплуатационной нагруженности грузового вагона // «Рейковий рухомий склад». Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». 2021. Вип. 22, С. 53-68.

11. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб. : Политехника, 1993. 391 с.

12. Корнилова А.В. Определение общей долговечности и остаточного ресурса объекта по критерию многоциклового усталости // Безопасность труда в промышленности. 2008. № 1. С. 47–51.

13. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

O.M. Safronov

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute "
33 I. Prikhodka Str, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine.
Tel.: (05366) 6-03-24

A.O. Sulym

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute
33 I. PrikhodkaStr, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine.
Tel.: (05366) 6-03-34

Yu.Ya. Vodiannikov

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute "
33 I. PrikhodkaStr, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine.
Tel.: (05366) 6-13-24

P. A. Hozya

StateEnterprise "UkrainianResearchRailwayCarBuldingInstitute "
33 I. PrikhodkaStr, Kremenchuk, Poltavaregion, 39621, Ukraine.
Tel.: (05366) 6-20-43

V.S. Rechkalov

StateEnterprise "UkrainianResearchRailwayCarBuldingInstitute "
33 I. PrikhodkaStr, Kremenchuk, Poltavaregion, 39621, Ukraine.
Tel.: (05366) 6-13-24

PROCEDURE AND ALGORITHM FOR DETERMINING THE COEFFICIENT OF THE FREIGHT WAGON STABILITY IN COMPLIANCE WITH CURRENT REQUIREMENTS

Improving the reliability of test results is achieved by applying more advanced methods of recording and processing the results. Therefore, an important part of the study of the strength of freight wagons is the choice of methods for obtaining, processing and analyzing experimental data.

The article outlines the procedure and algorithms for determining the equivalent stresses under longitudinal and dynamic loads acting during operation.

It is shown that algorithms for determining stresses generated by dynamic longitudinal and vertical forces are significantly different due to various load application schemes. Thus, the testing of freight wagons under dynamic longitudinal loads is carried out by the impact against an experimental wagon, and testing under dynamic vertical forces is performed during the wagon motion in the composition of the experimental train on the characteristic, pre-selected (planned) sections of the railway track at specified speeds.

To estimate the level of loading of the freight wagon structure under vertical dynamic loads, a method based on the replacement of a real random process is used by some schematized process, which in terms of the fatigue damage accumulation should be equivalent to a real process. From the whole variety of schematic methods, two methods stand out, i.e., the full cycle method and the rainflow method, which most fully represent the real process. The advantage of the rainflow method is the ability to process the process in real time. However, the algorithm of the rainflow method is quite complicated and does not allow processing large amounts of information. In this regard, a method of maximum discharge was proposed, which is a kind of full cycles method and allows you to process an unlimited amount of information online.

An example specified in GOST 25.101 was used for a comparative analysis of the rainflow and maximum discharge methods. Analysis showed a satisfactory matching of both methods.

Based on the procedure outlined, the block structure of the computational process is proposed to determine the equivalent reduced voltage amplitude.

Each block displays the impact of the forces depending on the loading condition, that is, longitudinal impact force and dynamic forces when the wagon is moving on straight track sections, curves and switches of the railway track.

Key words: wagon car, process, dynamic load, longitudinal load, voltage, amplitude, algorithm, equivalent stress, safety margin, strength.

REFERENCES

1. Mahutov N.A. (2008). Prochnost i bezopasnost: fundamentalnyie i prikladnyie issledovaniia [Strength and safety: basic and applied research] Novosibirsk: Nauka [in Russian]
2. Vagony hruzovyye. Trebovaniia k prochnosti i dinamichieskim kachiestvam [Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. (2016). DSTU HOST 33211-2014. Moscow: Standartinform [in Russian]

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

3. Vagony hruzovyye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost i dinamicheskie kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities]. (2016). HOST 33788-2016. Moscow: Standartinform [in Russian]
4. Normy dlia rascheta i proektirovaniia vagonov zheleznyh doroh MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh) [Standards for calculation and design of railway cars of the Ministry of Railways for 1520 mm gauge (non-self-propelled)] (1996). Moscow. GosNIIV-VNIIZhT [in Russian]
5. Vagonyhruzovyye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost i hodovyye kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and ride quality]. (1995). RD 24.050.37-95. Moscow: HosNII vagonostroeniia [in Russian]
6. Sulym A.O., Khozia P.O., Vodiannikov Yu.Ya., Stolietov S.O. & Fedorak I.I. (2021). Alhorytm vyznachennia ekvivalentnyh napruzhen v rami vatazhnoho vahona vid pozdovzhnih syl za rezultatam vyprobuvan na spivudar [Algorithm for determining equivalent stresses in the frame of a freight wagon generated by longitudinal forces based on the results of impact tests]. Reikovy ruhomy sklad - Railbound rolling stock, 22), pp. 3-17). Kremenchuk [in Ukrainian]
7. Soprotivlenie ustalosti. Osnovnyie terminy, opriedieleniia i oboznacheniiia. [Fatigue resistance. Basic terms, definitions and notations]. (1978). HOST 23207—78. Moscow: Hosudarstvennyi komitet SSSR po standartam [in Russian]
8. Metody skhematizatsii sluchainykh protsessov nagruzheniia elimentov mashin i konstruksii i statisticheskoho predstavleniia rezultatov. [Methods of schematization of random loading processes of machines and structures elements and statistical representation of results. HOST 25.101-83 from 12-th of July 1983 [in Russian]
9. Senko V. I., Makieiev S. V. & Komissarov V. V. Metodicheskie osnovy opriedeleniia koeffitsienta zapasa soprotivleniia ustalosti pri naturnykh ispytaniiah podvizhnoho sostava. [Methodical bases for determining the fatigue resistance safety coefficient during field tests of rolling stock]. Homel: ITsZhT «SEKO», BelGUT. (pp. 201-212) [in Russian]
10. Safronov A.M., Hozya P.A., Vodiannikov Yu.Ya., Rechkalov, O.V., & Orlov O.V. (2021). Metody skhematizatsii ekspluatatsionnoi nagruzhenosti hruzovoho vahona. Reikovy ruhomy sklad - Railbound rolling stock (Iss.22), pp. 53-68. Kremenchuk [in Russian].
11. Karzov G.P., Margolin B.Z., & Shvetsova V.A. (1993). Fiziko-miehanichieskoie modelirovanie protsessov razrusheniia [Physico-mechanical modeling of destruction processes]. Saint-Petersburg: Politehnika [in Russian]
12. Kornilova, A.V. (2008). Opriedielenie obschei dolgovechnosti i ostatochnoho resursa obiekta po kriteriiu mnogotsiklovoi ustalosti [Determination of the total durability and residual life of the object by the criterion of multicycle fatigue]. Bezopasnost truda v promyshlennosti - Occupational safety in industry, 1, pp. 47–51 [in Russian]
13. Kohaiev, V.P. (1977). Raschety na prochnost pry napriazheniakh pieriemiennykh vo vremieni [Strength calculations at stresses of variables in time]. Moscow: Mashinostroeniie [in Russian]