

Ж.С. Мусаев<sup>■</sup>, П.Т. Ахметова, А.У. Утепова, М.Ж. Туркебаев, И.А. Аширбаева  
Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Казахстан  
E-mail: m.zhanat@alt.edu.kz

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБКИХ ОБОЛОЧЕК В КАЧЕСТВЕ АМОРТИЗАТОРОВ ПРОДОЛЬНЫХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ВАГОНА

**Аннотация.** В статье изучено одно из перспективных направлений снижения динамических нагрузок в системе вагон-груз за счет применения конструктивных элементов в виде гибких оболочек, изготавливаемых из высокопрочных полимерных и резиноканевых материалов. Приведены результаты исследований продольных ударных нагрузок, действующих на вагон при упругом креплении груза с использованием гибких оболочек и при жестком креплении с помощью распорок.

Рассмотрена возможность применения гибких оболочек в качестве амортизаторов продольных ударных нагрузок вагона, которая показывает их высокую эффективность в обеспечении сохранности вагонов и перевозимых грузов.

Для определения нагруженности гибких резиновых оболочек-амортизаторов при продольных ударных нагрузках грузового вагона авторами предложена программа на основе метода конечных элементов для решения уравнений движения, которая позволяет выполнять контроль степени нагрузки резиновых амортизаторов для повышения работоспособности и обеспечения сохранности перевозимого груза.

**Ключевые слова.** Вагон, груз, ударные нагрузки, резиновый амортизатор, анализ, рекомендации.

### Введение.

Амортизатор (от франц. amortir – ослаблять, смягчать), устройство для смягчения ударов в машинах и сооружениях с целью снижения динамических нагрузок на них и повышения их надёжности. А. устанавливают между телом (деталью, узлом и т. п.), передающим ударную нагрузку, и частью машины, защищаемой от её воздействия.

Обычно амортизатор представляет собой резин-металлический элемент, в котором резина прочно скреплена с металлом при помощи горячей вулканизации или клея. Такое соединение является необходимым условием надежной и долговечной эксплуатации резины, а также увеличивает жесткость амортизатора.

В зависимости от характера деформации и условий работы амортизатора применяют различные способы его расчета. Важной особенностью расчета резиновых рессор является необходимость отдельно рассматривать их статическую и динамическую деформацию. Это связано с тем, что модуль упругости резины при статической нагрузке существенно отличается от модуля упругости при динамической нагрузке. Чтобы определить положение кузова вагона на рессорах в состоянии покоя, необходим расчет статической деформации рессор. При исследовании колебаний вагона на рессорах расчет ведут по динамическим характеристикам резины.

Модуль упругости сдвига  $G$  резины при статической нагрузке в зависимости от ее твердости  $H_p$ , измеряемой в соответствии с ГОСТом 263 – 53 можно определить по следующей эмпирической зависимости (для  $H_p=50\div 80$ ):

$$G = \frac{H_p^2}{3800} \text{ Мн / м}^2. \quad (1)$$

Модуль упругости сжатия  $E_{сж}$  зависит не только от материала (твердости резины), но и от формы амортизатора. Экспериментально было установлено, что резиновые пластины, имеющие одинаковые отношения площади нагружения  $F$  к площади выпучивания  $F_b$  и равные напряжения сжатия, деформируются на одинаковую долю своей толщины. В связи с этим для оценки влияния формы на упругие свойства введено понятие коэффициента формы:

$$\kappa_{\phi} = \frac{F}{F_{\epsilon}} \quad (2)$$

Например, для цилиндрического резинового амортизатора диаметром  $D$  и высотой  $h$  коэффициент формы:

$$\kappa_{\phi} = \frac{\pi D^2}{4\pi D h} = \frac{D}{4h}.$$

Для малых деформаций  $f$  (рисунок 1), не превышающих 10% общей высоты  $h$  резиновых элементов  $\left(\epsilon = \frac{f}{h} = 0,1\right)$ , можно принять линейную зависимость между напряжением и относительной деформацией (закон Гука).

Для деформации  $\epsilon = 0,2 \div 0,3$  целесообразно применять «исправленный» закон Гука.

$$\sigma = \epsilon E - \frac{f}{h-f} E_{см}. \quad (3)$$

Напряжение сжатия амортизатора

$$\sigma = \frac{P}{F}. \quad (4)$$

После подставления и преобразований, получим:

$$P = \frac{f F E_{сж}}{h-f}. \quad (5)$$

Жесткость резинового амортизатора сжатия при малых деформациях ( $\epsilon < 0,2$ )

$$c = \frac{P}{f} = \frac{F E_{сж}}{h-f}. \quad (6)$$

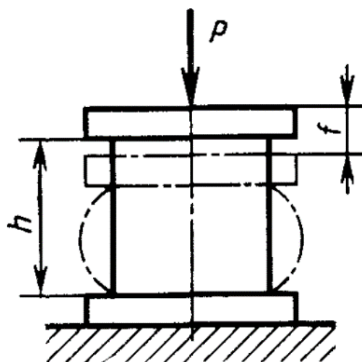
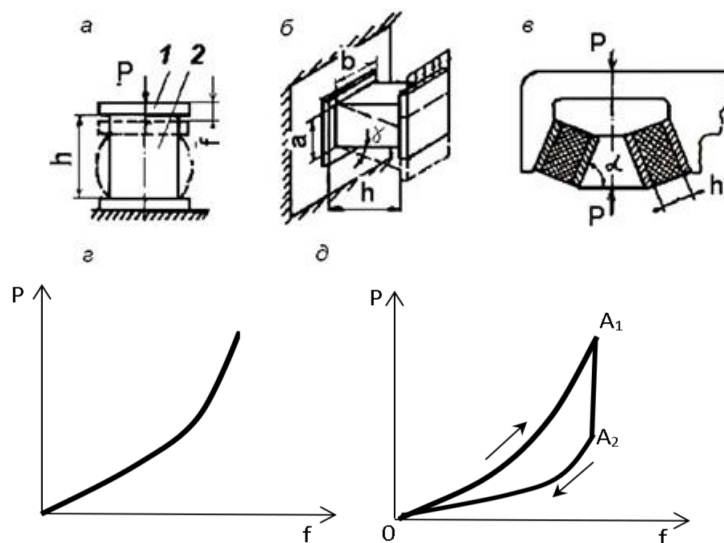


Рисунок 1 – Амортизатор сжатия



*a* – рессора, работающая на сжатие; *б* – работающая на сдвиг;  
*в* – работающая на сжатие и сдвиг; *г*, *д* – силовые характеристики;  
*1* – армировочная пластина; *2* – резиновый элемент.

Рисунок 2 – Резиновые рессоры и их силовые характеристики

Не менее важный интерес представляет применение гибких оболочечных элементов для амортизации продольных ударных нагрузок вагона.

Современные условия эксплуатации грузового подвижного состава характеризуются увеличением массы поездов и статической нагрузки вагонов, повышением скоростей движения поездов и скоростей соударения вагонов в ходе маневровых соударений. Динамическая нагруженность вагонов и сохранность перевозимых грузов во многом определяются их инерционными, жесткостными и деформирующими параметрами.

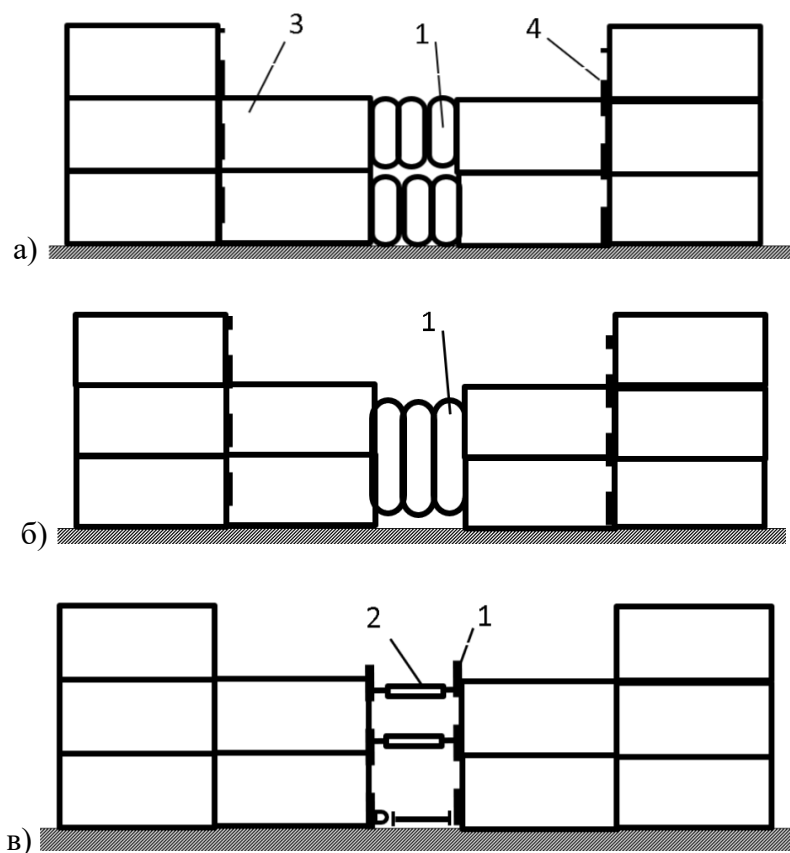
### Материалы и методы.

Одним из перспективных направлений снижения динамических нагрузок в системе вагон-груз является применение конструктивных элементов в виде гибких оболочек, изготавливаемых из высокопрочных полимерных и резинотканевых материалов. Вопросы использования гибких оболочек в конструкциях вагонов рассмотрены в работах [1,2,3]. Согласно классификации [2] все многообразие оболочечных конструкций сведено к трем обобщенным схемам: несущие и герметизирующие гибкие элементы. Однако определение эффективности применения несущих гибких оболочек в качестве амортизирующих устройств при продольных ударных нагрузках на вагоны исследовано недостаточно [4-5].

В настоящей работе приводятся основные результаты ударных испытаний крытого вагона, основной целью испытаний являлась сравнительная оценка работоспособности крепления пакетированного груза в зоне междверного пространства вагона с помощью гибких пневмооболочек и жестких распорок. Пакеты груза устанавливались в вагоне в три яруса. Схема установки гибких элементов показана на рисунке 3, *а* и *б*. При жестком креплении груза пневмооболочки заменялись распорками (рисунок 3, *в*).

В испытаниях использовался цельнометаллический крытый вагон с уширенным дверным проемом, грузоподъемностью 68,2 т, тарой 24,5 т и объемом кузова 122 м<sup>3</sup>, построенный Алтайским вагоностроительным заводом. Вагон загружался пакетами

натурального каучука массой 1080 кг и габаритными размерами 1,38x1,05x0,87 м. С помощью локомотива вагон разгонялся до заданной скорости и ударялся в сцеп из четырех полувагонов, загруженных гравием до 60 т.



а,б - крепление груза гибкими пневмооболочками; в - крепление груза жесткими распорными элементами: 1 - пневмооболочка; 2 - жесткая распорка; 3 - пакет груза; 4 - деревянные элементы крепления груза.

Рисунок 3 – Схемы крепления пакетированного груза в крытом вагоне

Соударения выполнялись со скоростями от 3 до 10,5 км/ч. В ходе испытаний регистрировались внутреннее давление и деформации пневмо-оболочек, усилия в контакте груз-вагон (торцевая стенка), продольные перемещения и ускорения пакетов. Кроме того, в схемах крепления пакетов жесткими распорками измерялись возникающие в них продольные усилия.

С целью выявления физической картины процессов нагружения пакетов, элементов крепления и торцевой стенки вагона датчики группировались по одной стороне штабеля пакетов.

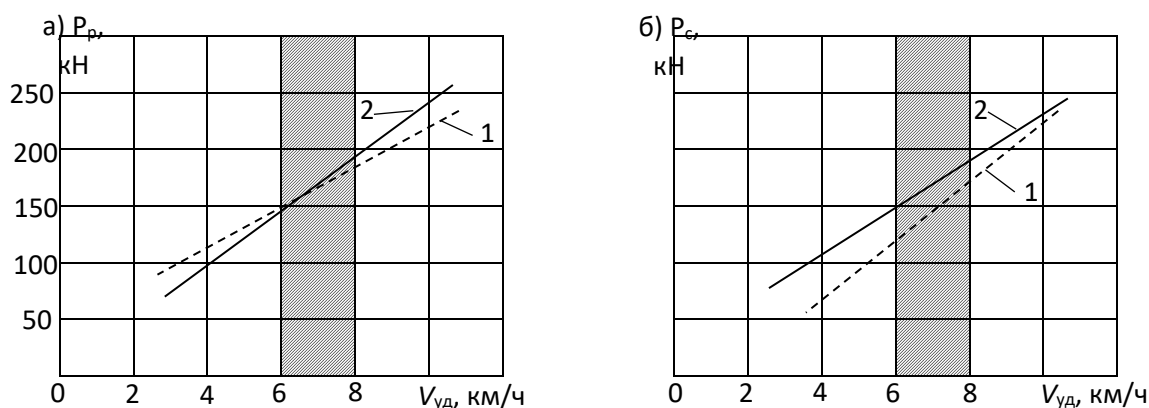
Для регистрации внутреннего давления воздуха в гибких пневмо-оболочках применялись датчики давления ДД-6С, которые монтировались на переходной втулке запорного клапана оболочек. Переход от величины избыточного давления к нагрузке, действующей на гибкий элемент, осуществлялся на основе использования его силовой характеристики, полученной на силовом прессе. Деформации сжатия гибких оболочек регистрировались датчиками-прогибомерами. Нагрузки на торцевую стенку и усилия в распорках регистрировались с помощью месдоз в виде металлических стаканов с наклеенными на них тензорезисторами. После проведения серии ударных испытаний были обнаружены следующие основные преимущества использования гибких оболочек:

- нагрузки в контакте гибкий «элемент-груз» распределяются более равномерно за счет увеличения площади контакта, что положительно влияет на сохранность перевозимого груза;
- смещения груза и время, в течение которого они происходят, увеличиваются. Это способствует уменьшению инерционных нагрузок, действующих в исследуемой системе «вагон-груз», и увеличивает энергию, которая рассеивается за счет трения в контакте груз-вагон;
- остаточные смещения груза минимальные или отрицательные, то есть восстанавливаются зазоры между отдельными пакетами после удара, что способствует снижению суммарной нагрузки на торцевую стенку вагона. Кроме того, снижается опасность завала груза в торцевой части вагона при обратном ударе;
- повышается устойчивость отдельных единиц груза вследствие раздвигающего эффекта при подаче воздуха в гибкую емкость.

### Результаты и обсуждение.

Из анализа уровней нагруженности вагона следует, что при упругом креплении с использованием гибких оболочек нагрузка на торцевую стенку на уровне 1-го яруса пакетов уменьшилась в 1,3...1,5 раза. По остальным ярусам это снижение незначительно. Суммарная нагрузка на торцевую стенку при упругом креплении и скоростях соударений 4-9 км/ч меньше, чем при жестком распорном креплении. Причем с увеличением скорости соударения это расхождение уменьшалось (рисунок 2). При скорости соударения 7-8 км/ч уровень нагрузки на торцевую стенку вагона примерно на 13-15% меньше, чем при жестком креплении.

Уровень нагруженности гибких элементов при скорости соударения вагонов 7-8 км/ч примерно такой же, как и для жесткого распорного крепления. Однако с увеличением скорости соударения нагрузка на гибкие оболочки снижается (рисунок 4).



а - суммарное усилие в элементах крепления груза; б - суммарное усилие от давления груза на торцевую стенку вагона;

1 - крепление груза пневмооболочками; 2 - крепление груза жесткими распорными элементами.

Рисунок 4 – Графики зависимостей нагруженности элементов крепления груза и торцевой стенки вагона от скорости маневровых соударений вагонов

Далее представлен код программы на Delphi для определения нагруженности гибких резиновых оболочек-амортизаторов при продольных ударных нагрузках грузового вагона

Приведенный ниже код на языке Delphi представляет программу для определения нагруженности гибких резиновых оболочек-амортизаторов при продольных ударных нагрузках грузового вагона. Эта программа использует метод конечных элементов для решения уравнений движения.

```
program AmortizatorAnalyzer;

{$APPTYPE CONSOLE}
uses
  SysUtils;
const
  NumElements = 10; // Количество элементов амортизатора
  NumNodes = NumElements + 1; // Количество узлов амортизатора
  L = 0.5; // Длина амортизатора (в метрах)
  Load = 5000; // Ударная нагрузка (в Ньютонах)
type
  TVector = array [1..NumNodes] of Double; // Вектор значений
var
  K: array [1..NumElements, 1..NumNodes] of Double; // Матрица жесткости
  F: TVector; // Вектор узловых сил
  U: TVector; // Вектор перемещений
  I, J: Integer; // Счетчики
// Функция для заполнения матрицы жесткости
procedure FillStiffnessMatrix;
var
  ElementLength: Double;
begin
  ElementLength := L / NumElements;
  for I := 1 to NumElements do
  begin
    for J := 1 to NumNodes do
    begin
      if (J = I) or (J = I + 1) then
        K[I, J] := K[I, J] + 1 / ElementLength;
      if (J = I) then
        K[I, J] := K[I, J] + 1 / ElementLength;
      if (J = I + 1) then
        K[I, J] := K[I, J] - 1 / ElementLength;
    end;
  end;
end;

// Функция для заполнения вектора узловых сил
procedure FillForceVector;
var
  ElementLoad: Double;
begin
  ElementLoad := Load / NumElements;
  for I := 1 to NumElements do
  begin
    F[I] := F[I] + ElementLoad;
    F[I + 1] := F[I + 1] + ElementLoad;
  end;
end;
// Функция для решения системы уравнений
procedure SolveEquations;
var
```

```
C: Double;
begin
  C := 0;
  for I := 1 to NumElements do
  begin
    C := K[I, I];
    for J := 1 to NumNodes do
    begin
      K[I, J] := K[I, J] / C;
    end;
    F[I] := F[I] / C;
    for J := 1 to NumElements do
    begin
      if J <> I then
      begin
        F[J] := F[J] - K[J, I] * F[I];
        for var K := 1 to NumNodes do
        begin
          K[J, K] := K[J, K] - K[J, I] * K[I, K];
        end;
      end;
    end;
  end;
  for I := 1 to NumNodes do
  begin
    U[I] := F[I];
  end;
end;
// Функция для вывода результатов
procedure PrintResults;
begin
  for I := 1 to NumNodes do
  begin
    WriteLn('Узел ', I, ': перемещение = ', U[I]:0:2);
  end;
end;
begin
  // Инициализация матриц и векторов
  FillChar(K, SizeOf(K), 0);
  FillChar(F, SizeOf(F), 0);
  FillChar(U, SizeOf(U), 0);
  // Заполнение матрицы жесткости
  FillStiffnessMatrix;
  // Заполнение вектора узловых сил
  FillForceVector;
  // Решение системы уравнений
  SolveEquations;
  // Вывод результатов
  PrintResults;
  ReadLn;
end.
```

### Алгоритм предлагаемой программы:

1. Начало программы.
2. Ввод значений:
  - Ввод массы груза в вагоне ( $m$ ).
  - Ввод длины гибких резиновых оболочек-амортизаторов ( $l$ ).
  - Ввод коэффициента жесткости гибких резиновых оболочек ( $k$ ).
3. Расчет суммарной силы, действующей на гибкие резиновые оболочки ( $F$ ):
  - $F = m * 9.81$ .
4. Расчет продольного напряжения в гибких резиновых оболочках ( $\sigma$ ):
  - $\sigma = F / (2 * l)$ .
5. Расчет прогиба гибких резиновых оболочек ( $\delta$ ):
  - $\delta = F / (2 * k * l^2)$ .
6. Вывод значений:
  - Вывод суммарной силы ( $F$ ).
  - Вывод продольного напряжения ( $\sigma$ ).
  - Вывод прогиба ( $\delta$ ).
7. Конец программы.

### Примечания:

- $m$  - масса груза в вагоне в килограммах.
- $l$  - длина гибких резиновых оболочек-амортизаторов в метрах.
- $k$  - коэффициент жесткости гибких резиновых оболочек в Н/м.
- $F$  - суммарная сила, действующая на гибкие резиновые оболочки в ньютонах.
- $\sigma$  - продольное напряжение в гибких резиновых оболочках в паскалях.
- $\delta$  - прогиб гибких резиновых оболочек в метрах.

### Выводы

В заключение можно констатировать, что положительный опыт применения гибких оболочек в качестве амортизаторов продольных ударных нагрузок вагона показывает их высокую эффективность в обеспечении сохранности вагонов и перевозимых грузов.

Предлагаемая программа (на основе метода конечных элементов для решения уравнений движения) для определения нагруженности гибких резиновых оболочек-амортизаторов при продольных ударных нагрузках грузового вагона позволяет выполнять контроль степени нагрузки резиновых амортизаторов для повышения их работоспособности и обеспечения сохранности перевозимого груза.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Modeling of dynamic characteristics of freight car with optimized parameters of wedge-type shock absorber / J. Musayev [et al.] // Journal of Vibroengineering. – 2017. – Vol. 19, No. 2. – P. 1197-1213. – DOI 10.21595/jve.2017.16901. – EDN XMRZVF.

[2] Tartakovskiy, E. Improving the Process of Driving a Locomotive Through the Use of Decision Support Systems / E. Tartakovskiy, O. Gorobchenko, A. Antonovych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5, Iss. 3. P. 4-11.

[3] Suppression of Vertical Vibration in Railway Vehicles by Controlling the Damping Force of Primary and Secondary Suspensions / Y. Sugahara // Quarterly Report of RTRI. 2008. Vol. 49, Iss. 1. P. 7-15.

[4] Eckwert, P. Elastic support elements for rolling stock / P. Eckert, J. Frohn // Railways of the world. – 2005. – № 8. – С. 3. – EDN HSXZFB.



[5] Li, Zhenhua & Wang, Chao. (2022). Suspension Parameters Optimization of Fast Freight Wagon Based on Low Wheel-Rail Dynamic Interactions. Journal of Physics: Conference Series. 2381. 012116. 10.1088/1742-6596/2381/1/012116.

**Жанат Мусаев**, т.ғ.д., доцент, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, m.zhanat@alt.edu.kz

**Пагам Ахметова**, т.ғ.к., доцент, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, p.ahmetova@alt.edu.kz

**Акерке Утепова**, т.ғ.к., ассистент-профессор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, a.utepova@alt.edu.kz

**Мукангали Туркебаев**, т.ғ.к., ассистент-профессор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, t.mukangali@alt.edu.kz

**Ирина Аширбаева**, т.ғ.к., доцент, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, i.ashirbaeva@alt.edu.kz

## ВАГОННЫҢ БОЙЛЫҚ СОҚҚЫ ЖҮКТЕМЕЛЕРІНІҢ АМОРТИЗАТОРЛАРЫ РЕТІНДЕ ИКЕМДІ ҚАБЫҚТАРДЫ ҚОЛДАНУ МӘСЕЛЕСІНЕ

**Аңдатпа.** Мақалада жоғары беріктігі жоғары полимерлі және резеңке мата материалдарынан жасалған икемді қабықтар түріндегі құрылымдық элементтерді қолдану арқылы вагон-жүк жүйесіндегі динамикалық жүктемелерді төмендетудің перспективалық бағыттарының бірі зерттелген. Иілгіш қабықтарды пайдалана отырып, жүкті серпімді бекіту кезінде және тіреуіштердің көмегімен қатты бекіту кезінде вагонға әсер ететін бойлық соққы жүктемелерін зерттеу нәтижелері келтірілген.

Вагонның бойлық соққы жүктемелерінің амортизаторлары ретінде икемді қабықтарды қолдану мүмкіндігі қарастырылған, бұл олардың вагондар мен тасымалданатын жүктердің сақталуын қамтамасыз етудегі жоғары тиімділігін көрсетеді.

Жүк вагонының бойлық соққы жүктемелері кезінде иілгіш резеңке амортизаторлардың жүктемесін анықтау үшін авторлар қозғалыс теңдеулерін шешуге арналған соңғы элементтер әдісіне негізделген бағдарламаны ұсынды, бұл жұмыс қабілеттілігін арттыру және тасымалданатын жүктің сақталуын қамтамасыз ету үшін резеңке амортизаторлардың жүктеме дәрежесін бақылауға мүмкіндік береді.

**Түйінді сөздер.** Вагон, жүк, соққы жүктемелері, резеңке амортизатор, талдау, ұсыныстар

**Janat Musayev**, doctor of technical sciences, docent, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, m.zhanat@alt.edu.kz

**Patam Akhmetova**, candidate of technical sciences, docent, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, p.ahmetova@alt.edu.kz

**Akerke Utepova**, candidate of technical sciences, assistant-professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, a.utepova@alt.edu.kz

**Mukangali Turkebaev**, candidate of technical sciences, docent, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, t.mukangali@alt.edu.kz

**Irina Ashirbaeva**, candidate of technical sciences, docent, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, i.ashirbaeva@alt.edu.kz

---

## ON THE ISSUE OF USING FLEXIBLE SHELLS AS SHOCK ABSORBERS FOR LONGITUDINAL SHOCK LOADS OF A WAGON

**Abstract.** The article examines one of the promising directions for reducing dynamic loads in the wagon-cargo system through the use of structural elements in the form of flexible shells made of high-strength polymer and rubber-woven materials. The results of studies of longitudinal shock loads acting on a wagon with elastic fastening of cargo using flexible shells and with rigid fastening using struts are presented.

The possibility of using flexible shells as shock absorbers for longitudinal shock loads of a wagon is considered, which shows their high efficiency in ensuring the safety of wagons and transported goods.

To determine the load of flexible rubber shock absorber shells under longitudinal shock loads of a freight car, the authors proposed a program based on the finite element method for solving equations of motion, which allows monitoring the degree of load of rubber shock absorbers to improve performance and ensure the safety of the transported cargo.

**Keywords.** Wagon, cargo, shock loads, rubber shock absorber, analysis, recommendations.

\*\*\*\*\*