

**Н.Л. ГУРЖИ, Д.В. КАЗАКОВ**

**НЕЛИНЕЙНЫЙ СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В КОНТРОЛЕ  
ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

В настоящее время Российская трубная отрасль продолжает активно развиваться и наращивать производство трубной продукции, что обусловлено стабильным экономическим ростом, развитием нефтехимической промышленности, прокладкой новых и модернизацией существующих газопроводов. По оценкам экспертов, рост объемов производства в нынешнем году составит не менее 3...4%. Создание специализированного подвижного состава для перевозки труб с улучшенными технико-экономическими характеристиками является важной и актуальной задачей, стоящей перед вагоностроительными предприятиями. В статье представлены результаты сопоставления методов исследования параметров надежности узла заделки боковой стойки, являющейся одним из наиболее ответственных узлов вагона-платформы для перевозки труб.

**Ключевые слова:** вагон-платформа, расчет, нелинейный динамический анализ, переходные процессы, метод конечных элементов.

Наибольшая экономическая выгода достигается при перевозке труб специализированным подвижным составом. Такие вагоны-платформы оборудованы специальными системами крепления труб и имеют погрузочную длину более 24 м. Кроме того, специализированные вагоны-платформы, предназначенные для перевозки труб, имеют торцевые щиты, которые препятствуют продольному смещению труб при роспуске с горок и сверхнормативных продольных нагрузках, возникающих в эксплуатации [1].

Одним из узлов вагона-платформы для перевозки труб, который существенно влияет на надежность вагона в целом, является узел заделки стойки. Выход из строя данного узла может привести к серьезным авариям, влекущим за собой значительный материальный ущерб и даже человеческие жертвы.

Нормативным документом [2] регламентировано требование: боковые стенки кузовов вагонов, предназначенных для перевозки труб, бревен и других скатывающихся материалов, следует производить с учетом давления распора, определенного по формуле, применяющейся для расчета распорной нагрузки от сыпучего груза. Такой подход, который не учитывает особенности конкретной схемы загрузки, дает некорректный результат. В документах [3,4] приведены расчетные формулы для определения инерционных и ветровых нагрузок, но отсутствует методика определения распорной нагрузки от труб. Самый новый из нормативных документов [5] требует учитывать самоуравновешенную нагрузку от раскатки труб, но конкретные рекомендации по данному вопросу

отсутствуют, что дает возможность достаточно квалифицированным исследователям выбрать наиболее корректный подход.

Проведем сравнительный анализ нагруженности боковой стойки в соответствии с [2, 5], а также с применением нелинейного динамического анализа. На рис. 1 приведена расчетная схема.

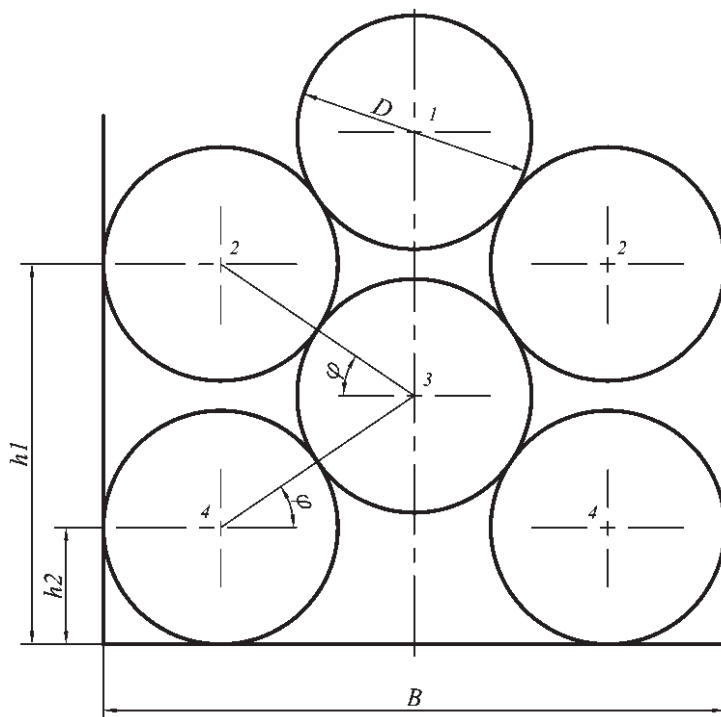


Рис. 1. Расчетная схема загрузки трубами диаметром 1067 мм

Проведем аналитический расчет усилий, действующих на стойки. В соответствии с «Нормами...» [2], расчет боковых стенок кузовов вагонов, предназначенных для перевозки труб, бревен и других скатывающихся материалов, производится с учетом давления распора, определяемого по формуле

$$P = (1 + K_{дв}) \gamma \cdot g \cdot y \cdot tg^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

где  $K_{дв}$  – коэффициент вертикальной динамики;  $\gamma$  – условная плотность груза, равная отношению массы груза к его объему,  $кз/м^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ ,  $y$  – расстояние от поверхности груза до точки, в которой определяется давление, в данном случае поверхностью груза будем считать точку касания верхней трубы и стойки, мм;  $\varphi$  – угол естественного откоса, при перевозке труб принимается  $\varphi = 0$ .

Условная плотность определяется по формуле

$$\gamma = \frac{m_T \cdot n_T}{B \cdot L \cdot h}, \quad (2)$$

где  $m_T$  – масса одной трубы, индекс «Т» от слова труба,  $m$ ;  $n_T$  – количество труб на платформе;  $h$  – вертикальное расстояние от поперечных балок, на которых лежат трубы до высоты погрузки, мм;  $B$  – внутренняя ширина платформы между стойками, мм;  $L$  – суммарная длина труб на платформе, мм.

Таким образом, с учетом (2) формула распределения давления по высоте боковой стены будет иметь вид

$$P = \left(1 + K_{\text{дв}}\right) \frac{m_T \cdot n_T}{B \cdot L \cdot h} \cdot g \cdot y. \quad (3)$$

Преобразовав давление, действующее на боковую стенку, к распределенной нагрузке, действующей на одну боковую стойку, получим

$$q_L = \left(1 + K_{\text{дв}}\right) \frac{m_T \cdot n_T}{B \cdot h \cdot n_{\text{ст}}} \cdot g \cdot y, \quad (4)$$

где  $n_{\text{ст}}$  – количество стоек на один штабель труб.

Градиент этой нагрузки является величиной постоянной и определяется формулой

$$dq = \left(1 + K_{\text{дв}}\right) \frac{m_T \cdot n_T}{B \cdot h \cdot n_{\text{ст}}} \cdot g. \quad (5)$$

В итоге изгибающий момент, приложенный к стойке, определяется по кубическому закону

$$M(y) = dq \frac{y^3}{6}. \quad (6)$$

Эпюра изгибающих моментов, вычисленная по формуле (6), приведена в левой части на рис.2.

Расчетные формулы и поясняющие рисунки приведены в таблице.

Таблица

Расчетные формулы определения реакции

№ трубы	Расчетная схема	Уравнения равновесия	Неизвестные реакции
1		$\Sigma R_y = 2R_{21}\sin\varphi - G = 0$	$R_{21} = \frac{G}{2\sin\varphi}$
2		$\Sigma R_x = R_{s1} - 2R_{12}\cos\varphi - R_{32}\cos\varphi = 0,$ $\Sigma R_y = -R_{12}\sin\varphi + R_{32}\sin\varphi - G = 0$	$R_{s1} = \frac{2G}{\operatorname{tg}\varphi}$ $R_{32} = \frac{3G}{2\sin\varphi}$
3		$\Sigma R_y = -2R_{23}\sin\varphi - G + 2R_{43}\sin\varphi = 0$	$R_{43} = \frac{2G}{\sin\varphi}$
4		$\Sigma R_x = R_{s2} - 2R_{34}\cos\varphi = 0$ $\Sigma R_y = R_b - R_{34}\sin\varphi - G = 0$	$R_{s2} = \frac{2G}{\operatorname{tg}\varphi}$ $R_b = 3G$
—	Изгибающий момент в основании стойки	$M = R_{s1} \cdot h_1 + R_{s2} \cdot h_2$	

Изгибающий момент, действующий на стойку от распора труб при рассматриваемой схеме загрузки, равен

$$M(y) = R_{s1}y + R_{s2}(y - (h_1 - h_2)) \Big|_{y>h_1-h_2} \quad (7)$$

На рис. 2 приведены эпюры изгибающих моментов от распорной нагрузки, определенной по «Нормам...» [2], и нагрузок, возникающих от раскатки труб. Из эпюр на рис. 2 видно, что изгибающий момент в основании стойки от распора труб в 4,6 раза больше, чем определенный по «Нормам...». Таким образом, можно сделать однозначный вывод, что методика, изложенная в «Нормах...», даже без учета других видов поперечных нагрузок для некоторых схем загрузки трубами большого диаметра, дает заниженную нагрузку.

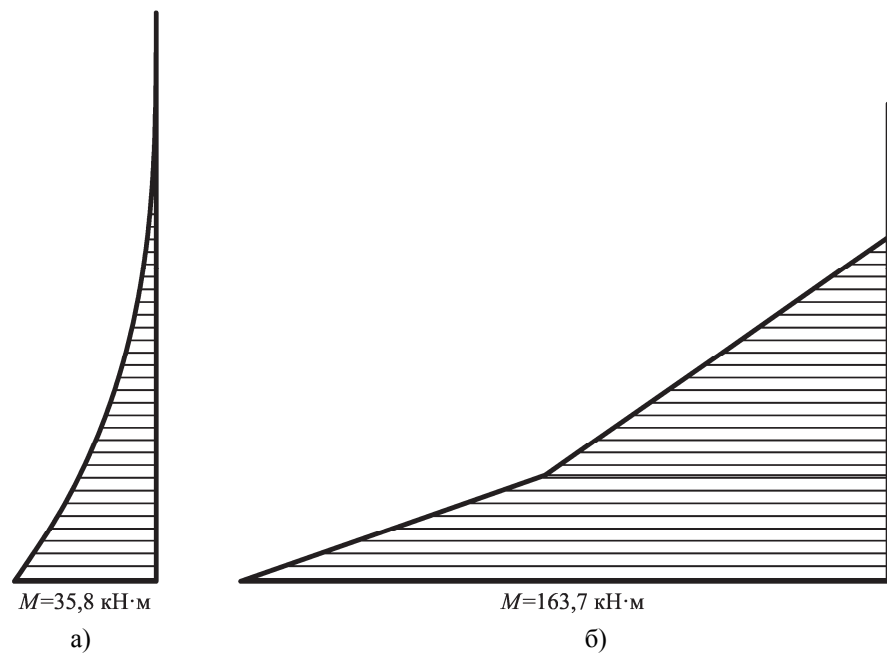


Рис. 2. Эпюры изгибающих моментов по «Нормам...» (а) и от распора труб (б)

Следует заметить, что в приведенных расчетах не учитываются силы трения покоя, возникающие как между трубами, так и между трубами и стойками. Очевидно, что эти силы уменьшают распорную нагрузку, но определить их значение аналитическими методами не представляется возможным.

Рассматривать данную задачу наиболее рационально с применением метода конечных элементов (МКЭ) на упрощенной модели, представленной на рис.3.

Несмотря на кажущуюся простоту, решение данной задачи в линейной статической постановке приводит к возникновению больших коэффициентов в непозитивно-определенной матрице, что соответствует модели с недостаточно заданными граничными условиями. Таким образом, появляется необходимость применения нелинейного анализа.

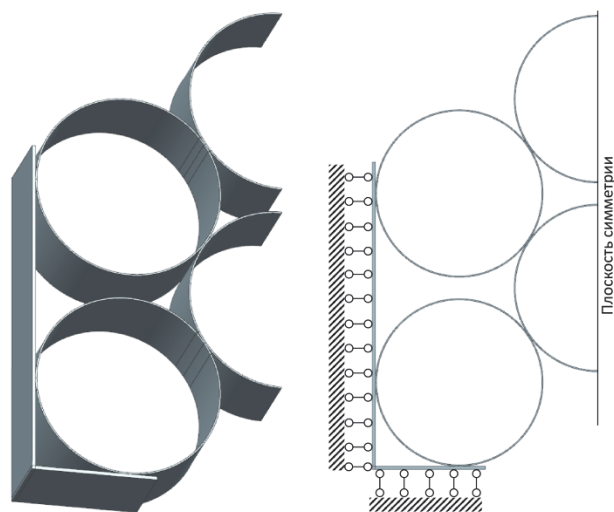


Рис. 3. Упрощенная модель конечных элементов

Нелинейный анализ позволяет учесть как физическую нелинейность материала, так и геометрическую нелинейность, при которой нагрузки, граничные условия и условия контактного взаимодействия меняются в зависимости от перемещений в расчетной модели [6].

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что наиболее корректные результаты будут получены на полной модели вагона с использованием метода нелинейного анализа, который позволит контролировать нагруженность стоек грузового вагона с учетом таких факторов, как большие перемещения, коэффициенты трения, податливость стоек и рамы вагона.

Так как трубы имеют относительно низкую изгибную жесткость, влияющую на коэффициент вертикальной динамики, то для более углубленного изучения вопроса в дальнейшем планируется проведение динамических расчетов, учитывающих воздействие от неровностей пути, а также проведение экспериментальных исследований для проверки корректности полученных данных [7].

Полученные результаты могут быть полезны для совершенствования способов диагностики и периодичности технического обслуживания объектов машиностроения [8, 9].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение RU 2473437 С2, ВАГОН-ПЛАТФОРМА /В.М. Бубнов, Е.К.Тусиков, В.С. Маринюк, А.И. Тисенко, В.И. Анисимов, А.В. Бурков, А.А. Никитченко, Н.Л. Андрищенко. 27.01.2013. - Заявка № 2008118234/11 от 07.05. 2008.

2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ, ВНИИЖТ. - 1996.
3. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах № ЦМ-943. Приложение 14 к СМГС.
4. Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах.
5. ГОСТ 33211-2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.
6. **Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Spitsov D.** Application of Nonlinear Dynamic Analysis in Calculation of Characteristics of Frictional Draft Gears / In: Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich (Eds) //VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing - Springer, Cham, 2020. –Vol. 1115. January 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_95)
7. **Бубнов В.М., Мямлин С.В., Гуржи Н.Л.** Экспериментальные исследования шарнирно соединенного вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров модели 13-1839 //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. - 2009. - № 28. - С. 12-16.
8. Патент на изобретение RU 2266527 С1. Способ определения мощности двигателя внутреннего сгорания / **Н.В. Щетинин, А.Г. Арженовский, Д.О. Мальцев, Д.В. Казаков, А.А. Морозов.** 20.12.2005. Заявка № 2004122376/28 от 21.07.2004.
9. **Казаков Д.В., Куцева Е.Н., Кугрышева Л.И.** Метод контроля технического состояния мобильных энергетических средств, работающих на альтернативных видах топлива // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2015. - № 8 (101). - С. 30-32.

## Ն.Լ. ԳՈՒՐԺԻ, Դ.Վ. ԿԱԶԱԿՈՎ

### ԲԵՌՆԱՏԱՐ ՎԱԳՈՆԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՍՏՈՒԳՄԱՆ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՍՏԱՏԻՎԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Ներկայումս Ռուսաստանյան խողովակային ոլորտը շարունակում է ակտիվ զարգանալ և ավելացնել խողովակային արտադրանքի արտադրությունը, որը պայմանավորված է կայուն տնտեսական աճով, նավթաքիմիական արդյունաբերության զարգացմամբ, նոր խողովակաշարերի տեղակայումով և գործողների արդիականացմամբ: Փորձագետների գնահատմամբ արտադրության ծավալների աճը 2022 թ. կազմել է 3...4 %:

Վազոնաշինական ձեռնարկությունների առջև խնդիր է դրված խողովակների փոխադրման լավացված տեխնիկատնտեսական բնութագրերով մասնագիտացված շարժակազմի ստեղծումը, որը հանդիսանում է հրատապ և կարևոր խնդիր: Ներկայացված են խողովակների տեղափոխման վազոն-հարթակի առավել պատասխանատու հանգույցի կողային պատի կնիքի հանգույցի՝ հուսալիության պարամետրերի հետազոտման մեթոդների համեմատման արդյունքները:

**Առանցքային բառեր.** վազոն-հարթակ, հաշվարկ, ոչ գծային դինամիկական վերլուծություն, անցումային գործընթացներ, վերջավոր տարրերի մեթոդ:

N.L. GURJI, D.V. KAZAKOV

**NONLINEAR STATIC ANALYSIS IN CONTROL OF THE RELIABILITY  
PARAMETERS OF A FREIGHT CAR**

At present, the Russian pipe industry continues to actively develop and increase the production of pipe products, which is due to stable economic growth, the development of the petrochemical industry, the laying of new and modernization of existing gas pipelines. According to experts, the growth in production this year will be at least 3...4%.

The creation of a specialized rolling stock for the transportation of pipes with improved technical and economic characteristics is an important and urgent task facing the car building enterprises. The article presents the results of a comparison of methods for studying the reliability parameters of the side post embedding unit, which is one of the most critical units of a flat car for pipe transportation.

**Keywords:** platform car, calculation, nonlinear dynamic analysis, transient processes, finite element method.

ՀՏԴ 629.33.008.6:681.518

**Ռ.Մ. ՅՈՒԼՉՅԱՆ, Գ.Վ. ԳՈՒԼԱԿՅԱՆ**

**ԱՎՏՈՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ ՈՒՂԻՆԵՐԻ ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՎԻՃԱԿԻ  
ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԵՎ ՎԵՐԱՀՍԿՈՒՄԸ ՏԵՂԵԿԱՏՎԱԿԱՆ ՑԱՆՑԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Ավտոտրանսպորտային ուղիների շահագործման արդյունավետությունը մեծապես կախված է արատորոշման միջոցներից և վերստուգող չափագրումների մեթոդներից, ինչպես նաև կիրառվող տեխնոլոգիական լուծումներից: Առավել կարևոր են ավտոտրանսպորտային ուղիների դինամիկ, իրական ժամանակում կատարվող հսկողությունը, դրանց համակարգումը և ստացված տեղեկատվության արագ մշակումն ու արձագանքող համապատասխան գործողությունները: Արդի ռադիոէլեկտրոնային միկրոկոնտրոլերային տարրերի հենքով մշակվել է ավտոճանապարհների տեխնիկական վիճակի մասին տեղեկատվության ռադիոալիքային հաղորդման ու հրահանգների ստացման ցանցային համակարգ, որն ապահովում է անհրաժեշտ տեղեկատվության հաղորդման բարձր արագություն, կառավարման ճկունություն, չափումների բարձր նույնականացում և ստացված աղյուսների արխիվացում: Հիմք է ստեղծվում թվային խելացի ճանապարհների կառուցվածքների ստեղծման համար: Նախատեսվում է web-հավելվածի պատրաստում, որի միջոցով շարժական ինտերնետով հնարավորություն կստեղծվի՝ տեղում կատարելու անհրաժեշտ բոլոր ծրագրային շտկումները, վերադասավորումներն ու, կարգավորումները:

**Առանցքային բառեր.** ավտոտրանսպորտ, ուղի, ճանապարհ, տեխնիկական վիճակ, վերահսկում, տեղեկատվական ցանց:

Վերջին 20 տարում տրանսպորտային տեխնիկայի զարգացման տեմպերը ավելի են պայամանավորվում լոգիստիկ յուրահատուկ լուծումներով և տրանսպորտային ցանցերի առավել արդյունավետ շահագործմամբ: Ակնհայտ է, որ