

УСТОЙЧИВОСТЬ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ ТРАКТОРНЫХ ПОЛУПРИЦЕПОВ ПРИ РАЗГРУЗКЕ

Georgij Tajanowskij*, Wojciech Tanaś**

*Białoruska Akademia Politechniczna, Mińsk,

**Akademia Rolnicza w Lublinie

Аннотация. В статье в контексте реализации принципов системного проектирования тракторных прицепов приведен порядок анализа устойчивости большегрузных тракторных прицепов при разгрузке, который необходимо выполнять при проектном обосновании параметров прицепов. Приведены аналитические выражения для оценки боковой устойчивости большегрузных тракторных полуприцепов новых конструктивных концепций на стадии их предпроектных исследований и выбора проектных параметров.

Ключевые слова: тракторные поезда, большегрузные полуприцепы, устойчивость при разгрузке, процедуры функционального проектирования.

ВВЕДЕНИЕ

При создании тракторных прицепов новых конструктивных концепций стадия проектирования имеет решающее значение в осуществлении замысла и достижении высокого технического уровня объекта. Тракторный прицеп является подсистемой тракторного поезда, выделяемой в процессе декомпозиции его структуры, как целостного объекта, на отдельные элементы.

Современная методология проектирования тракторных прицепов базируется на системном подходе, при котором он рассматривается как сложная система, состоящая из взаимосвязанных, целенаправленно функционирующих элементов и находящаяся во взаимодействии с трактором и с окружающей внешней средой. Это позволяет учесть все факторы, влияющие на его функционирование, и обеспечить создание технического объекта с высокими показателями эффективности и качества путем оптимизации всех его внутренних и внешних связей в рамках уровней системной иерархии.

Одним из важнейших эксплуатационных свойств тракторного прицепа является его устойчивость при осуществлении разгрузки. Создание ведущими мировыми прицепостроительными фирмами, такими как BRANTNER, ОЗТП, REISCH, KAWECO, KROGER, WELGER, БОБРУЙСКАГРОМАШ и другими

новых большегрузных тракторных прицепов сельскохозяйственного назначения, способных надежно работать в широком спектре условий эксплуатации и реализующих новые конструктивные принципы ходовой системы и подвески, системы разгрузки, системы поворота, системы агрегатирования, саморазгружающихся платформ, привело к существенному изменению их динамики не только при движении, но и при разгрузке. Доминирует подход, при котором базовым прицепом к колесным тракторам чаще выбирается полуприцеп. Последний с увеличением тягового класса трактора оснащается двумя или тремя колесными осями с возможностью поворота крайних колес, ломающимся автоматически управляемым дышлом и однообъемной опрокидываемой набок и/или назад грузовой платформой. Все это вносит специфику и в процесс разгрузки. Поэтому при функциональном проектировании необходимо реалистично рассматривать процесс разгрузки большегрузного тракторного полуприцепа как на ровном жестком основании, что традиционно делается разработчиками прицепов, так и на различных деформируемых, неровных опорных поверхностях, при учете также свойств выгружаемого груза, шин, подвески, взаимного расположения трактора и прицепа.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Конкретизация принципов функционального проектирования тракторных прицепов и изложение разработанной процедурной методики анализа их устойчивости при разгрузке составляет цель данной работы. Такой анализ лежит в основе проектной процедуры выбора параметров большегрузного полуприцепа по показателям устойчивости в рамках реализации системного подхода к созданию тракторных прицепов.

СИСТЕМНОСТЬ В АНАЛИЗЕ СВОЙСТВ ТРАКТОРНЫХ ПРИЦЕПОВ

Сложность и взаимосвязанность процессов тракторного поезда требует их изучения путем математического моделирования. Посредством моделирования осуществляется решение исследовательских, поисковых, проектно-конструкторских и эксплуатационных задач. Так на этапе обоснования, создания и доводки конструкции прицепа моделируют процессы его функционирования для выявления факторов, изменением и воздействием на которые возможно практически добиться требуемого уровня показателей функциональных свойств как подсистем будущего прицепа, так и эксплуатационных свойств прицепа в целом во всех штатных режимах и условиях работы. В период же эксплуатации моделирование осуществляется для определения наиболее эффективных режимов агрегатирования и функционирования, целесообразных областей и условий использования существующих тракторов и прицепов в составе тракторного поезда, в зависимости от цели его транспортного процесса.

Посредством декомпозиции сложную задачу проектирования прицепа сводят к решению более простых задач с учетом взаимосвязей и взаимообусловленностей между ними. Каждая задача решается на основе локальной оптимизации, а декомпозиция критериев при этом осуществляется таким образом, чтобы

локальные цели были подчинены конечной цели проектирования. Это означает, что системный подход выражается и в выделении взаимозависимых и взаимодействующих элементов технического объекта как системы, и в единстве целей их функционирования.

В целом, современная методология системного проектирования тракторных прицепов реализует принципы группового проектирования, декомпозиции, иерархичности, итеративности, локальной оптимизации и комплексного осуществления процесса проектирования, включающего функциональный, конструкторский и технологический аспекты. Сам же современный прицеп как целостная сложная подсистема реализует принципы: модульного построения, универсальности ходовой системы, широкой унификации, исключения капитального ремонта, оптимального проектного согласования агрегатирования с трактором-тягачем, наличия потенциала для адаптации к специфике новых сфер применения и к малой модернизации, эксплуатационной надежности, активной безопасности, высокого технического уровня и патентной защищенности, качества изготовления и конкурентоспособности.

При функциональном проектировании осуществляется синтез структуры и определяются основные проектные параметры прицепа и его составных частей, оцениваются показатели эффективности и качества процессов функционирования. Результатом функционального проектирования являются: выбранный оптимальный по принятым критериям вариант проектных параметров прицепа, принципиальные, функциональные, кинематические, алгоритмические схемы и сопровождающие их документы, адекватные оценки, полученные моделированием, эксплуатационных свойств тракторного поезда, оценки конструктивного, силового, энергетического и эксплуатационного согласования агрегатирования прицепа с тягачем.

Функциональное проектирование – итерационный процесс, осуществляется практически на всех стадиях и этапах создания тракторного прицепа и многократно повторяется по мере раскрытия неопределенностей, характерных для начальных этапов, и учета накладываемых условий-ограничений по всему спектру свойств транспортного агрегата, с целью уточнения или проверки принятых проектных решений тракторного прицепа.

БОКОВАЯ РАЗГРУЗКА БОЛЬШЕГРУЗНОГО ПОЛУПРИЦЕПА

Устойчивость тракторных поездов превратилась в актуальную проблему, так как в мире эксплуатируется, по некоторым оценкам, более 25 миллионов тракторов и большинство из них значительную часть своей наработки осуществляют в составе тракторных транспортных поездов. При этом существенная часть аварийных происшествий случается как раз при разгрузке грузовой платформы, причем это в большей степени касается процессов разгрузки большегрузных полуприцепов. Поэтому обеспечение предусмотренных стандартами углов поперечной и продольной статической устойчивости рассматривается и при разгрузке уже на стадии проектирования полуприцепов.

Для самого простого случая боковой разгрузки прицепа с шинами высокого давления, заблокированной подвеской на жестком поперечном склоне расчетная схема приведена на рис.1.

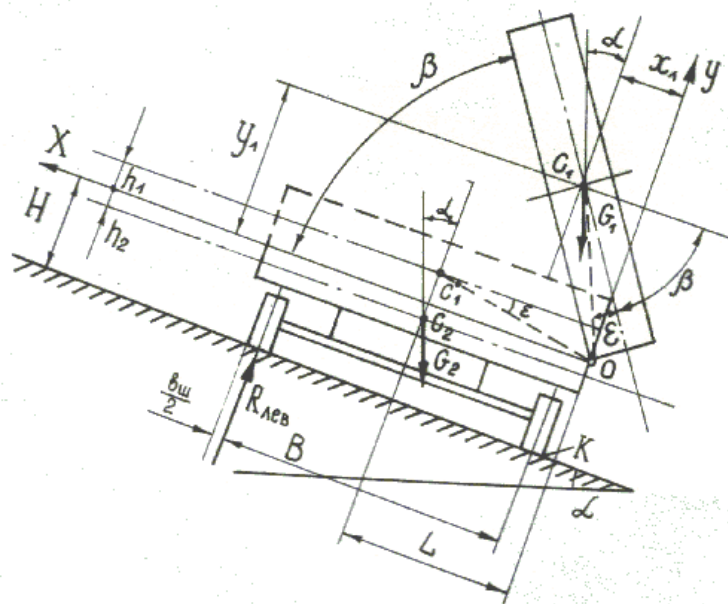


Рис. 1. Боковая разгрузка полуприцепа на склоне

Fig. 1. Side unloading of semi-trailer on slope

Суть обозначенных размеров ясна из рисунка, векторы G_1 , G_2 , $R_{лев}$ соответствуют силам тяжести равномерно распределенного груза с опрокидываемой платформой, остальной части полуприцепа и реакции грунта под левой колесной опорой. Точка К принята в качестве центра опрокидывания разгружаемого полуприцепа. Полуприцеп потеряет боковую устойчивость, если реакция $R_{лев}$ станет равной нулю.

В начальный момент подъема грузовой платформы нагрузка на опорную поверхность передается через оба колеса, тогда из уравнений равновесия в принятой системе координат, при симметричном расположении груза в платформе

$$R_{лев} = \frac{(G_1 + G_2) \cos \alpha}{2} - [G_1(H + h_1) + G_2(H - h_2)] \frac{\sin \alpha}{B} \quad (1)$$

$$x_1^0 = L; \quad y_1^0 = h_1; \quad x_2^0 = L; \quad y_2^0 = h_2; \quad (2)$$

$$\sin \varepsilon = \frac{h_1}{\sqrt{h_1^2 + L^2}}; \quad (3)$$

Наиболее неблагоприятный с позиции боковой устойчивости полуприцепа момент наблюдается в конце подъема платформы с зависшим грузом, например, в случае его примерзания к платформе или схватывания. Для такого случая

$$x_1 = OC_1 \cos(\beta + \varepsilon) = \sqrt{h^2 + L^2} (\cos \beta \cos \varepsilon - \sin \beta \sin \varepsilon) \quad (4)$$

$$y_1 = OC_1 \sin(\beta + \varepsilon) = \sqrt{h^2 + L^2} (\sin \beta \cos \varepsilon + \cos \beta \sin \varepsilon) \quad (5)$$

Из уравнения моментов сил, действующих на полуприцеп, относительно точки К получим

$$R_{лев} = \frac{1}{B + 0.5b_{ш}} \left(G_1(\sin \alpha(H + y_1) - \cos \alpha((B + 0.5b_{ш}) - (L - x_1))) + \right. \quad (6)$$

$$\left. + G_2(\sin \alpha(H + h_2) - \cos \alpha(B + 0.5b_{ш})) \right)$$

С учетом выражений (3–5) уравнение (6) отражает влияние всех существенных факторов на реакцию под левой колесной опорой полуприцепа.

Подставляя числовые значения параметров в уравнение (6) и варьируя углы α и β , получим данные для построения графиков зависимостей $R_{лев} = f(\alpha, \beta)$. Из графиков легко определить границы статической устойчивости разгружаемого полуприцепа.

Согласно действующим стандартам на прицепах и полуприцепах углы наклона поднятой грузовой платформы β по отношению к плоскости рамы должны быть не менее: 50° – при безрессорной подвеске и предусмотренных конструкцией разгрузках на стороны или назад; 45° – при рессорной подвеске (без учета ее хода) и разгрузках на стороны; 50° – при рессорной подвеске (без учета ее хода) и разгрузке назад. Такие требования обусловлены необходимостью самостоятельного полного схода груза.

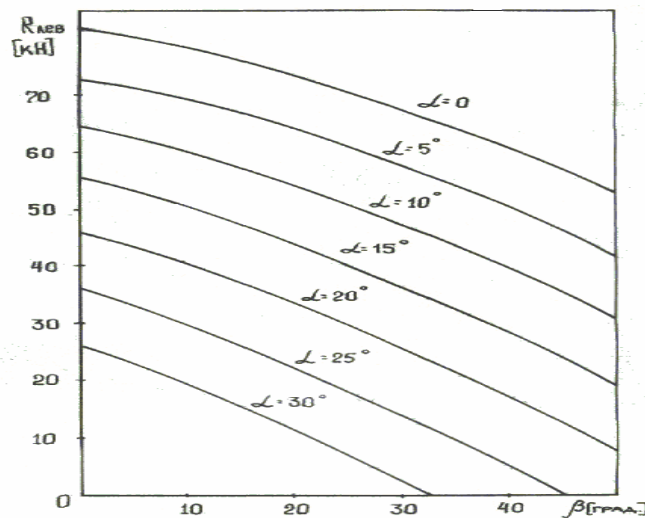


Рис. 2. Зависимость реакции опоры R от углов наклона платформы α и полуприцепа β
Fig. 2. Dependence of support reaction upon the inclination angles of slope α and semitrailer β

Применительно к большегрузному тракторному колесному полуприцепу «Сармат» модели ОЗТП-9554, имеющему грузоподъемность 10 тонн в случае перевозки сахарной свеклы, упомянутые графики представлены на рис. 2.

Из графиков видно, что теоретическая граница боковой устойчивости при боковой разгрузке полуприцепа соответствует углу поперечного склона $\alpha = 27,5^\circ$.

В связи с перераспределением нормальных нагрузок, при рассмотренном варианте разгрузки, правая колесная опора, состоящая из двух колес, оборудованных шинами КФ-97 с номинальной нагрузкой 32,0 кН и допустимой стандартом кратковременной перегрузкой в 30% [Химия, 1980], а также с учетом нагрузки на тяговый крюк трактора в 25 кН, значительно догружается. Поэтому допустимый угол поперечного склона становится существенно меньшим и составляет не более 4,5 градусов.

По условиям бокового сползания на поперечном склоне при разгрузке полуприцепа допустимый угол его не должен превышать значения $\alpha = \arctg \varphi_{\text{сц}}^\circ$, где $\varphi_{\text{сц}}$ – коэффициент бокового сцепления колеса с опорной поверхностью склона. При $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$ угол сползания не превышает 31 градуса, при $\varphi_{\text{сц}} = 0,4$ – 21 градус.

Правилами техники безопасности тракторным прицепами запрещается двигаться поперек склона, угол которого больше 10° [Таяновский 1987].

Из приведенных рассуждений следует, что боковая устойчивость полуприцепа лимитируется, в первую очередь, режимом окончания разгрузки.

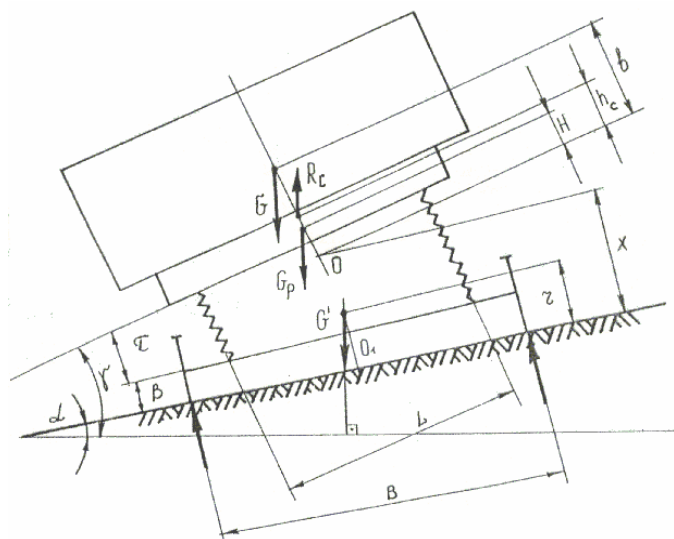


Рис. 3. Положение полуприцепа на поперечном склоне

Fig. 3. Position of semi-trailer on transversal slope

Учет свойств подвески и деформации шин колесной опоры разгружаемого полуприцепа приводит к более сложным уравнениям. Для расчетных схем на рис. 3 и рис.4, на которых показано положение полуприцепа до начала разгрузки и при разгрузке на поперечном склоне, получены следующие выражения.

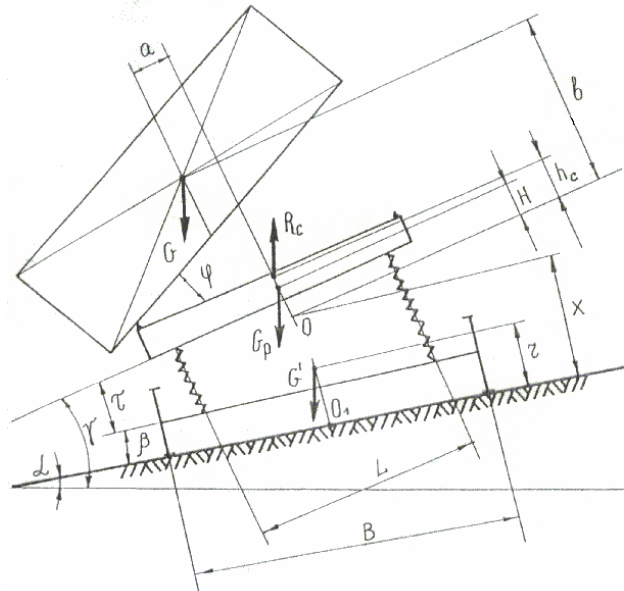


Рис. 4. Расчетная схема разгрузки полуприцепа на поперечном склоне
Fig.4. Scheme of unloading of semi-trailer on transversal slope (for calculations)

Уравнение равновесия кузова прицепа относительно точки O:

$$M_o + (G_p \cdot H - R_c \cdot h_c) \cdot \sin \gamma = A \cdot \tau, \quad (7)$$

где:

$M_o = G(a \cdot \cos \gamma + b \cdot \sin \gamma)$ – опрокидывающий момент от грузовой платформы;

$G_p \cdot H \cdot \sin \gamma$ – момент от рамы;

$R_c \cdot h_c \cdot \sin \gamma$ – момент от реакции в сцепном устройстве;

$A \cdot \tau$ – восстанавливающий момент от подвески;

γ – угол наклона рамы полуприцепа к горизонту;

$A = 0,5 \cdot C_p \cdot L^2$ – угловая жесткость подвески колесной опоры полуприцепа

C_p – жесткость подвески колесной опоры.

Из уравнения (7) найдем угол поворота платформы относительно точки O

$$\tau = (M_o + (G_p \cdot H - R_c \cdot h_c) \cdot \sin \gamma) / A$$

Уравнение равновесия сил, действующих на колесную ось относительно проекции точки O на опорную поверхность

$$A \cdot \tau + M^3 + F \cdot x - 0,5 \cdot B \cdot (R_a - R_b) = 0, \quad (8)$$

где:

$M' = G' \cdot r \cdot \sin(\gamma - \tau)$ – момент от неподрессоренных масс полуприцепа;

$F = (G_p + G - R_c) \cdot \sin(\gamma - \tau)$ – боковая сила воздействия платформы на колесную ось, приложенная в точке О;

R_a, R_b – реакции опорной поверхности на левую и правую колесные опоры (см. рис. 4), причем:

$$R_a + R_b = Q,$$

где:

$Q = (G + G_p + G' - R_c) \cdot \cos(\gamma - \tau)$ – суммарная нагрузка на колесные опоры правого и левого бортов полуприцепа. Тогда:

$$R_b = Q - R_a \quad (9)$$

С учетом выражений (7)-(9) реакция под правой колесной опорой равна

$$R_b = \frac{Q}{2} - \frac{M_o + (G_p \cdot H - R_c \cdot h_c) \cdot \sin \gamma + (G + G_p - R_c) \cdot \sin(\gamma - \tau)}{B} + \frac{G' \cdot r \cdot \sin(\gamma - \tau)}{B} \quad (10)$$

Как уже упоминалось, признак потери боковой устойчивости полуприцепа выражается условием-неравенством $R_b \leq 0$.

Угол наклона колесной оси полуприцепа к опорной поверхности определяется из выражения

$$\beta = \frac{Q}{B \cdot C_{ш}},$$

где:

$C_{ш}$ – радиальная жесткость колесной опоры полуприцепа.

Максимальный теоретический угол поперечного склона, на котором полуприцеп еще будет устойчив, определяется из геометрической связи между углами

$$\gamma = \alpha + \tau + \beta$$

Как показывают выполненные расчеты, кривые $R_b = f(\alpha, \phi)$ идут ниже соответствующих кривых на рис.1. В связи с этим на некоторых зарубежных полуприцепах реализованы патенты на устройства автоматического блокирования подвески и привода опорных ауттриггеров при разгрузке большегрузных полуприцепов.

РАЗГРУЗКА ПОЛУПРИЦЕПА НАЗАД

Установим зависимость величины реакции под верхним по поперечному склону колесом тракторного полуприцепа с задней разгрузкой от величины угла подъема грузовой платформы β и угла поперечного склона α (см. рис. 5).

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай разгрузки, который наблюдается при примерзании или схватывании груза в кузове. Чтобы не усложнять существенно задачу, рассмотрим полуприцеп с балансирной тележкой без рессор, и примем, что колеса не деформируются и боковое опрокидывание происходит вокруг точки O (см. рис. 5).

Искомая зависимость имеет вид

$$R_l = \frac{2}{2 \cdot B + b_w} \cdot \left\{ \left(\frac{B + b_w}{2} - y_n^o \cdot \sin \alpha \right) \cdot G_n + \right. \\ \left. + G_2 \cdot \left[\frac{B + b_w}{2} - [y_2^o \cdot \cos \beta + h_o \cdot (1 - \cos \beta) + z_2^o \cdot \sin \beta] \cdot \operatorname{tg} \alpha \right] \right\}, \quad (11)$$

где:

y_n^o , y_2^o – координаты центров масс, соответственно, прицепа и платформы с грузом перед началом разгрузки;

z_2^o – продольная координата центра масс платформы с грузом перед началом разгрузки полуприцепа.

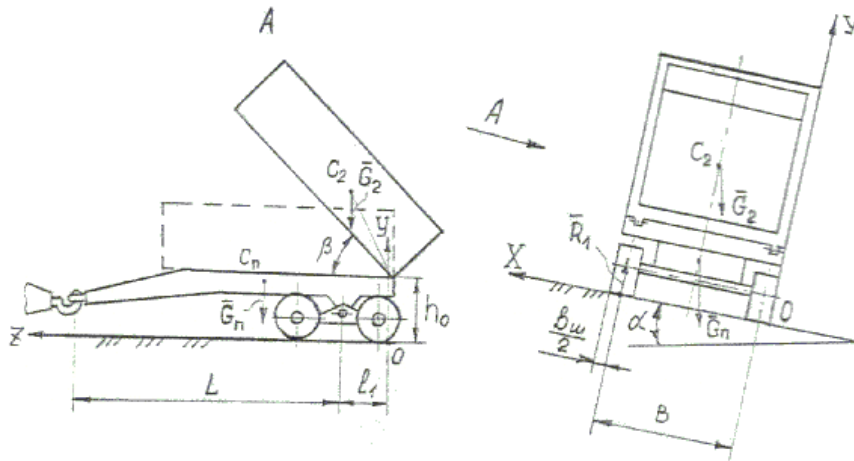


Рис. 5. Разгрузка полуприцепа на поперечном склоне назад

Fig. 5. Backwards unloading of semi-trailer on transversal slope

Признаком нарушения боковой устойчивости является достижение условия $R_l = 0$. При значении $R_l = 0$ из выражения (11), решив его относительно угла α , при максимальном для данной конструкции угле β , получим выражение угла поперечной статической устойчивости по боковому опрокидыванию на склоне. При этом проверяется также и допустимость действия опрокидывающего момента на трактор.

ВЫВОДЫ

Системность в создании тракторных прицепов предполагает рассмотрение всего спектра их свойств и является условием достижения высокого технического уровня разрабатываемых тракторных транспортных агрегатов.

Проектный анализ боковой устойчивости большегрузных полуприцепов новых конструктивных схем по предложенным выражениям позволяет обоснованно выбирать конструктивные параметры схемы полуприцепа и системы его разгрузки, чтобы обеспечить безопасность работы тракторного поезда в режиме разгрузки.

Режим разгрузки ограничивает предельные углы поперечного склона, на котором разгрузка полуприцепа может быть осуществлена, из-за потери боковой устойчивости и перегрузки нижних по склону колесных опор.

ЛИТЕРАТУРА

- Шины для сельскохозяйственных машин: Справочное пособие. М.: Химия, 1980. 128 с.
Таяновский Г.А. 1987: Транспортный агрегат на базе энергонасыщенного универсально-пропашного трактора класса 2. Мн.: БПИ, 22 с.

STABILITY OF SUPERSIZE TRACTOR SEMI-TRAILERS AT UNLOADING

Summary. In the article the principles of system designing of tractor trailers and technique of the analysis of stability supersize tractor semi-trailers at unloading are given.

Key words: Tractor trains, supersize semi-trailers, stability at unloading, principles of system designing

Recenzent: prof. dr hab. Józef Kowalczyk