

Методика определения характеристик общего НДС силовых элементов прицепа

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Метод конечных элементов является мощным и эффективным средством для анализа НДС инженерных конструкций. В силу универсальности и удобства реализации метода на ЭВМ в виде различных программ инженерного анализа (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS и др.) он получил широкое распространение среди инженеров и научных работников при анализе поведения реальных конструкций [1]. Проведение натурных испытаний конструкции при проектировании всегда связано с большими финансовыми затратами и трудоемкостью проведения работ. Поэтому численный эксперимент, отражающий реальное поведение конструкции под действием приложенных нагрузок является эффективным решением на этапе проектирования изделия. Виртуальный эксперимент позволяет моделировать различные расчетные случаи, отражающие реальные условия нагружения, а также анализировать комбинации расчетных случаев. При этом трудоемкость и стоимость работ на этапе разработки изделия значительно снижаются. Еще одним преимуществом метода является возможность внесения изменений в конструкцию в соответствии с результатами расчета еще до момента начала изготовления.

Целью данной статьи является разработка методики определения характеристик общего НДС силовых элементов прицепа, которая включает в себя следующие этапы:

1. Разработка конструкции прицепа. Создание мастер-геометрии.
2. Выбор и обоснование расчетной схемы силовых элементов прицепа.
3. Определение расчетных случаев нагружения несущей конструкции и сцепного устройства прицепа.
4. Создание конечно-элементной модели основных силовых элементов прицепа.
5. Выполнение расчета и анализ полученного результата.
6. Разработка рекомендации конструкторам для изменения геометрических параметров силовых элементов прицепа.

Прицеп предназначен для перевозки надувных моторных лодок в составе автопоезда (рис. 1). Несущая конструкция прицепа представляет собой балочную конструкцию, состоящую из силовой Т-образной рамы, платформы с системой опорных роликов и переднего опорного узла с лебедкой.

Габаритные размеры прицепа: 3791 мм×1869 мм×1285 мм.

Масса прицепа – 180 кг. Масса лодки с двигателем – 72 кг.

Тип прицепа – одноосный, не оборудованный тормозной системой.

Конструкция прицепа сборная, основные типы соединений: разъемные (болтовые и с помощью шпилек) и неразъемные (точечная сварка).

Основные силовые элементы прицепа изготовлены из стали 20 ГОСТ 1050-88.

Материал крепежных элементов – сталь 45 ГОСТ 1050-88.

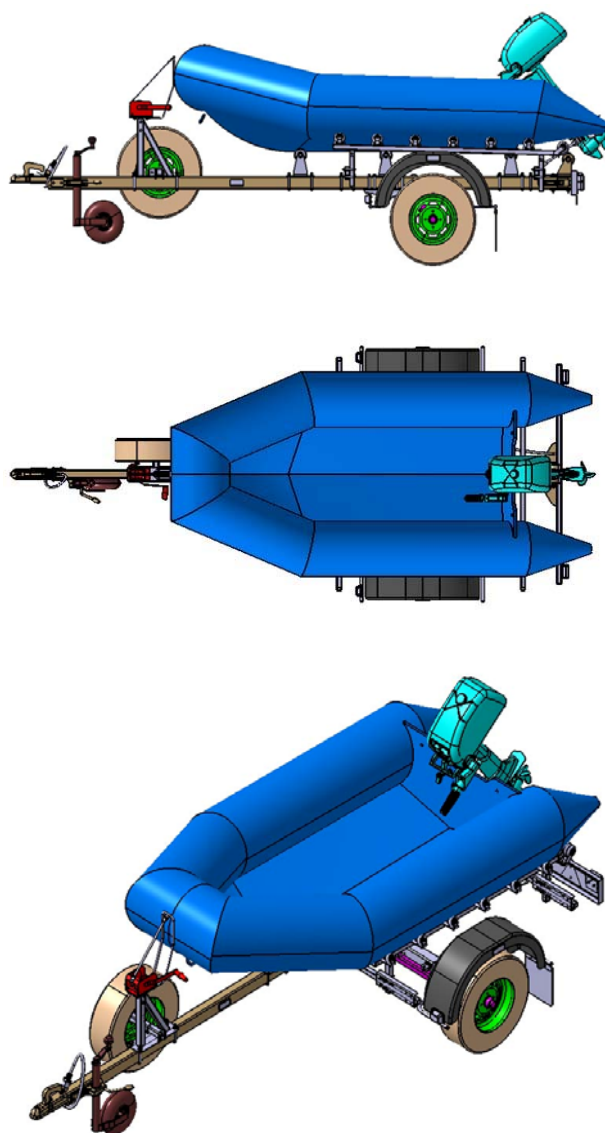


Рис. 1. Общий вид прицепа

Т-образная силовая рама состоит из центральной продольной балки (дышло) с замковым устройством и поперечной балки, соединенной с дышлом через косынку, имеющую ребра жесткости, с помощью четырех П-образных шпилек диаметром 12 мм, изготовленных из стали 45 ГОСТ 1050-88, закаленной до 37,5 ... 45 HRCэ. К поперечной балке крепится ось с колесами с помощью четырех болтов диаметром 12 мм, устанавливаемых в отверстия в кронштейнах навески, приваренных к поперечной балке. На дышле расположены: опорная стойка с носовым колесом, передний опорный узел с лебедкой и запасное колесо. Также на дышле установлены: 4 кронштейна с центральными опорными роликами, кронштейн крепления двигателя и силовые накладные (передняя и задняя), к которым приварены поперечные балки платформы. Кронштейны с опорными роликами крепятся к дышлу с помощью П-образных шпилек диаметром 10 мм.

Платформа с системой опорных роликов представляет собой систему продольных, поперечных балок и стоек квадратного сечения 30×30 мм, изготовленных из листового материала, толщиной 3 мм. На продольных балках расположены 7 кронштейнов с опорными роликами (с каждой стороны).

Лодка размещена на платформе и опирается на ролики, расположенные на боковых продольных балках и дышле, а также на передний опорный узел.

Крепление лодки на прицепе осуществляется в четырех точках с помощью ремней, привязываемых к петлям, приваренным к боковым продольным балкам. Двигатель дополнительно поддерживается тягой, прикрепленной к проушине, приваренной к дышлу.

Расчетный объект (рис. 2) представляет собой пространственную раму, состоящую из набора продольных, поперечных балок и стоек.

Конструкция закреплена в трех точках – по шаровой поверхности сцепного устройства (линейные перемещения по трем направлениям X, Y и Z равны 0) и по опорным площадкам кронштейнов навески оси с колесами (в зависимости от расчетного случая ограничивают перемещения по соответствующим направлениям).

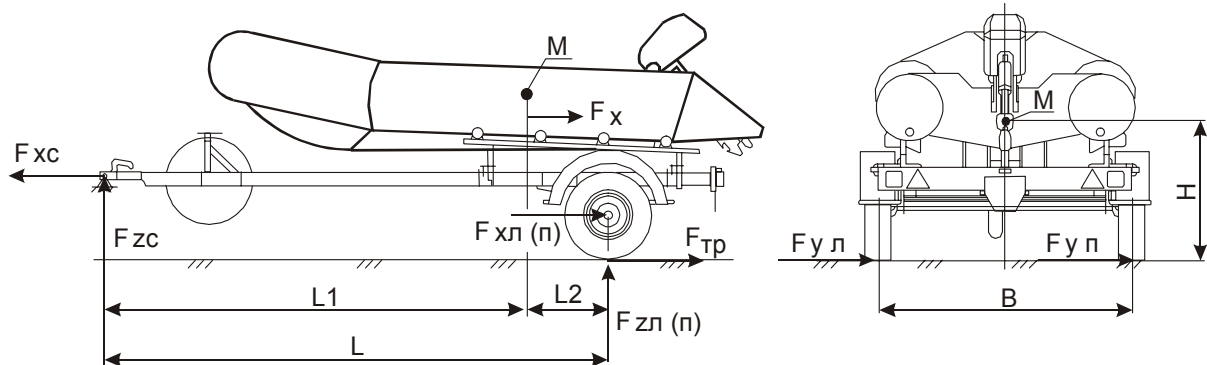


Рис. 2. Расчетная схема

Проанализировав рассчитываемый объект, была выбрана следующая расчетная схема. Несущая конструкция моделируется в виде балок, оболочек и системы сосредоточенных масс. Для моделирования связей между силовыми элементами конструкции используются контактные элементы. Такой подход позволяет получить требуемую детализацию конструкции и качественно оценить перемещения и напряжения в силовых элементах, значительно снизив при этом затраты по созданию конечно-элементной модели и время выполнения расчета.

Для выбранной расчетной схемы несущей конструкции были рассмотрены следующие расчетные случаи.

1. Вертикальные нагрузки

1.1. Вертикальные симметричные нагрузки

Максимальные вертикальные симметричные нагрузки возникают при одновременном наезде на препятствие задней оси автомобиля тягача и оси прицепа, в этом случае на несущую систему прицепа и сцепное устройство действует максимальная вертикальная нагрузка, а горизонтальная и продольная принимаются равными нулю:

$$F_{zc} = K_{\partial z} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_2}{L}; \quad [\text{H}] \quad (1.1)$$

$$F_{zi} = F_{zn} = \frac{1}{2} K_{\partial z} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L}, \quad [\text{H}] \quad (1.2)$$

где F_{zc} , F_{zi} , F_{zn} - вертикальные нагрузки соответственно на сцепное устройство, левое и правое колеса, Н;

$K_{\partial z}$ - безразмерный динамический коэффициент, для случая эксплуатации прицепа по грунтовым дорогам в составе автопоезда с тягачом повышенной проходимости $K_{\partial z} = 2.75$ [3];

g - ускорение свободного падения, $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

m_n - полная масса прицепа, кг;

L - база прицепа, м; L_1 , L_2 - расстояния до центра масс, м.

1.2. Вертикальные несимметричные нагрузки

Максимальные вертикальные несимметричные нагрузки возникают при одновременном наезде на препятствие задней оси автомобиля тягача и оси прицепа, причем одно из колес прицепа отрывается от поверхности дороги, в этом случае на одно из колес прицепа (допустим левое) и сцепное устройство действует максимальная вертикальная нагрузка. Горизонтальная и продольная нагрузки, а также вертикальная на другое колесо считаются равными нулю. В этом случае как допущение принимается, что координаты центра масс не изменяются:

$$F_{zi} = K_{\partial z} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L}, \quad [\text{H}] \quad (1.3)$$

В схеме нагружения фиксируется шарнир сцепного устройства.

2. Продольные нагрузки

Продольные нагрузки возникают вследствие экстренного торможения автомобиля тягача и в случае наезда на препятствие высотой близкой к нормированной. Последний случай вызывает значительно большие нагрузки, поэтому будем рассматривать именно его.

2.1. Продольные симметричные нагрузки

Возникают в случае одновременного наезда обоих колес оси прицепа на препятствие. В этом случае боковые силы считаются равными нулю, вертикальные рассчитываются по формулам (1.1) – (1.2), продольные нагрузки равны:

$$F_{xi} = F_{xn} = \frac{1}{2} \cdot K_{\partial z} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L} \cdot \text{ctg} \theta; \quad [\text{H}] \quad (2.1)$$

$$F_{xc} = K_{\partial z} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L} \cdot \text{ctg} \theta; \quad [\text{H}] \quad (2.2)$$

$$\theta = \arcsin[1 - (\frac{H_r}{r_d})], \quad [\text{рад}] \quad (2.3)$$

где H_r - нормированная высота неровности, для данного типа транспортного средства $H_r = 0,2\text{м}$ [3];

r_d - динамический радиус шин, определяемый по каталогу шин, для шин 165/70R13 $r_d = 0,291\text{м}$ [2].

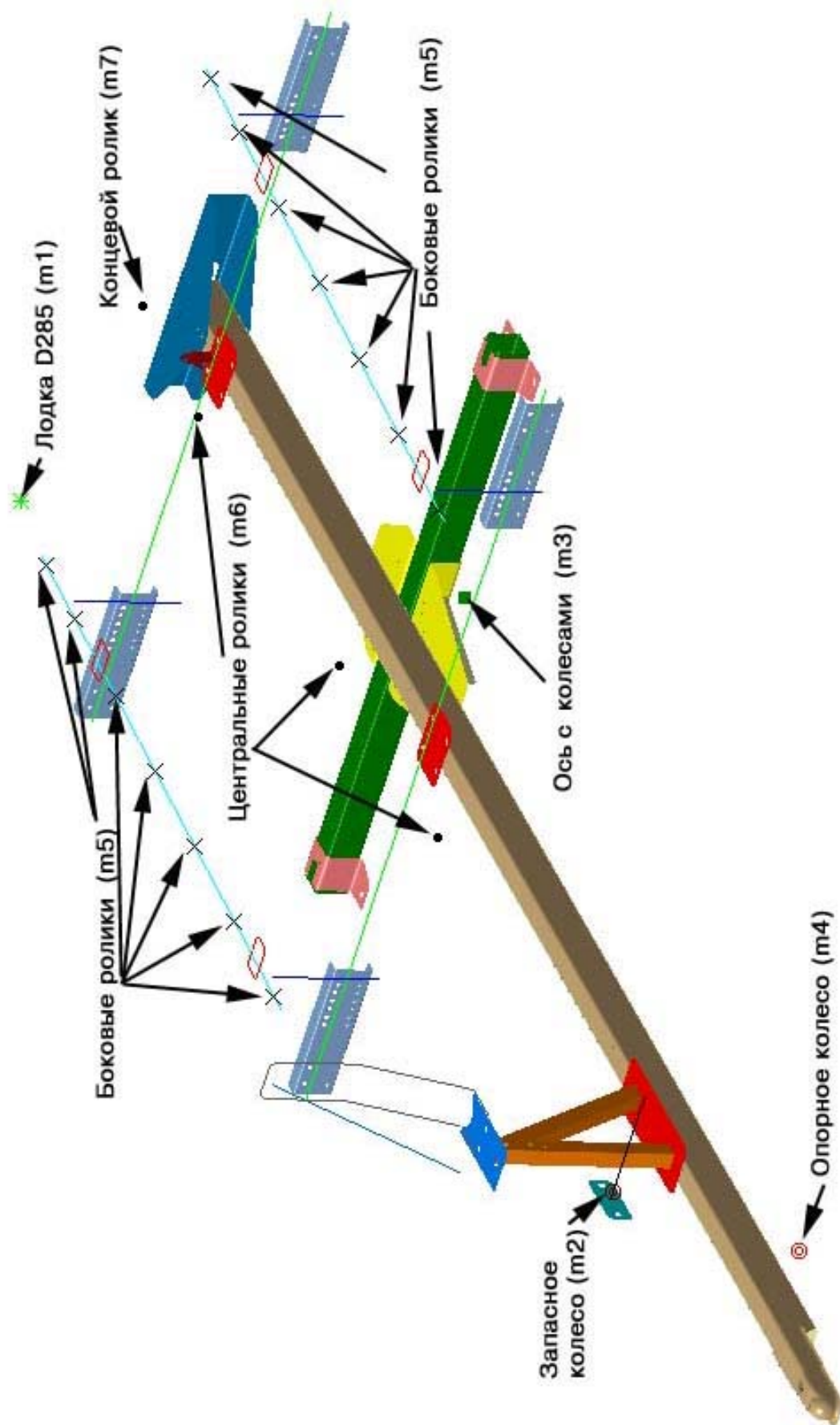


Рис. 3. Расчетная модель

2.2. Продольные несимметричные нагрузки.

Возникают в случае наезда одного из колес оси прицепа (допустим левого) на препятствие и фиксации шарнира сцепного устройства. В этом случае боковые силы считаются равными нулю, вертикальная рассчитывается по формуле (1.2), продольная нагрузка на правое колесо равна нулю, а на левое

$$F_{x1} = K_{\partial z} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L} \cdot \operatorname{ctg} \theta; \quad [\text{H}] \quad (2.4)$$

3. Боковые нагрузки

Боковые нагрузки возникают при сносе оси прицепа или при боковом столкновении с препятствием и фиксации шарнира сцепного устройства.

3.1. Боковые нагрузки при сносе оси прицепа

В этом случае продольная нагрузка считается равной нулю, а остальные рассчитываются по формулам:

$$F_{z1} = g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L} \cdot (0,5 + \frac{H \cdot \varphi_y}{B}); \quad [\text{H}] \quad (3.1)$$

$$F_{z2} = g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L} \cdot (0,5 - \frac{H \cdot \varphi_y}{B}); \quad [\text{H}] \quad (3.2)$$

$$F_{y1} = F_{z1} \cdot \varphi_y; \quad [\text{H}] \quad (3.3)$$

$$F_{y2} = F_{z2} \cdot \varphi_y; \quad [\text{H}] \quad (3.4)$$

где H - высота центра масс, м;

B - колея прицепа, м;

φ_y - коэффициент сцепления шин с дорогой в поперечном направлении,

$\varphi_y = 1,0$ [3].

3.2. Боковые нагрузки при боковом столкновении с препятствием

В этом случае продольная нагрузка принимается равной нулю, а остальные рассчитываются по формулам:

$$F_{z1} = F_{z2} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot m_n \cdot \frac{L_1}{L}; \quad [\text{H}] \quad (3.5)$$

$$F_{y1} = F_{z1} \cdot K_{\partial y}; \quad [\text{H}] \quad (3.6)$$

$$F_{y2} = F_{z2} \cdot K_{\partial y}; \quad [\text{H}] \quad (3.7)$$

где $K_{\partial y}$ - коэффициент динамической нагрузки при боковом столкновении с препятствием, $K_{\partial y} = 0,85$ [4].

В соответствии с выбранной расчетной схемой и расчетными случаями нагружения несущей конструкции была построена конечно-элементная модель (см. рис. 3).

Конечно-элементная модель прицепа состоит из 27443 элементов упругих оболочек SHELL63, 592 балочных элементов BEAM188, 1 стержневого элемента LINK180, 22 элементов MASS21 и 9665 контактных элементов TARGE170, CONTA173 и CONTA175.

Материал балок и пластин – сталь 20 ГОСТ 1050-88. Модуль упругости $E=2.1 \times 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0.3, плотность 7800 кг/м^3 [5].

Для выбранной расчетной модели и указанных выше расчетных случаев проведен расчет несущей конструкции.

В результате выполнения расчетов были определены величины перемещений и действующие напряжения в конструкции, а также рассчитаны усилия в шарнире сцепного устройства и по опорным площадкам кронштейнов навески оси колес.

Результаты расчета усилий для всех расчетных случаев сведены в таблицу.

Номер расчетного случая	Сцепное устройство			Опора колеса (правая или левая)		
	Fx, Н	Fy, Н	Fz, Н	Fx, Н	Fy, Н	Fz, Н
1	-	-	546,74	-	-	2995,5
2			597,2			5868,8
3	-4198,1	-	893,71	-1115,3	-	2824,4
4	-5844,6	-	846,31	-621,38	-	2852,2
5	-	-296,32	546,66	-	3212,9	2584

Для качественной оценки величины перемещений и напряжений в рассчитываемых элементах конструкции прицепа распределение данных величин представлено в графическом виде для рассматриваемых расчетных случаев (рис. 4 – 6).

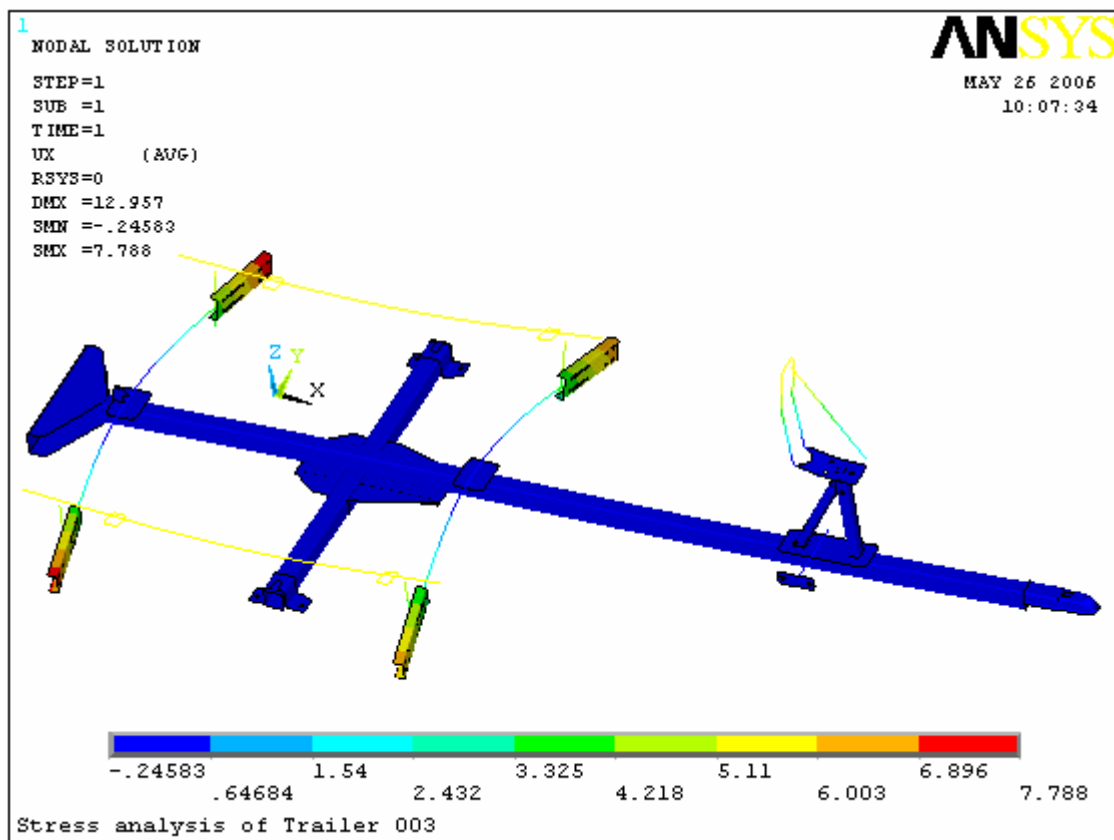


Рис. 4. Характер распределения продольных перемещений U_x в несущей конструкции прицепа (мм) (расчетный случай 4)

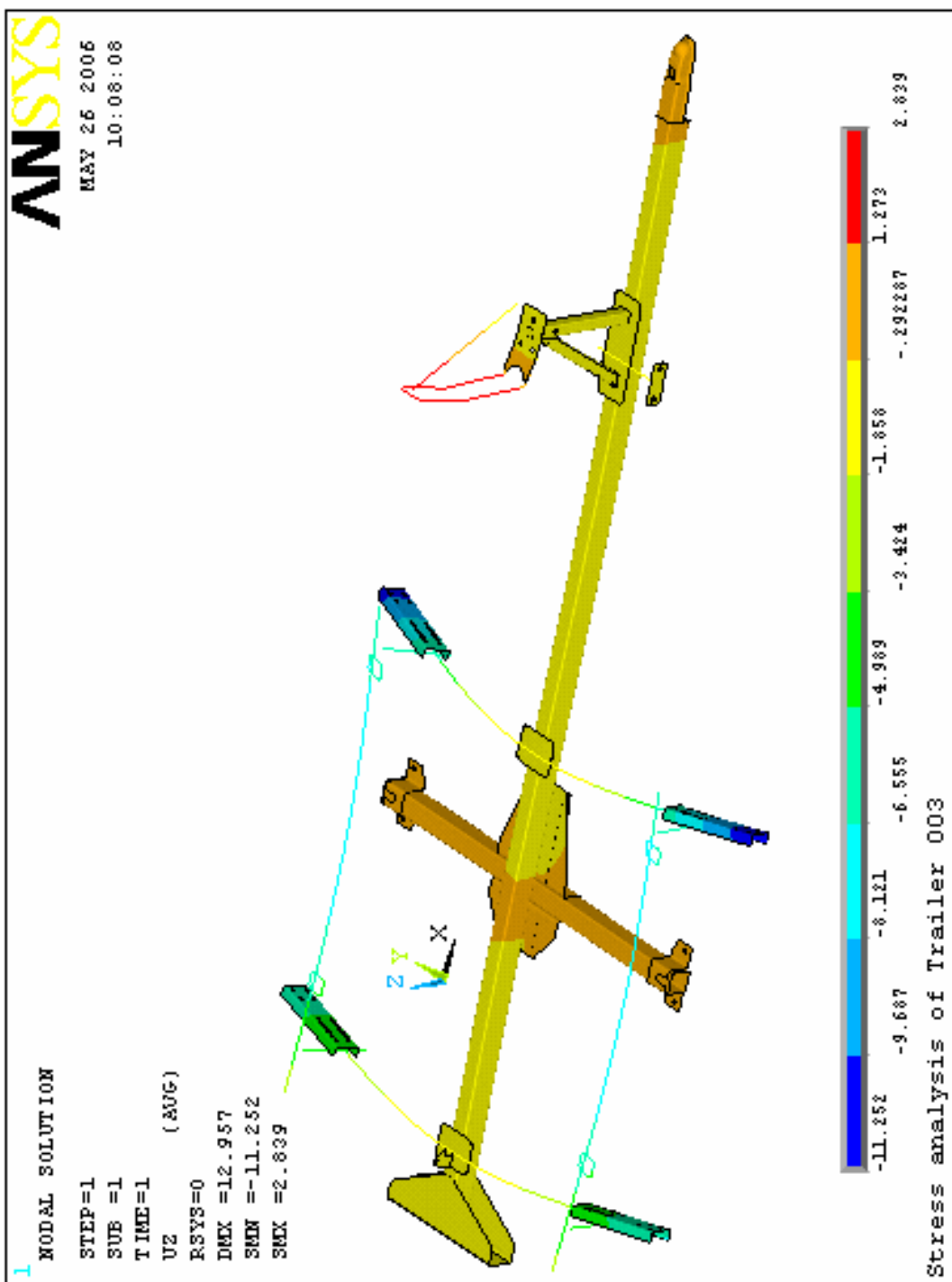


Рис. 5. Характер распределения вертикальных перемещений Uz в несущей конструкции прицепа (мм) (расчетный случай 4)

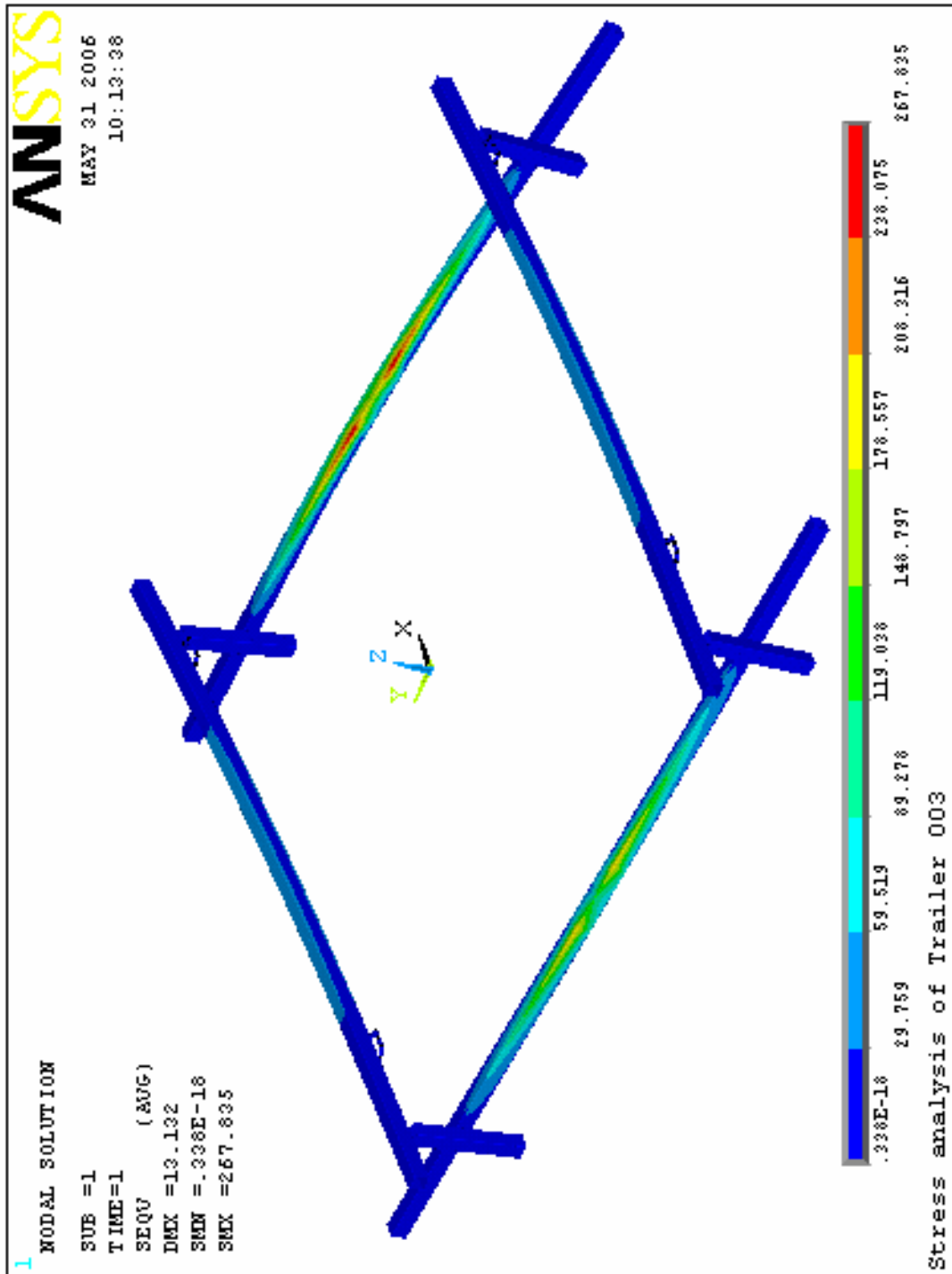


Рис. 6. Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса σ_e в балках платформы (МПа) (расчетный случай 4)

Для количественной оценки величины перемещений и напряжений в рассчитываемых элементах конструкции прицепа были построены графики изменения данных величин по длине соответствующих элементов.

Графики изменения перемещений по длине балок для всех расчетных случаев представлены на рис. 7 – 9.

На рис. 10, 11 показаны графики распределения эквивалентных напряжений по длине в силовых элементах прицепа (дышло и задняя поперечная балка платформы).

Примечание. На графиках (см. рис. 7 – 11) по оси абсцисс отложена длина соответствующей балки. При построении графиков изменения перемещений по длине дышла, расчетной схемой которой является оболочечная модель, значения перемещений определялось в узлах, расположенных на верхней поверхности в вертикальной плоскости симметрии балки (см. рис. 10). При построении графиков изменения эквивалентных напряжений по длине дышла ось абсцисс проходит через точку в сечении балки, в которой эквивалентное напряжение имеет максимальное значение.

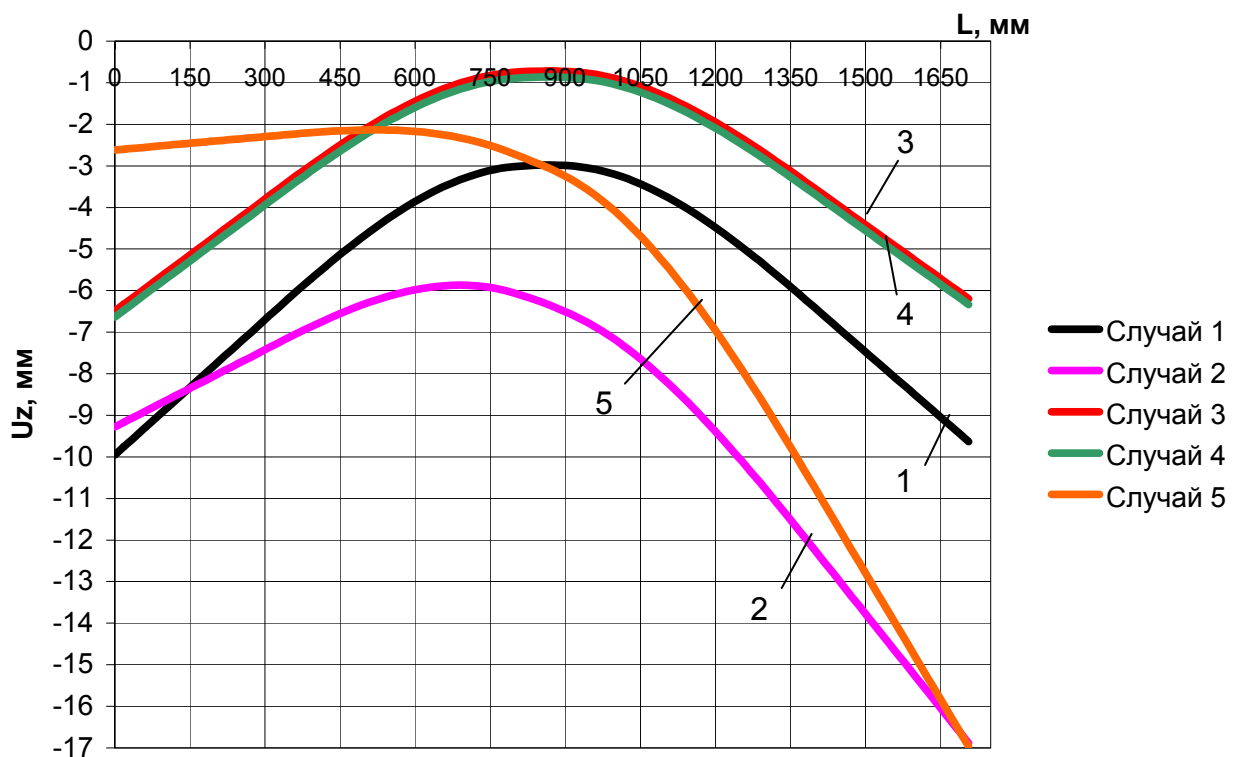


Рис. 7. Изменение перемещения U_z по длине задней поперечной балки

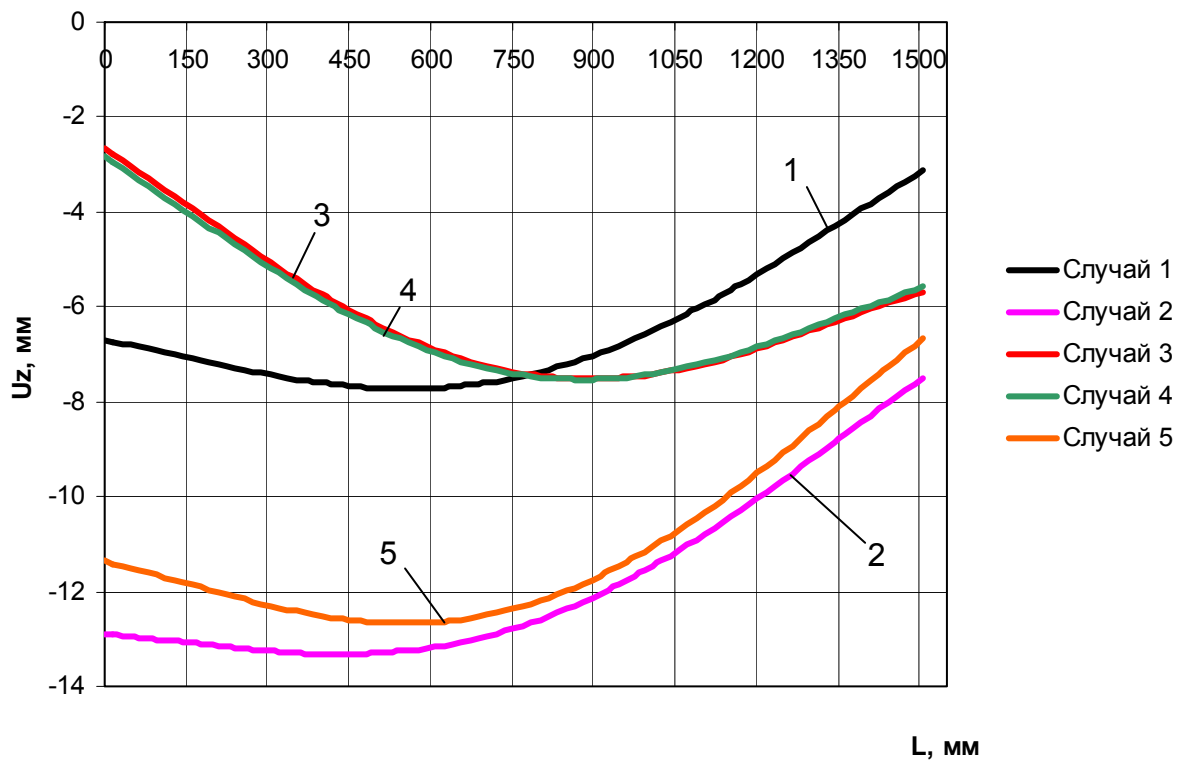


Рис. 8. Изменение перемещения U_z по длине левой продольной балки

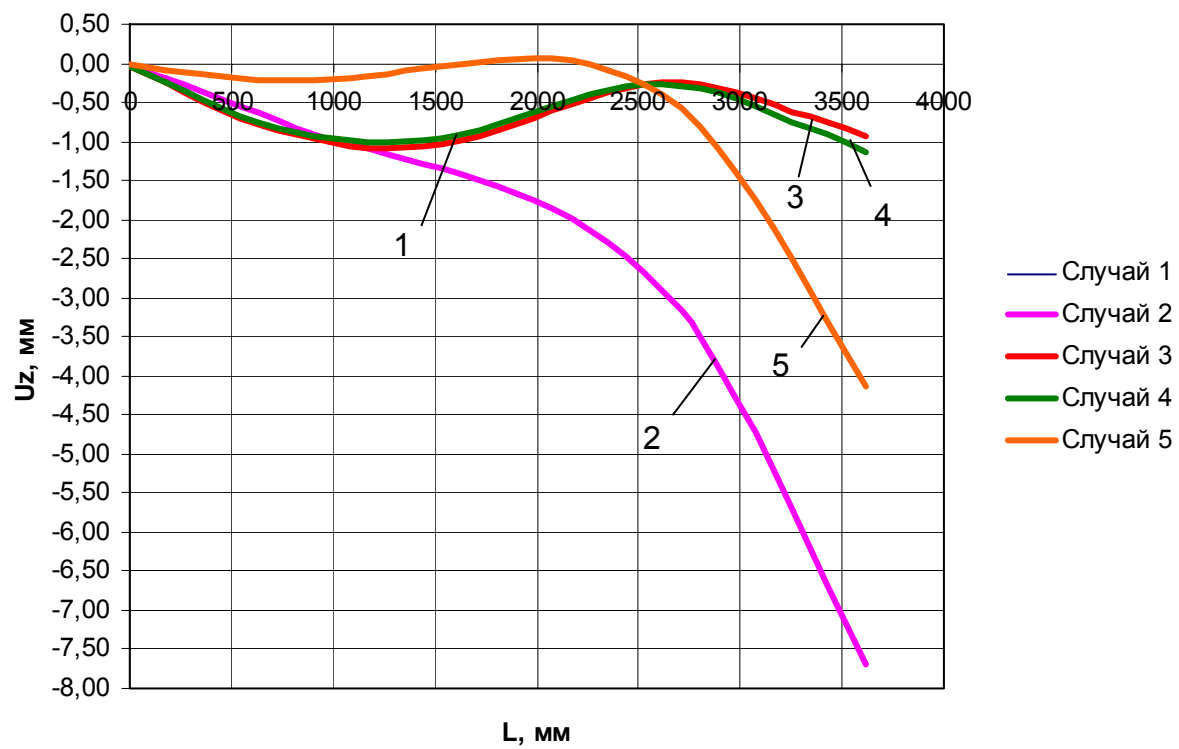


Рис. 9. Изменение перемещения U_z по длине дышла

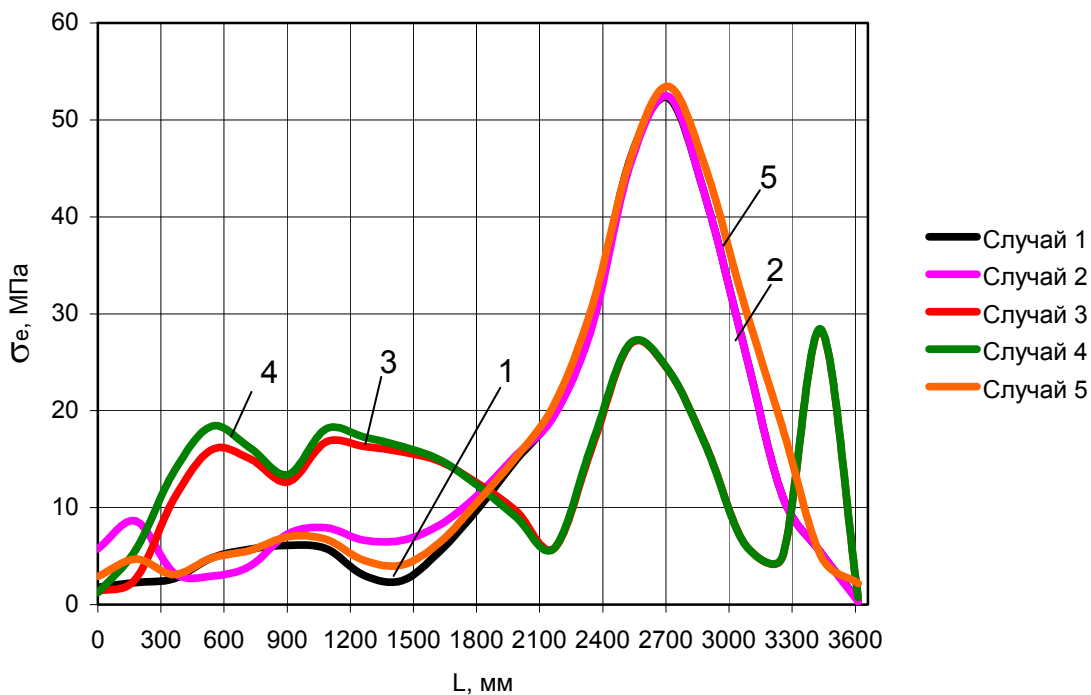


Рис. 10. Изменение эквивалентных напряжений σ_e по длине дышла

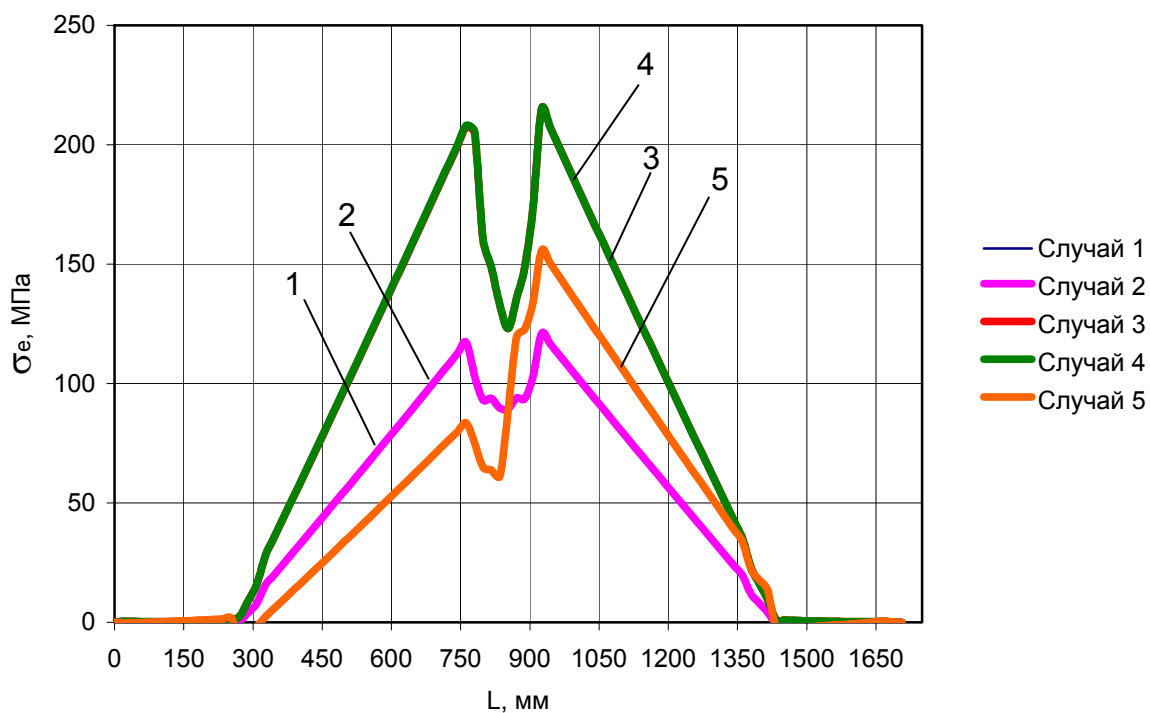


Рис. 11. Изменение эквивалентных напряжений σ_e по длине задней поперечной балки

Исследовано общее НДС элементов прицепа. Анализируя работу поперечных балок платформы, следует отметить, что часть нагрузки от инерционных сил, действующих на лодку, а также вес продольных балок и стоек платформы воспринимается поперечными балками, работающими на изгиб. Расчетная схема поперечных балок представляет собой консольные балки, закрепленные на дышле и нагруженные системой сосредоточенных сил. Вследствие такого нагружения консоли балок имеют большие прогибы, а в сечениях, расположенных в зоне заделки, возникают большие изгибающие моменты и напряжения.

В результате расчета было выявлено, что поперечные балки платформы обладают недостаточной жесткостью. Величина максимального прогиба концевой сечения балки составила –13,99 мм, или 1,6% от длины консоли балки.

Дышло обладает повышенными запасами прочности, величина максимальных напряжений в опасном сечении не превышает 60 МПа. Коэффициенты запаса прочности для дышла составили 2,46 – расчетный случай 1 и 2,08 – расчетный случай 2.

По результатам расчета были разработаны рекомендации по повышению жесткости балок платформы

Рекомендуется использовать переменное сечение для поперечных балок платформы либо в зоне их крепления к дышлу приварить треугольные косынки для повышения жесткости балок и снижения величины действующих напряжений.

Разработанная методика определения характеристик общего НДС силовых элементов прицепа может применяться для расчета характеристик общего НДС подобных прицепов и их модификаций.

Она также является основой для расчета характеристик локального НДС конструктивных нерегулярностей силовых элементов прицепа.

Список литературы

1. Гребеников А.Г., Светличный С.П. Анализ напряженно-деформированного состояния авиационных конструкций в системе ANSYS / – Конспект лекций. – АНТО «КНК», VIEWNET центр для промышленности и образования Харькова, 2001. – 233 с
2. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Понизовкин, Ю.М. Власко, М.Б. Ляликов и др. – АО «Трансконсалтинг», НИИАТ, 1994. – 779 с.
3. Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / Под общ. ред. А.И. Гришкевича. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
4. Павловский Я. Автомобильные кузова: Пер. с польск. – М.: Машиностроение, 1977. – 544 с.
5. Анурьев. В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. Т. 1. – 736 с.