



УДК 621.873

**Яблоков Александр Сергеевич**, доцент, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Борунов Сергей Александрович**, студент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Девин Александр Дмитриевич**, студент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Шутов Владислав Вадимович**, студент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТРАВЕРСЫ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 160 ТОНН ДЛЯ ПОДЪЕМА ШЛЮЗОВЫХ ВОРОТ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

*Аннотация. В статье выполняется расчет напряженно-деформированного состояния траверсы с учетом дополнительных нагрузок, основанный на методах прочностных расчетов по допускаемым напряжениям и методе конечных элементов. Разработана расчетная схема, твердотельно-деформированная модель и выполнен расчет методом конечных элементов в CAD / CAE системе. Произведен анализ полученных данных, а также сделан вывод о целесообразности использования вышеописанных методов расчёта.*

*Ключевые слова: траверса, металлоконструкция, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, моделирование, прочность, концентрация напряжений, надежность.*

### 1. Введение.

Тенденция развития конструкций и аппаратов современного машиностроения характеризуется снижением металлоемкости за счет оптимального проектирования и применения высокопрочных материалов, обеспечение которых связано с повышенной общей и местной напряженностью конструктивных элементов и уменьшением коэффициента запаса прочности. Значительно увеличиваются требования к надежности и длительности безаварийной эксплуатации как конструкций в целом, так и отдельных её

элементов. Указанные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из актуальных задач современной техники является задача надежной оценки ресурса конструкций, диагностики выработанного и прогноза остаточного ресурса в процессе эксплуатации [1].

## 2. Исходные данные для расчета

Таблица 1

№ П/П	Наименование	Значение
1	Расчетная масса поднимаемой створки	160 тонн
2	Расчетная масса нижней траверсы	10 тонн
3	Расстояние между точками подвеса верхней траверсы	11 м
4	Расстояние между точками подвеса нижней траверсы	11 м

## 3. Определение допускаемых напряжений.

Согласно [2] допускаемые напряжения определяются в виде:

$$[\sigma] = R_n c \frac{\gamma_c}{\gamma_m} \gamma_n, \text{ где}$$

$R_n$  – нормативное сопротивление, принимаемое равным  $R_n = \min\{R_{yn}; \frac{R_{un}}{1,3}\}$ , где  $R_{yn}$  – предел текучести материала;  $R_{un}$  – временное сопротивление материала;  $c$  – коэффициент перехода от основных к производным расчетным сопротивлениям, принимаемый равным 1,05, для сдвига  $c = 0,58$  [3];  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимаемый равным 1,0 [3];  $\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу, для стали 09Г2С по ГОСТ 19281-2014 принимаем равным 1,05 [3];  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению принимается:

- для общих местных напряжений  $\gamma_n = 1,4$ ;
- для местных напряжений  $\gamma_n = 1,2$ .

Таблица 2

Вид деформации	Марка стали	Толщина, мм	$R_n$ , МПа	Расчетные коэффициенты				Допускаемые напряжения, МПа [ $\sigma$ ]
				$c$	$\gamma_c$	$\gamma_m$	$\gamma_n$	
Растяжение, изгиб, смятие	09Г2С	20,30,40	310	1,05	1,0	1,05	1,4	221
	09Г2С	60	290	1,05	1,0	1,05	1,4	207
	09Г2С	75	280	1,05	1,0	1,05	1,4	200
Сдвиг (срез)	09Г2С	20,30,40	310	0,58	1,0	1,05	1,2	142
	09Г2С	60	290	0,58	1,0	1,05	1,2	133
	09Г2С	75	280	0,58	1,0	1,05	1,2	128

## 4. Расчет верхней траверсы.

Для определения действующих напряжений в металлоконструкции верхней траверсы построим модель в натуральную величину с соблюдением заданных характеристик и геометрических размеров. Учитывая большую сложность моделирования сварного соединения каждого листа, профиля, ребра было заменено на абсолютно жесткое (аналог сварного соединения). Моделирование опор выполнялось в накладывании граничных условий, исключающие перемещение этих узлов во всех направлениях. Также исключался поворот в этих узлах. Исходя из параметров используемой листовой стали, идеализация конструкции на конечные элементы проводилась с использованием балочного конечного элемента, который является трехмерным симметричным в

поперечном сечении [4]. При моделировании металлоконструкции данным типом конечного элемента в качестве реальных констант использовались стандартные геометрические характеристики: площадь поперечного сечения балки, моменты инерции относительно двух осей (в поперечном сечении), высота поперечного сечения, ширина поперечного сечения. Расчетные исследования выполнены как для статического, так и для динамического типа приложения нагрузок [4]. Для общего представления о характере деформирования траверсы и вычисления местоположения узлов, критических с точки зрения долговечности, на первом этапе был проведен упругий расчет по (КЭ) программе [5]. Для выполнения расчета была построена трехмерная модель верхней траверсы (рис. 4.1).

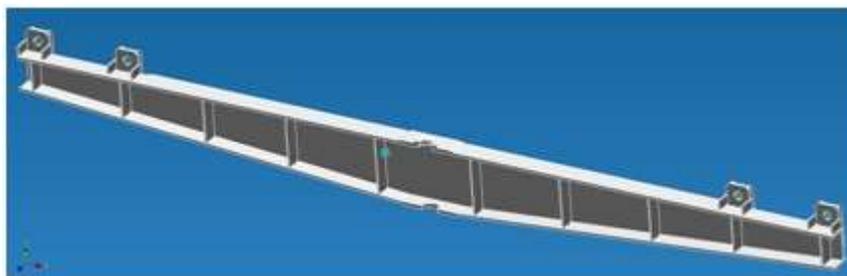


Рис. 4.1 – Модель верхней траверсы

Так как конструкция траверсы симметрична, относительно оси Y, то для расчета будем принимать половину симметричной модели, относительно оси Y (рис. 4.1)

Указанная модель была разбита на 8, 10, 20 - узловое конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APM Studio» из пакета «APM Winmachine» (рис. 4.2) [5].

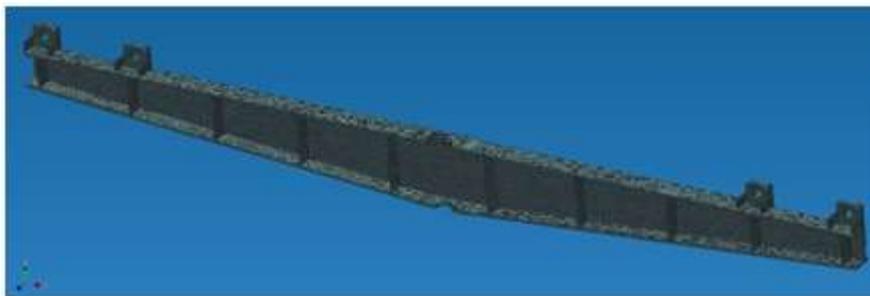


Рис. 4.2 – Модель верхней траверсы с сеткой конечных элементов

Для расчета действующих напряжений [6] в металлоконструкции верхней траверсы, приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки и нижней траверсы на площадь опирания упорного подшипника верхнего пояса траверсы.

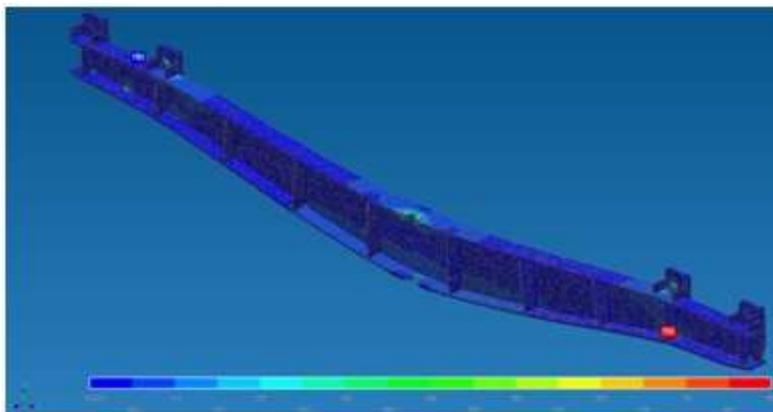
$$Q = 1.25g(160 + 10) = 2084.625 \text{ кН};$$

Площадь опирания упорного подшипника, согласно [6], определим равной –  $S=39321,148 \text{ мм}^2$ ;

Соответственно распределенное давление по площади опирания, исходя из [6], составит:

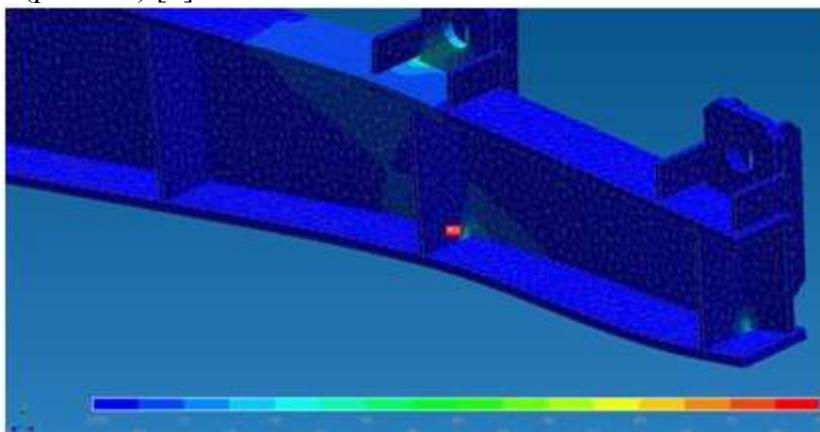
$$q_1 = \frac{Q}{S} = 53.02 \text{ Н/мм}^2,$$

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 4.3.



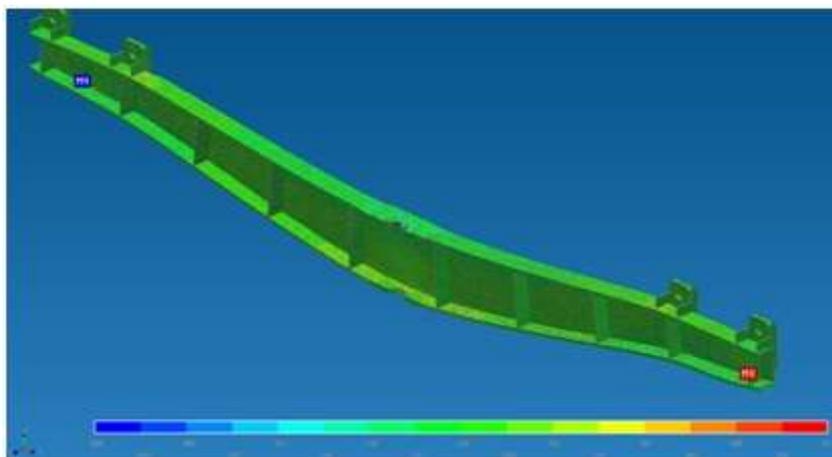
*Рис. 4.3 – Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции верхней траверсы.*

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения, величиной – 903 МПа, возникают в месте сварки внутренних проушин траверсы и приводят к возникновению концентратора напряжений в месте соединения с полкой и стенкой траверсы (рис. 4.4) [7].



*Рис. 4.4 – Распределение напряжений.*

Распределение нормальных и касательных напряжений представлено на рис. 4.5-4.10.



*Рис. 4.5 – Карта распределения нормальных напряжений по оси X.*

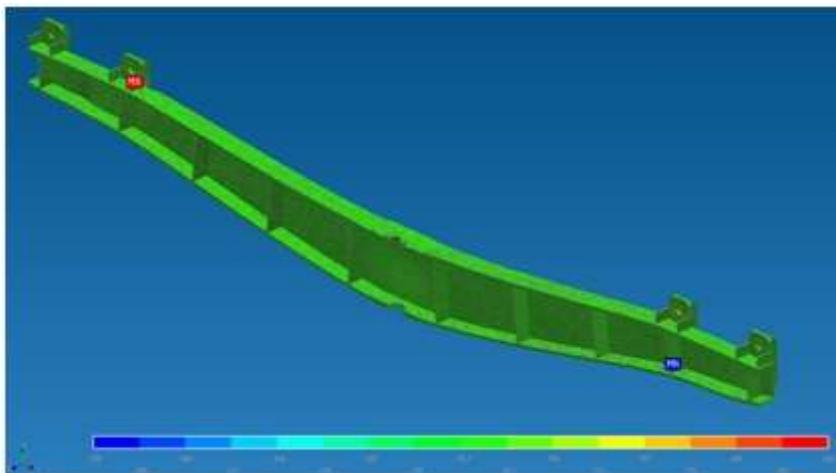


Рис. 4.6 – Карта распределения нормальных напряжений по оси Y.

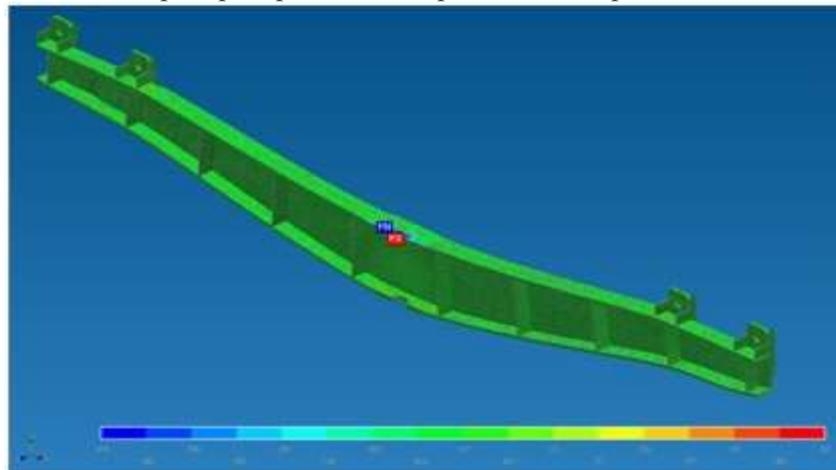


Рис. 4.7 – Карта распределения нормальных напряжений по оси Z.

Для анализа напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных узлов металлоконструкции траверсы [7], выполним моделирование четверти конструкции траверсы, считая геометрию траверсы симметричной в двух плоскостях [8].

Модель представлена на рис. 4.8.

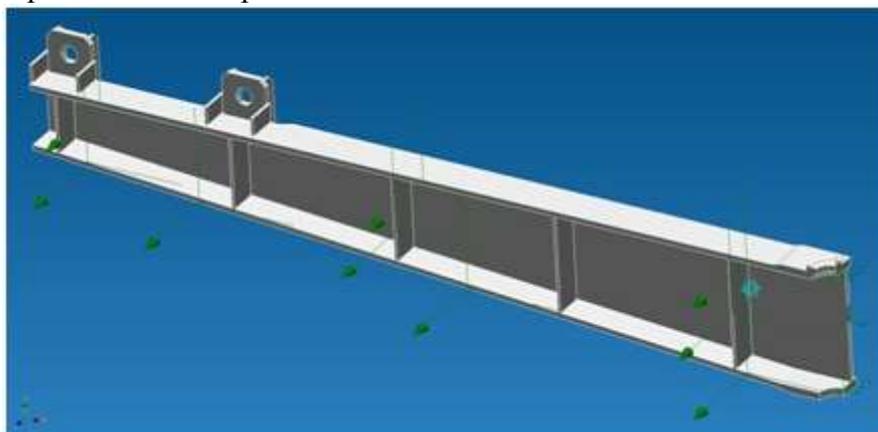


Рис. 4.8 – Модель четверти траверсы.

Указанная модель была разбита на 8 - узловое конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APM Studio» из пакета «APM Winmachine» (рис. 4.9) [8].

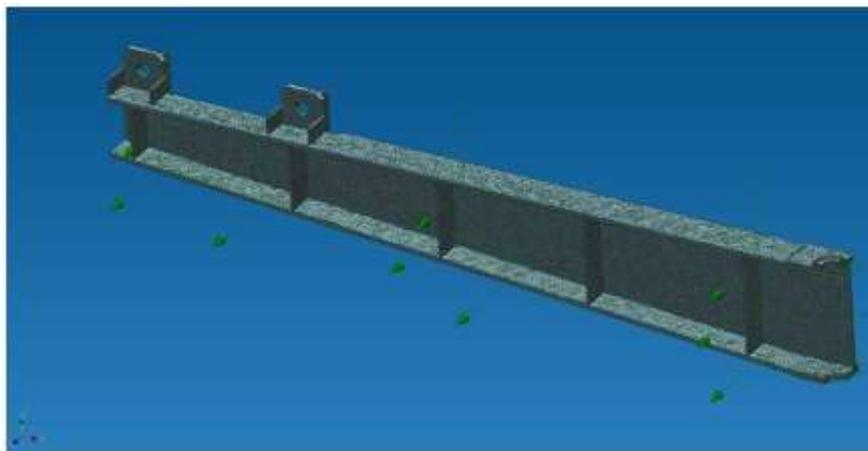


Рис. 4.9 - Модель с сеткой конечных элементов.

Для расчета действующих напряжений [5] в металлоконструкции верхней траверсы, приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки и нижней траверсы на площадь опирания упорного подшипника верхнего пояса траверсы [2].

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 4.10.

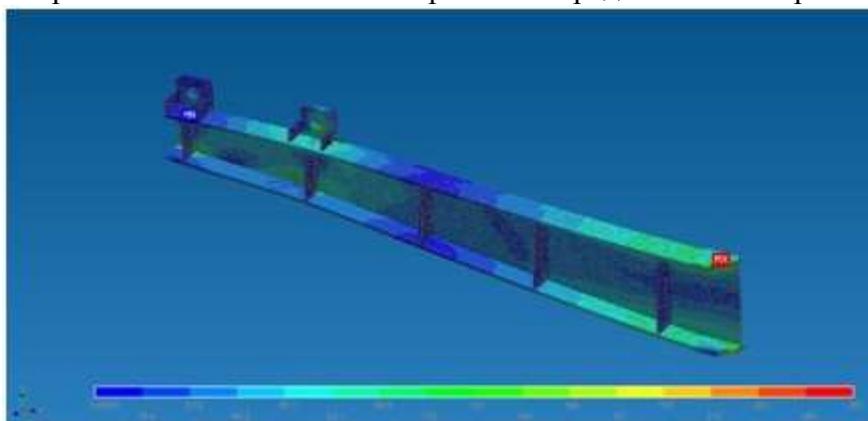


Рис. 4.10 – Карта распределения эквивалентных напряжений.

Схема распределения нормальных напряжений по осям X, Y, Z представлены на рис 4.11 а-в, соответственно.

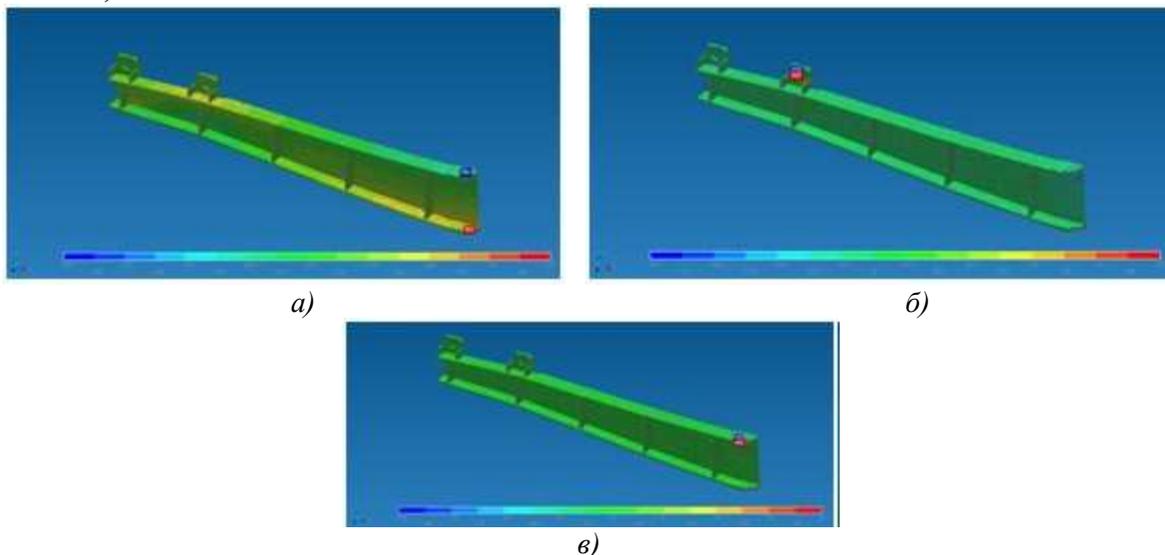


Рис. 4.11 – карта распределения нормальных напряжений.

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения составляют – 187 МПа. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений [8].

**Вывод: конструкция верхней траверсы обладает необходимой прочностью для подъема груза, предусмотренного эксплуатационной документацией траверсы.**

### 5. Расчет нижней траверсы

Для определения действующих напряжений в металлоконструкции нижней траверсы построим модель в натуральную величину с соблюдением заданных характеристик и геометрических размеров. Учитывая большую сложность моделирования сварного соединения каждого листа, профиля, ребра было заменено на абсолютно жесткое (аналог сварного соединения). Моделирование опор выполнялось в накладывании граничных условий, исключающие перемещение этих узлов во всех направлениях. Также исключался поворот в этих узлах. Исходя из параметров используемой листовой стали, идеализация конструкции на конечные элементы проводилась с использованием балочного конечного элемента, который является трехмерным симметричным в поперечном сечении [8]. При моделировании металлоконструкции данным типом конечного элемента в качестве реальных констант использовались стандартные геометрические характеристики: площадь поперечного сечения балки, моменты инерции относительно двух осей (в поперечном сечении), высота поперечного сечения, ширина поперечного сечения. Расчетные исследования выполнены как для статического, так и для динамического типа приложения нагрузок [5]. Для общего представления о характере деформирования траверсы и вычисления местоположения узлов, критических с точки зрения долговечности, на первом этапе был проведен упругий расчет по (КЭ) программе [8]. Для выполнения расчета была построена трехмерная модель нижней траверсы (рис. 5.1).

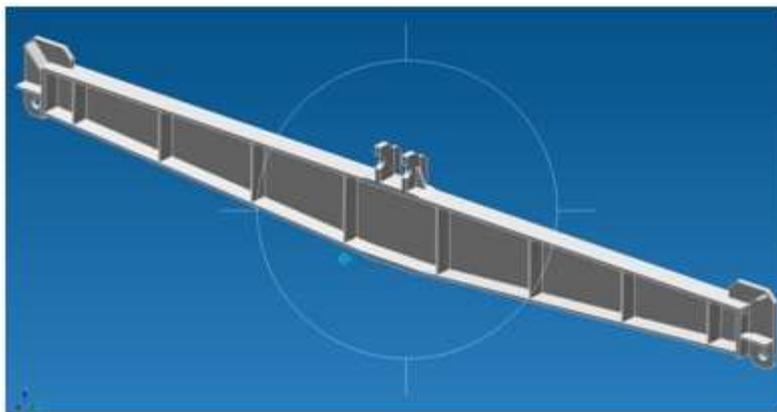


Рис. 5.1 – Модель верхней траверсы.

Так как конструкция траверсы симметрична, относительно оси Y, то для расчета будем принимать половину симметричной модели, относительно оси Y (рис. 5.1)

Указанная модель была разбита на 8, 10, 20 - узловое конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APM Studio» из пакета «APM Winmachine» (рис. 5.2) [8].

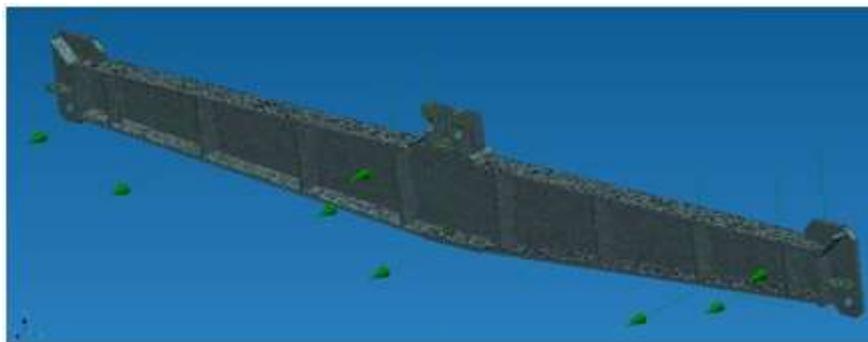


Рис. 5.2 – Модель верхней траверсы с сеткой конечных элементов.

Для расчета действующих напряжений [5] в металлоконструкции нижней траверсы, приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки на суммарную площадь проушин траверсы.

$$Q_1 = 1.25g(160) = 1960 \text{ кН};$$

Площадь опирания всех проушин, согласно [2], определим равной –  $S_1=98771,68 \text{ мм}^2$ ;

Соответственно распределенное давление по площади опирания, исходя из [2], составит:

$$q_1 = \frac{Q_1}{S_1} = 19.85 \text{ Н/мм}^2,$$

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 5.3.

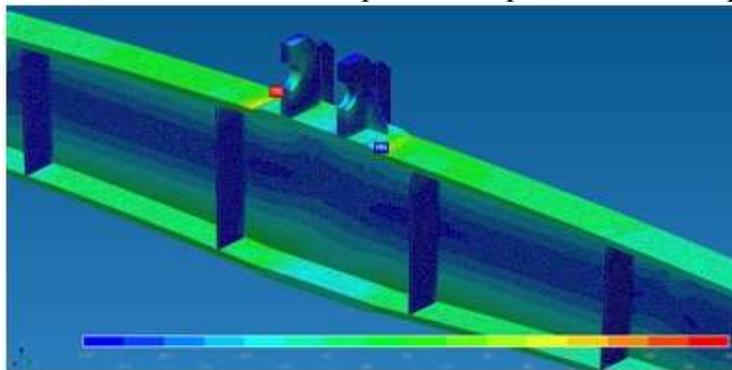


Рис. 5.3 – Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции верхней траверсы.

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения, величиной – 285 МПа, возникают в месте сварки верхних проушин траверсы и нижней полки траверсы [8].

Распределение нормальных и касательных напряжений представлено на рис. 5.4-5.9.

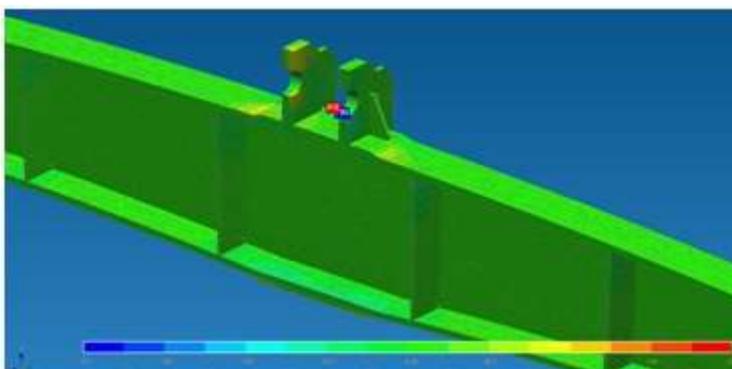


Рис. 5.4 – Карта распределения нормальных напряжений по оси X.

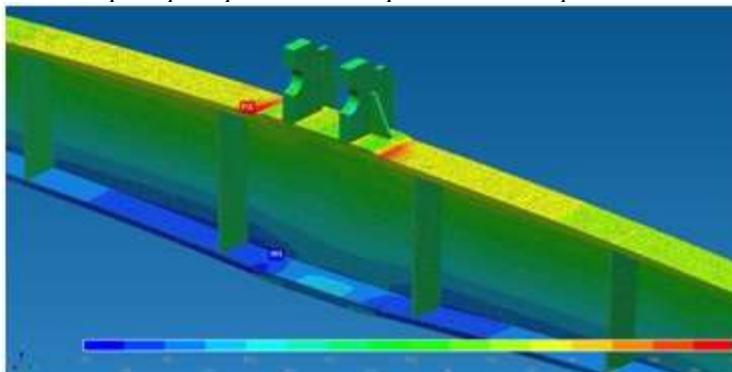
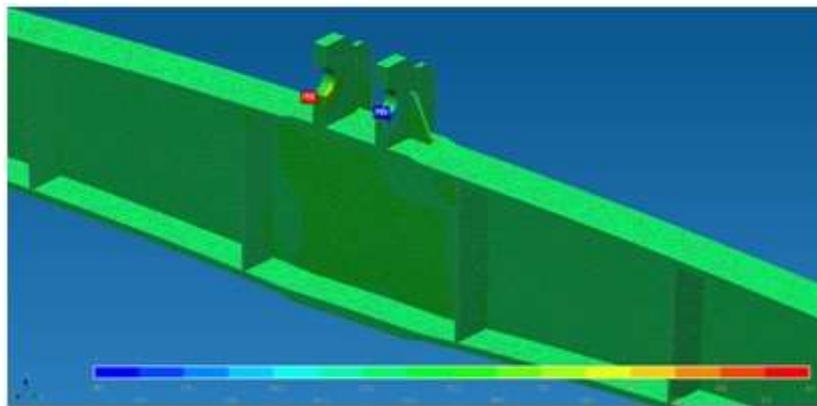


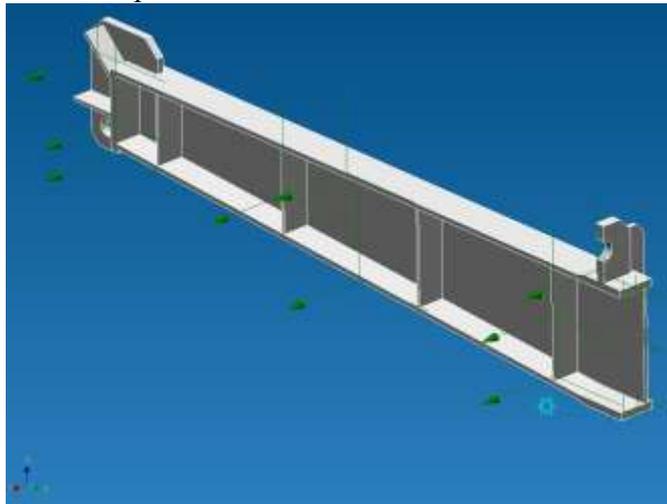
Рис. 5.5 – Карта распределения нормальных напряжений по оси Y.



*Рис. 5.6 – Карта распределения нормальных напряжений по оси Z.*

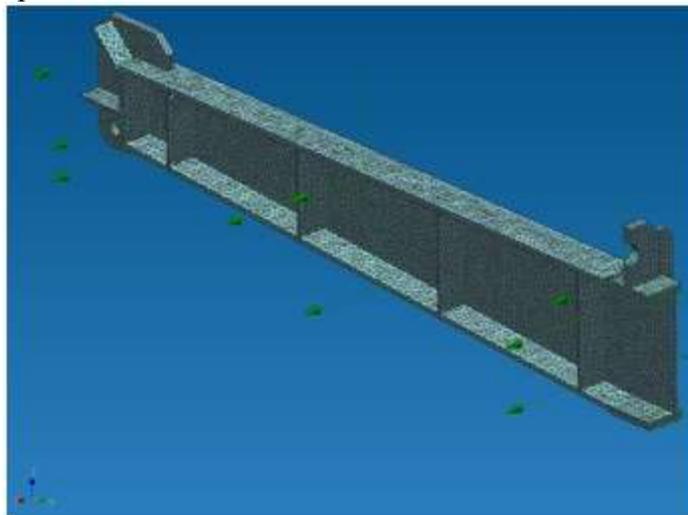
Для анализа напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных узлов металлоконструкции траверсы, выполним моделирование четверти конструкции траверсы, считая геометрию траверсы симметричной в двух плоскостях [8].

Модель представлена на рис. 5.7.



*Рис. 5.7 – Модель четверти траверсы.*

Указанная модель была разбита на 8 - узловые конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APM Studio» из пакета «APM Winmachine» (рис. 5.8) [8].



*Рис. 5.8 - Модель с сеткой конечных элементов.*

Для расчета действующих напряжений [5] в металлоконструкции верхней траверсы, приложим действующую нагрузку от силы тяжести поднимаемой створки на площадь опирания [2] проушин траверсы.

Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 5.9.

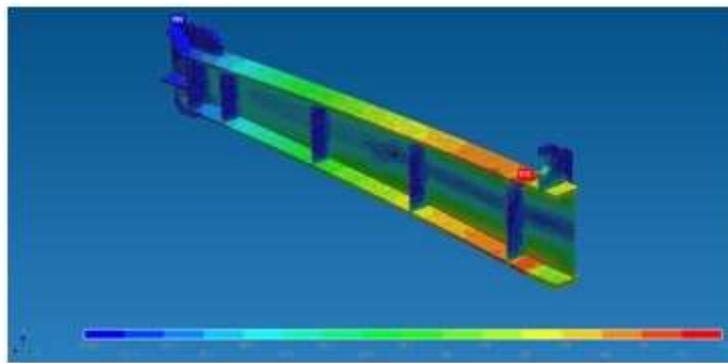


Рис. 5.9 – Карта распределения эквивалентных напряжений.

Схема распределения нормальных напряжений по осям X, Y, Z представлены на рис 5.10 а-в, соответственно.

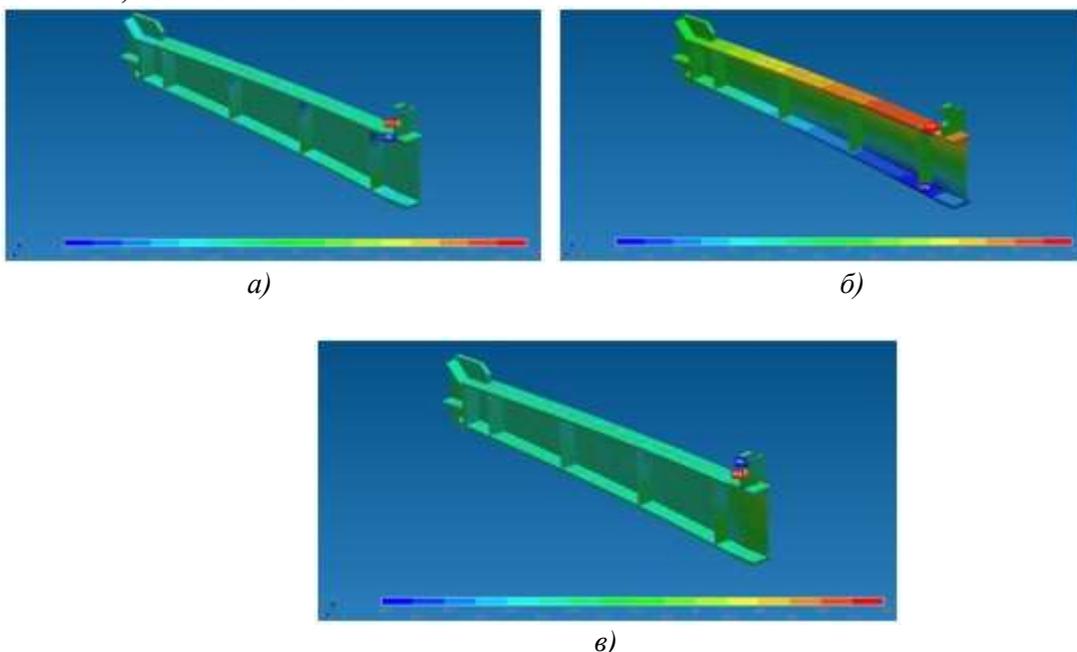


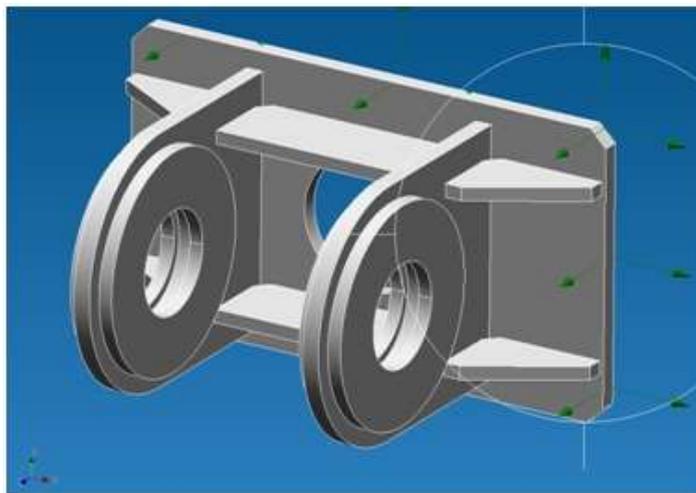
Рис. 5.10 – карта распределения нормальных напряжений.

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения составляют – 183 МПа. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений [8].

**Вывод: конструкция нижней траверсы обладает необходимой прочностью для подъема груза, предусмотренного эксплуатационной документацией траверсы.**

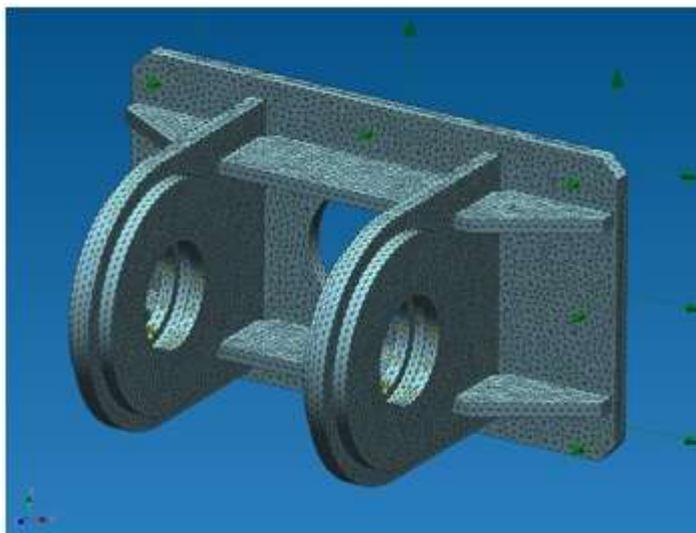
## 6. Расчет проушин

Для оценки прочности проушин, конструкция которых представлена в документации на проектирование БТ4014.04.00.000 выполним моделирование конструкции проушины, представленной на рис. 7.1



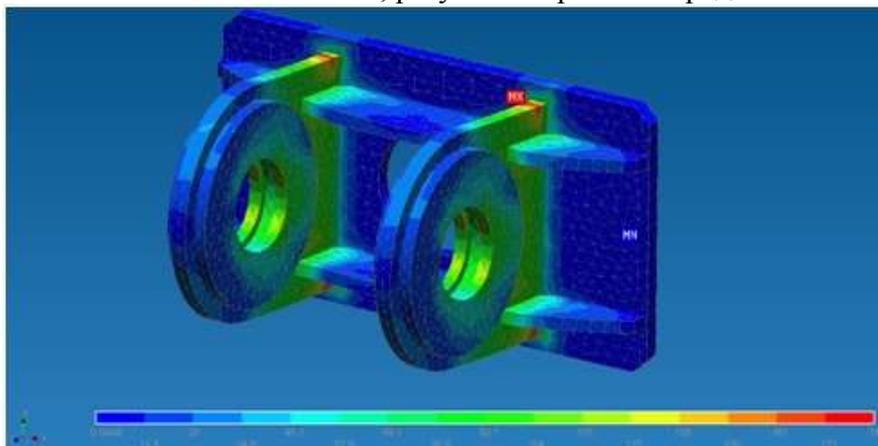
*Рис. 6.1 – Модель конструкции проушины.*

6.2. Модель конструкции проушины с сеткой конечных элементов представлена на рис.



*Рис. 6.2 – Модель конструкции проушины с сеткой конечных элементов.*

Приложим к отверстиям проушины расчетное усилие, представленное в п.2.2 документации БТ4014.00.00.000PP01.6, результаты расчета представлены на рис. 6.3.



*Рис. 6.3 – Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции проушины.*

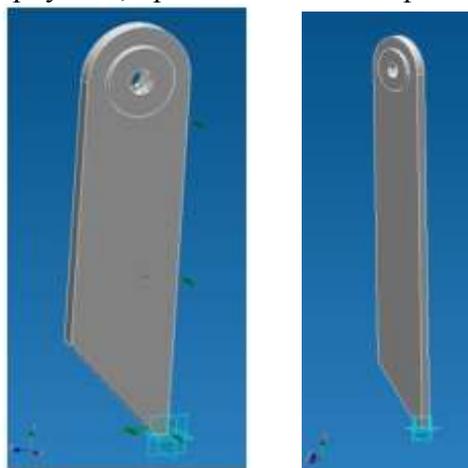
Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения составляют – 184 Мпа [8]. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений [2].

Вывод: конструкция проушины обладает необходимой прочностью.

---

*Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов*

Для оценки прочности проушин, конструкция которых представлена в документации на проектирование БТ4014.02.00.00.000 и БТ4014.03.00.00.000 выполним моделирование конструкции проушин, представленной на рис. 6.4 а, б.

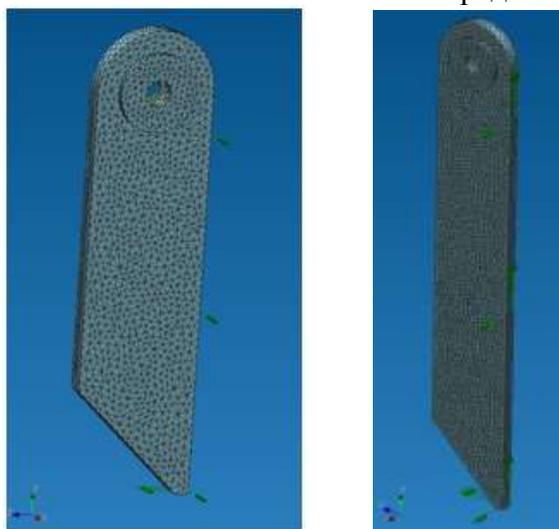


а)

б)

Рис. 6.4 – Модель проушин.

Модель проушин с сеткой конечных элементов представлена на рис. 6.5 а, б.

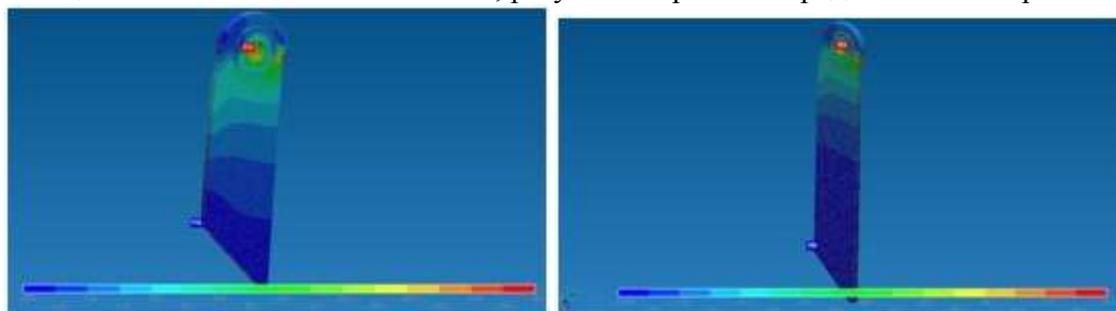


а)

б)

Рис. 6.5 – Модель проушин с сеткой конечных элементов

Приложим к отверстиям проушины расчетное усилие, представленное в п.4 документации БТ4014.00.00.00.000PP01.6, результаты расчета представлены на рис. 6.6.



а)

б)

Рис. 6.6 - Карта распределения эквивалентных напряжений по металлоконструкции проушины.

Из анализа полученных значений, определим, что наибольшие напряжения составляют – 59,1 и 58,8 Мпа [8]. Соответственно, полученные напряжения не превышают допустимых, определенных по нормативной документации для гидротехнических сооружений.

**Вывод: конструкция проушин обладает необходимой прочностью.**

*Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов*

## 7. Заключение.

1. Представленный вариант математической модели МПС, для расчета усталостной долговечности конструкций по механизму деградации многоциклового усталости материала позволяет учитывать:

- нелинейность процесса накопления усталостных повреждений;
- нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения или вида напряженного состояния.

2. Разработана научно-обоснованная инженерная методика расчета полей напряжений, деформаций, повреждений в опасных зонах элементов и узлов несущих конструкций по механизму деградации многоциклового усталости материала.

3. Проведён анализ элементов и узлов траверсы, подверженной воздействию знакопеременного нагружения и выполнен на его основе прогноз усталостной долговечности, который показал, что данный подход пригоден для разработки на его основе экспертных систем оценки ресурса различных металлоконструкций, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации.

### Список литературы:

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424с.
2. Руководящий технический материал // Расчёты и испытания на прочность / Методы расчёта на трещиностойкость металлоконструкций мостовых кранов при статическом и циклическом нагружении. – Красноярск, 1990. – 58 с.
3. Kennedy A. J. The creep of metals under interrupted stress-sing // Journal Proc. of the Royal. 1952. vol. 213. p. 492 – 506.
4. Волков И.А. Модель повреждённой среды для оценки ресурсных характеристик конструкционных сталей при механизмах исчерпания, сочетающих усталость и ползучесть материала / И.А. Волков, А.И. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 2. С. 232–245.
5. Волков, И.А. Численное моделирование упругопластического деформирования и накопления повреждений в металлах при малоциклового усталости. / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов, Д.Н. Шишулин // Междунар. научно-технический журнал «Проблемы прочности»: изд-во Института проблем прочности НАНУ, №4. – Киев, 2011.
6. Акимов, И.А., Яблоков, А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкции каркаса машинного отделения плавучего крана / И.А. Акимов, А.С. Яблоков // Труды 16-го международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2014». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2014. – 215 - 219с.
7. Elluin F., Kulawski D. An energy-based failure behavior of materials // Journal microstructure and mechanical behavior of materials. 1986. p. 591 - 600.
8. Chaboche J. L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Engineering Design. 1981. vol. 64. p. 233-247.

# OPTIMIZATION OF TRAVERSE CONSTRUCTION WITH A LOAD CAPACITY OF 160 TONS FOR LIFTING GATEWAY DOORS BASED ON THE STRESS-DEFORMED STATE ANALYSIS

Yablokov Alexander Sergeevich, Borunov Sergey Alexandrovich, Devin Alexander Dmitrievich,  
Shutov Vladislav Vadimovich

*Annotation. The article calculates the stress-strain state of the beam with the additional loads, based on the methods of strength calculations for permissible stresses and the finite element method. Developed a scheme, a solid-strain model, and a finite element calculation is performed in a CAD / CAE system. The analysis of obtained data is made, and also done a conclusion on the advisability of using the above calculation methods.*

*Keywords: traverse, metal construction, stress-strain state, finite element method, modeling, strength, stress concentration, reliability.*