

**Список литературы:** 1. *Резниченко Н.К., Созонов Ю.И.* Надежность многовитковых индукторов. // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – № 39. – 2005. – С.22-2. 2. *Созонов Ю.И., Куцын А.Н.* Модель надежности изоляции электрических систем при ресурсах, меньших среднего. // Технология приборостроения. –2000. – № 1. – С.49-50. 3. *Дейвид Г.* Порядковые статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 336 с. 4. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королук, Н.Н. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин.* – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 640 с. 5. *Сазонов Ю.И., Куцын А.Н.* Оценка ресурса индукционного нагревателя для критических технологий // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків. – 1999. – С.564-568

*Поступила в редколлегию 20.04.06*

УДК 629.4.015:625.032.4:539.3

*Е.А. ОРЛОВ*, ОАО „Измюский вагоноремонтный завод”

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА РАМЫ ТЕПЛОВЗОВ: МЕТОДЫ, МОДЕЛИ, СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ САПР**

Запропоновано новий метод дослідження впливу експлуатаційних факторів на напружено-деформований стан рам тепловозів. Він полягає у розкладанні навантаження на суму базових силових факторів. Сумарний напружено-деформований стан є суперпозицією напружено-деформованих станів від дії окремих силових факторів. Створено основи спеціалізованої системи комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану рам тепловозів серій 2TE10, 2TE116.

The new method of research of influencing of operating factors on the stressed-deformed state of diesel engines frames is offered. It consists in decomposition of loading to the amount of base power factors. The total stressed-deformed state is superposition of the stressed-deformed states from the action of separate power factors. The specialized system of computer design of the stressed-deformed state of frames of diesel engines of 2TE10, 2TE116 series is created.

**Состояние вопроса.** Современный парк локомотивов в Украине и странах СНГ характеризуется большим удельным весом тепловозов, выпущенных десятки лет назад и находящихся на пределе своего ресурса. В первую очередь это относится к рамам тепловозов, воспринимающим значительные нагрузки в процессе эксплуатации. Соответственно возникает вопрос о продлении ресурса локомотивов, а это требует оценки напряженно-деформированного состояния силовых рам. Проведенные в свое время исследования этих рам в процессе проектирования и освоения производства были ориентированы на обеспечение паспортного ресурса локомотива. В то же время сейчас большое значение приобретает вопрос возможности продления назначенного ресурса путем проведения ремонтных и восстановительных работ. Соответственно, возникает актуальная и важная

задача создания методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) как базовых конструкций рам локомотивов, так и их конструктивных изменений.

В литературе [1-7] освещены некоторые аспекты решения данного типа задач применительно к некоторым элементам локомотивов и вагонов. Однако представляет интерес задача параметрического анализа и синтеза изменений в существующие конструкции. А это требует разработки других подходов к моделированию напряженно-деформированного состояния рам локомотивов. От них требуется: возможность оперативного изменения структуры и параметров исследуемых рам; обеспечение возможности встраивания в системы автоматизированного проектирования; сопрягаемость с другими системами инженерного анализа, т.е. возможность двунаправленного обмена информацией с ними, например, с системой моделирования динамики железнодорожных экипажей.

Таким образом, сформулированная выше задача не имеет достаточно полного решения в литературе, а перечисленные требования принуждают использовать для ее решения новые подходы, методы, алгоритмы и соответствующее программное обеспечение. В статье предложено решение этой задачи на примере рам тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116.

**Геометрические модели рам тепловозов и эксплуатационные нагрузки.** Рассмотрим особенности конструкции рам тепловозов серий 2ТЭ10, 2ТЭ116 [8, 9] (рис.1). Основным элементом, замыкающим на себе силовые потоки как извне, так и внутри тепловоза, является рама (рис.2).

Основные элементы рамы – две хребтовых балки, соединенные поперечинами и настилами (см. рис.2). Рама опирается на 2 тележки при помощи 4-х резинометаллических опор (рис.3).

Основные нагрузки передаются на раму от динамического воздействия 8-ми опор и от шкворневого узла (см. рис.2, 3). Кроме того, на раму действуют статические и динамические усилия от всего подрессоренного строения тепловоза (двигатель, генератор и т.д.).

В свою очередь по характеру распределения во времени возмущения на экипажную часть делятся на случайную и периодическую составляющие [10]. Анализ работы рам и кузовов и их повреждений позволил определить расчетные режимы, учитывающие наиболее неблагоприятные сочетания внешних нагрузок и определяющие прочность конструкции [1]. К ним относятся:

- а) вертикальные статические нагрузки от веса оборудования, полного запаса топлива, воды, песка, собственного веса конструкции;
- б) наибольшие тяговые усилия при режиме двойной тяги;
- в) тяговые усилия при режиме двойной тяги;
- г) растяжение-сжатие продольными усилиями;
- д) кососимметричная вертикальная нагрузка, вызванная неравномерным распределением давлений по опорам, отклоняющимся от номинального до 30%;
- е) вертикальная динамическая нагрузка, определяемая по вертикальной

статической нагрузке с учетом коэффициента вертикальной динамики  $k_d$ , принимаемого постоянным для всех сечений кузова и рамы,

$$k_d = 0,1 + 0,2 \frac{v}{f_{ст}},$$

где  $v$  – конструкционная скорость, км/ч;  $f_{ст}$  – общий статический прогиб рессорного подвешивания локомотива, мм;

ж) нагрузки, имитирующие соударение и состоящие из продольных нагрузок по автосцепкам, дополненных усилиями, приложенными к шкворням рамы и равными утроенному весу тележек;

з) нагрузки, действующие при технологической подъемке кузова с размещенным в нем оборудованием;

и) нагрузки, возникающие при аварийной подъемке кузова с тележкой за буферный брус.

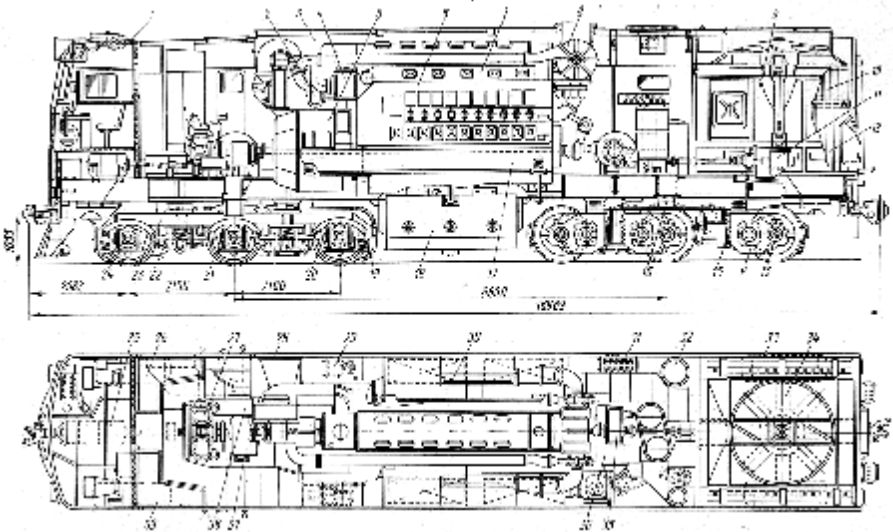


Рис.1. Тепловоз 2ТЭ10Л:

1 – кабина машиниста; 2 – центробежный нагнетатель; 3 – кузов; 4 – воздухоохладитель; 5 – главный генератор; 6 – дизель; 7 – ресивер; 8 – турбовоздуходувка; 9 – шахта холодильника; 10 – масляные секции; 11 – угловой редуктор; 12 – водяные секции; 13 – ось колесной пары; 14 – тяговый электродвигатель; 15 – пружинная подвеска; 16 – шкворень; 17 – рама дизеля; 18 – топливный бак; 19 – пружины; 20 – балансиры; 21 – направляющие рамы тележки; 22 – рессоры; 23 – рама тележки; 24 – букса; 25 – двухмашинный агрегат; 26, 39 – высоковольтные камеры; 27 – компрессор; 28 – воздушный фильтр генератора; 29 – маслопрокачивающий агрегат; 30 – воздушный фильтр дизеля; 31, 32 – фильтр

очистки масла; 33 – главные резервуары; 34 – вентиляционное колесо; 35, 37 – распределительные редукторы; 36, 38 – вентиляторы тяговых электродвигателей

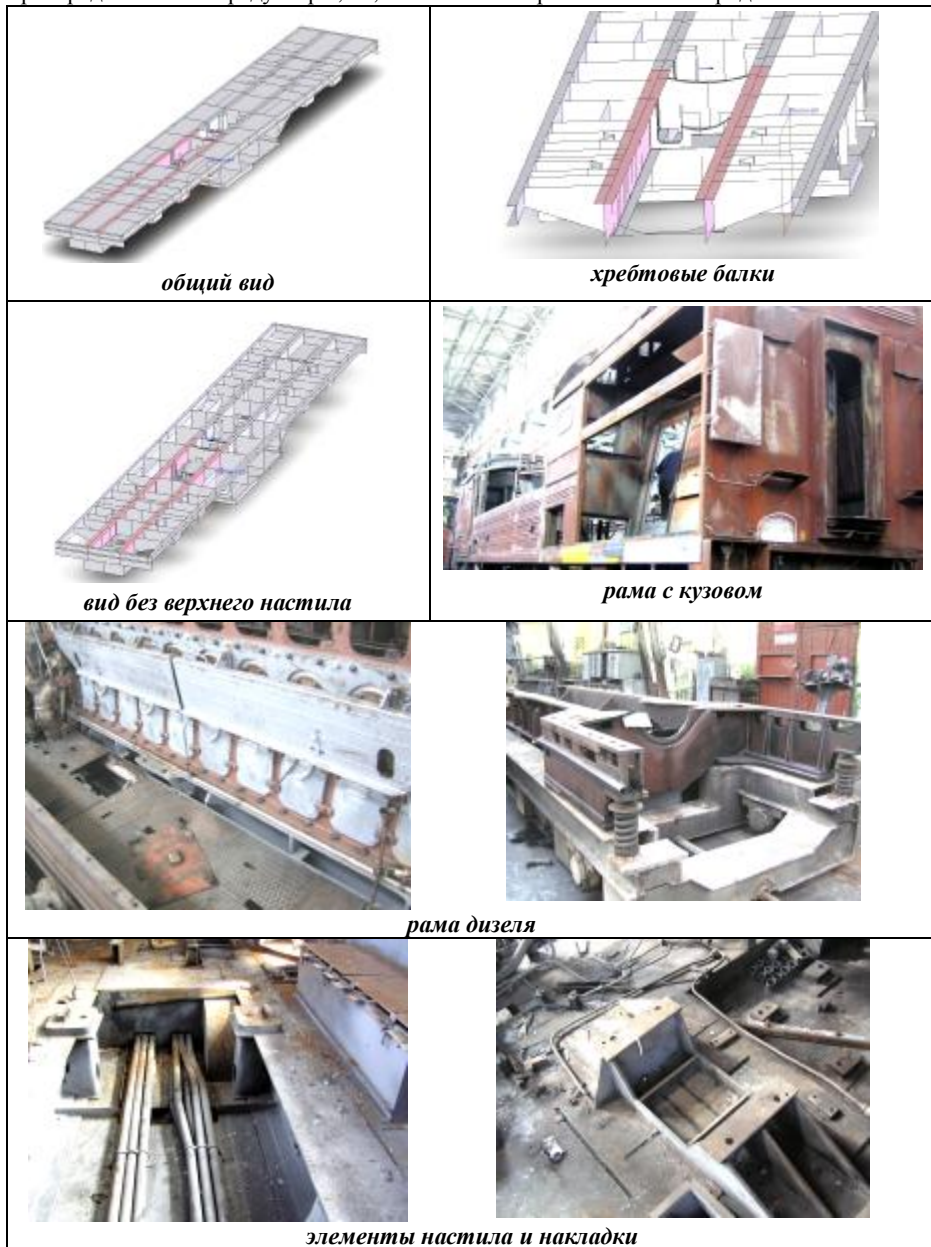


Рис.2. Геометрическая модель рамы тепловоза 2ТЭ116 и ее фрагменты

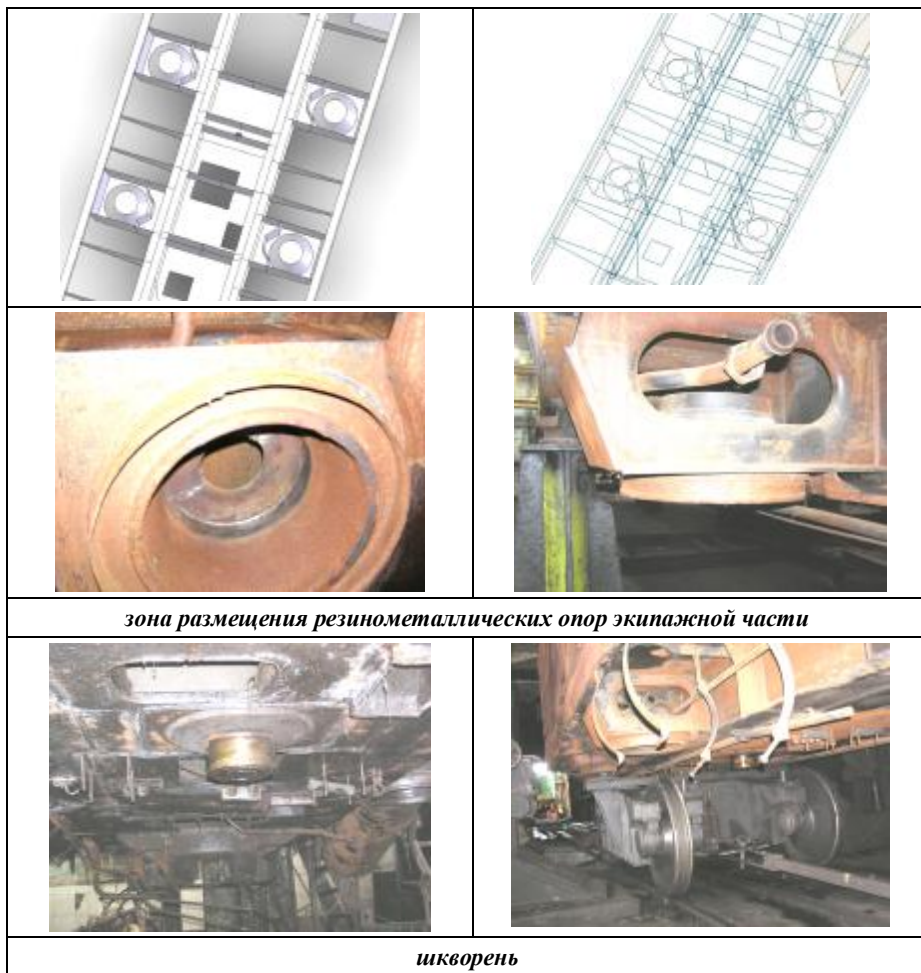


Рис.3. Опора рамы и шкворневый узел

При расчете на статическую прочность в сечениях рамы кузова определяют напряжения от сочетания режимов *a*, *г* и *д*. Учитывая редкую повторяемость таких нагрузок, расчетные напряжения сравниваются с пределом текучести материала при коэффициенте запаса  $n = 1,1$ . Аналогичные нормативы для аварийной подъемки кузова, а также при расчете на соударение.

Статические напряжения в кузове при трогании с учетом режимов *a* и *б* сравниваются с пределом текучести при коэффициенте запаса  $n = 1,5-1,6$ . При расчете кузова на выносливость учитываются режимы *a*, *в* и *е* при

коэффициенте запаса, равном двум по пределу выносливости.

Анализ конструкции и условий нагружения дает основания для вывода о том, что задача анализа напряженно-деформированного состояния рам тепловозов (даже базовой конструкции) требует проведения ряда расчетов от действия комплекса силовых воздействий. Поскольку речь идет о проведении многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния рам с возможным изменением их конструкций, то требуется разработка такой технологии проведения расчетов, при применении которой объем необходимых расчетов был бы минимальным.

**Метод разложения на базовые нагрузки.** В общем виде систему разрешающих уравнений для определения напряженно-деформированного состояния рам тепловозов можно представить в виде [11, 12]:

$$L(u(r), p, t) = f, \quad r \in \Omega, \quad (1)$$

где  $L$  – оператор краевой задачи;

$u$  – перемещения точек рамы, занимающей область  $\Omega$ , с радиус-вектором  $r$ ;

$p$  – параметры, определяющие свойства материала рамы;

$f$  – массив нагрузок, зависящих от  $r$  и времени  $t$ .

В пределах линейной постановки правую и левую части (1) можно представить в виде:

$$f(r, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i F_i(r, t), \quad (2)$$

$$u(r, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i v_i(r, t), \quad (3)$$

где  $F_i(r, t)$  – некоторые характерные базовые силовые факторы;

$\alpha_i$  – коэффициенты разложения.

Здесь  $v_i(r, t)$  представляют собой решения отдельных задач:

$$L(v_i, P, t) = F_i, \quad i = 1, \mathbf{K}, N. \quad (4)$$

Если в распоряжении исследователя имеется достаточно полный “базис” решений  $v_i$ , то любое сочетание силовых факторов не потребует для определения напряженно-деформированного состояния рамы ничего более, чем получения соответствующей линейной комбинации  $v_i$ . При изменении параметров рамы  $p$  и области  $\Omega$  требуется проведение повторной серии расчетов (4). Таким образом, для набора серий параметров  $p_j^i, j = 1, \mathbf{K}, M$ ,

существует двухиндексный набор “базовых” решений  $v_i^j$  таких, что текущее решение представимо в виде

$$u^j = \sum_{i=1}^N \alpha_i v_i^j(r, t), j = 1, \mathbf{K} M. \quad (5)$$

Соответственно, все характеристики, зависящие от напряженно-деформированного состояния рам тепловозов, представимы в виде (5). Это существенно упрощает проведение параметрического анализа рамы тепловоза при изменении эксплуатационных нагрузок, поскольку сама задача разделяется на 2 этапа:

- 1) определение системы “базовых” решений  $v_i^j$ ;
- 2) собственно параметрический анализ.

Первый из указанных этапов достаточно трудоемок, ресурсоемок и зачастую требует большого времени для проведения исследований. Его можно проводить, например, с использованием метода конечных элементов, привлечением мощного программно-аппаратного обеспечения. В результате формируется база данных, содержащая результаты решения системы задач (5). Это дает возможность на втором этапе с использованием сгенерированной базы данных при решении конкретной задачи провести параметрический анализ или синтез на рядовом компьютерном оборудовании.

**Конечно-элементные модели рам тепловозов. Результаты решения базовых задач.** На рис.4 представлена структура специализированной САПР, реализующей описанный в работе подход для анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза на этой основе соответствующих конструктивных и технологических решений при проведении ремонтных работ ( $p_{вх}, p_{вых}$  – набор входных и выходных параметров,  $P_{вх}$  – входной набор динамических характеристик и распределений динамических усилий, скоростей, ускорений поддресоренного строения тепловоза).

Предложенная САПР реализует заложенный параметрический подход и связь с системами анализа динамики железнодорожных экипажей, откуда поступают данные о динамических нагрузках.

На рис.5 приведены примеры конечно-элементной модели рамы тепловоза 2ТЭ116, а на рис.6 – результаты исследования напряженно-деформированного состояния данной рамы при действии следующих “базовых” нагрузок:

- I – нагружением усилием тяги  $\Phi$ ;
- II – статическое равномерное нагружение силами веса поддресоренного строения тепловоза;
- III – изгибная составляющая реакции резинометаллических опор (моменты  $M$  относительно поперечной оси рамы).



Рис.4. Структура специализированной САПР для анализа НДС и синтеза конструктивных и технологических решений при ремонте рам

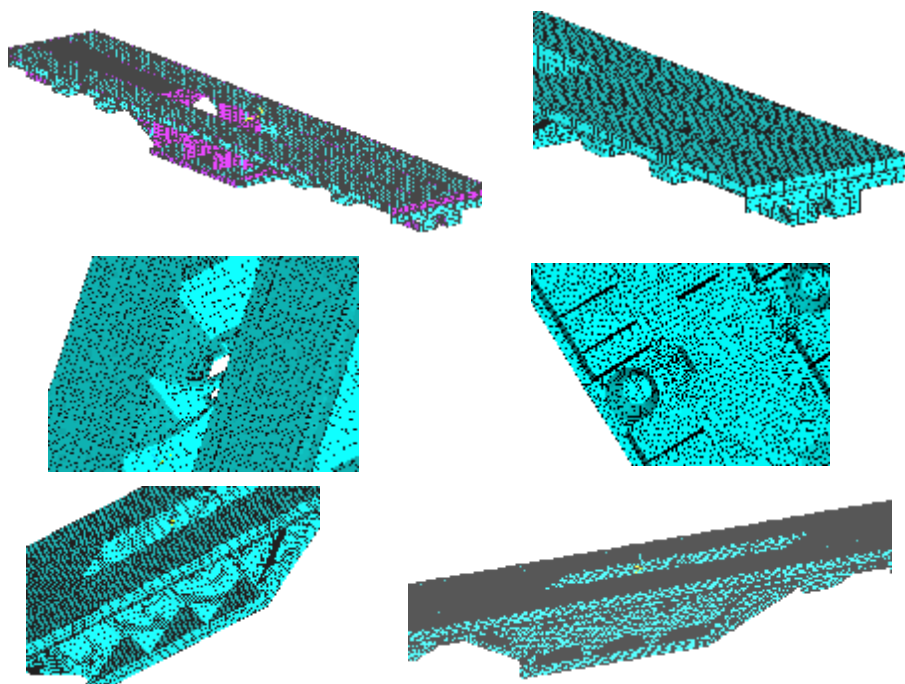


Рис.5. Примеры конечно-элементной модели рамы тепловоза 2ТЭ116

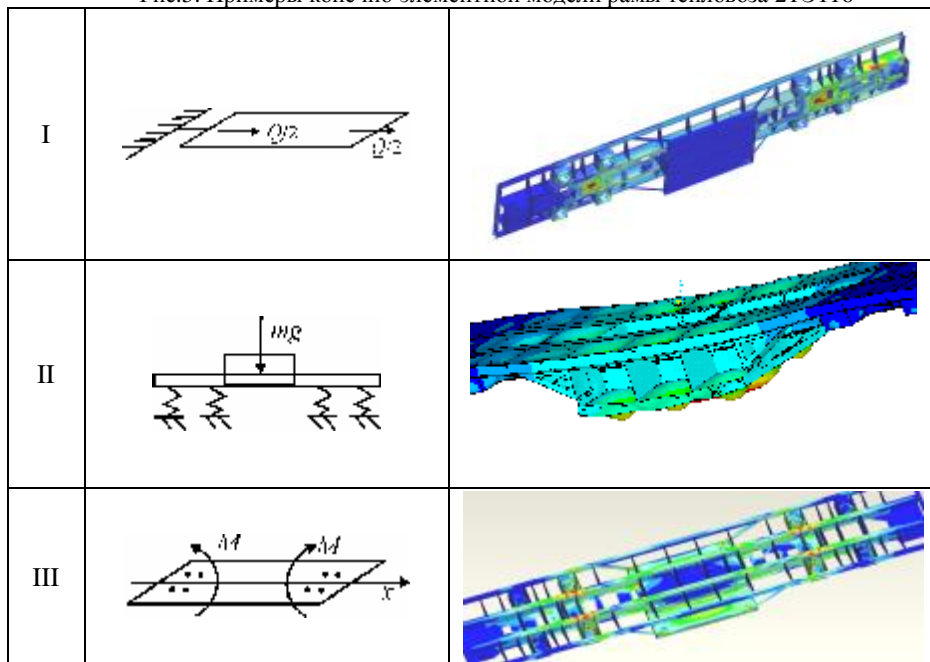


Рис.6. “Базовые” распределения напряжений в раме тепловоза 2ТЭ116 и соответствующие распределения компонент напряженно-деформированного состояния

Наряду с демонстрацией расчетных возможностей на первом этапе исследований сразу появились характерные зоны локализации напряжений и перемещений (рис.7). Наиболее напряженными являются зоны шкворневых сопряжений гнезда для расположения резинометаллических опор, а максимальные перемещения наблюдаются в средней части рамы.

**Заключение.** Предложенная технология исследований напряженно-деформированного состояния рам тепловозов существенно упрощает и интенсифицирует их параметрический анализ и синтез. В сочетании с применением численного метода конечных элементов становится возможным задача синтеза схем конструктивных и параметрических изменений, которые требуется выбрать в процессе ремонта или восстановления рам с целью продления работоспособности при действии эксплуатационных нагрузок.

В дальнейшем предполагается разработка полнофункциональной системы автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния, которая во взаимодействии с системой моделирования динамики железнодорожного экипажа позволит проводить решение

задачи анализа и синтеза рам по прочностным критериям и ограничениям.

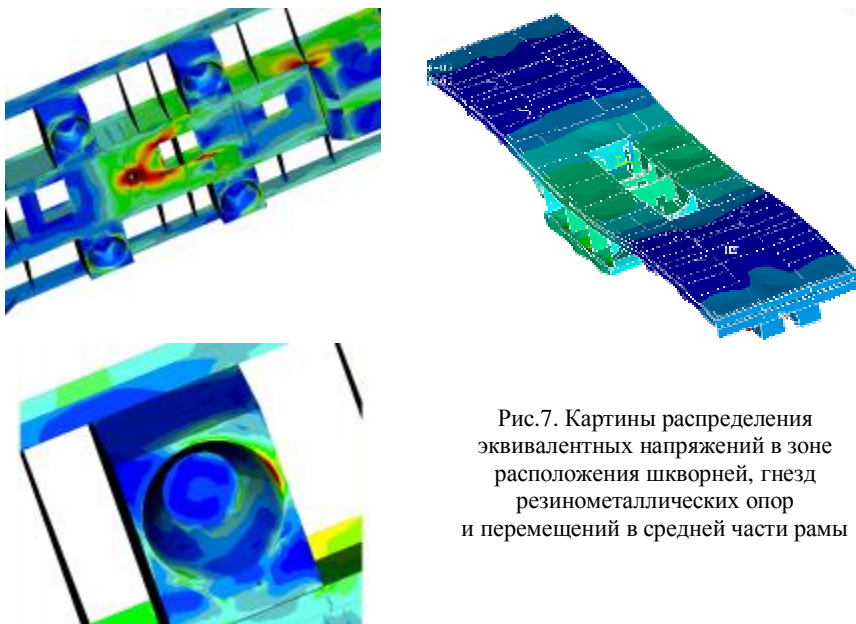


Рис.7. Картины распределения эквивалентных напряжений в зоне расположения шкворней, гнезд резинометаллических опор и перемещений в средней части рамы

**Список литературы. 1.** *Конструкция и динамика тепловозов* / Под ред. В.Н.Иванова. – М.: Транспорт, 1974. – 336 с. **2.** *Овечников Н.Н. и др.* Расчет несущего кузова тепловоза как стержневой системы с использованием ЭЦВМ // Тр. ВНИТИ. – Вып..129. – 1968. – С.3-39. **3.** *Апанович Н.Г. и др.* Конструкция, расчет и проектирование тепловозов. – М.: Машиностроение, 1969. – 387 с. **4.** *Технические требования к проектируемому локомотивам по условиям прочности, динамики и воздействия на путь.* – М.: Трансжелдориздат, 1964. – 20 с. **5.** *Исследование динамики и прочности вагонов* / Под ред. С.И.Соколова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с. **6.** *Кудрявцев Н.Н., Белоусов В.Н., Сасковец В.М.* Влияние коротких неровностей колес и рельсов на динамические силы и ускорения ходовых частей вагонов. – Тр. ВНИИЖТ. – 1981. – Вып.610. – С.4-23. **7.** *Белоцерковский А.Б.* Случайные колебания и прогнозирование безотказности рам тележек вагонов электропоездов. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Харьков. – 2006. – 170 с. **8.** *Тепловоз 2ТЭ116* / Филонов С.П., Гибалов А.И., Быковский В.Е. и др. – М.: Транспорт, 1985. – 328 с. **9.** *Тепловозы 2ТЭ10М, 3ТЭ10М: Устройство и работа* / Филонов С.П., Заборов А.А., Ренкунас В.В. и др. – М.: Транспорт, 1986. – 288 с. **10.** *Ушквалов В.Ф., Резников Л.М., Иккол В.С., Трубецкая Е.Ю., Редько С.Ф., Залесский А.И.* Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1989. – 240 с. **11.** *Лурье А.И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. **12.** *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

Поступила в редколлегию 08.05.2006