

УДК 624.075:621.18

**А. М. АНУЩЕНКО**, вед. инженер; **А. В. КУЛЬЦЕП**, Doctor of engineering (PhD); **А. Ю. ЩУКИН**, гл. специалист

## ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСКРЕПЛЕНИЯ КАРКАСОВ КОТЛОВ

ООО «ЦВС»

Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 9. Тел.: (812) 327-85-99;

эл. почта: cvs@cvs.spb.su

*Ключевые слова:* каркас, котел, сейсмические воздействия, упругопластические элементы, натурные испытания.

---

*Геометрические параметры упругопластических элементов (УПЭ) раскрепления каркасов паровых котлов могут существенно варьироваться в различных проектах. В связи с этим требуется разработка численных методов проектирования УПЭ, позволяющих без трудоемких и затратных натурных испытаний определять характеристики их работы при сейсмических воздействиях. Приводятся результаты верификации численного моделирования УПЭ в программном комплексе ANSYS с натурными испытаниями, проведенными на базе ЦНИИСК и НПО ЦКТИ.*

---

Упругопластические элементы как средства антисейсмического раскрепления между подвесными паровыми котлами и вертикальными несущими конструкциями каркаса (рис. 1а) широко применяются при проектировании объектов теплоэнергетики в зонах с высоким уровнем сейсмической опасности [1–3].

В качестве одного из вариантов технического решения УПЭ специалистами ООО «ЦВС» предложена конструкция балочного типа коробчатого сечения (рис. 1б), достоинствами которой являются: простота изготовления; удобство монтажа к металлическим конструкциям каркаса (рис. 1в); возможность быстрой замены после пластического деформирования при сейсмическом воздействии, отсутствие специальных требований по обслуживанию в период эксплуатации [3].

Указанные УПЭ могут иметь различные геометрические параметры (длина, сечение) в зависимости от компоновки системы «каркас-котел», параметров конструкций, к которым осуществляется их крепление, уровня сейсмических нагрузок.

Характеристики упругой и пластической работы УПЭ определяют эффективность его работы при сейсмическом воздействии [2] и должны быть определены для проведения расчетных обоснований сейсмостойкости каркасов подвесных паровых котлов.

Наиболее надежным методом определения указанных характеристик УПЭ является метод натурных испытаний образцов, достаточно затратный и трудоемкий, а в условиях вариантного проектирования с неоднократным изменением параметров, практически нереализуемый на практике. Поэтому целесообразно использовать численное моделирование в программных комплексах, реализующих метод конечных элементов.

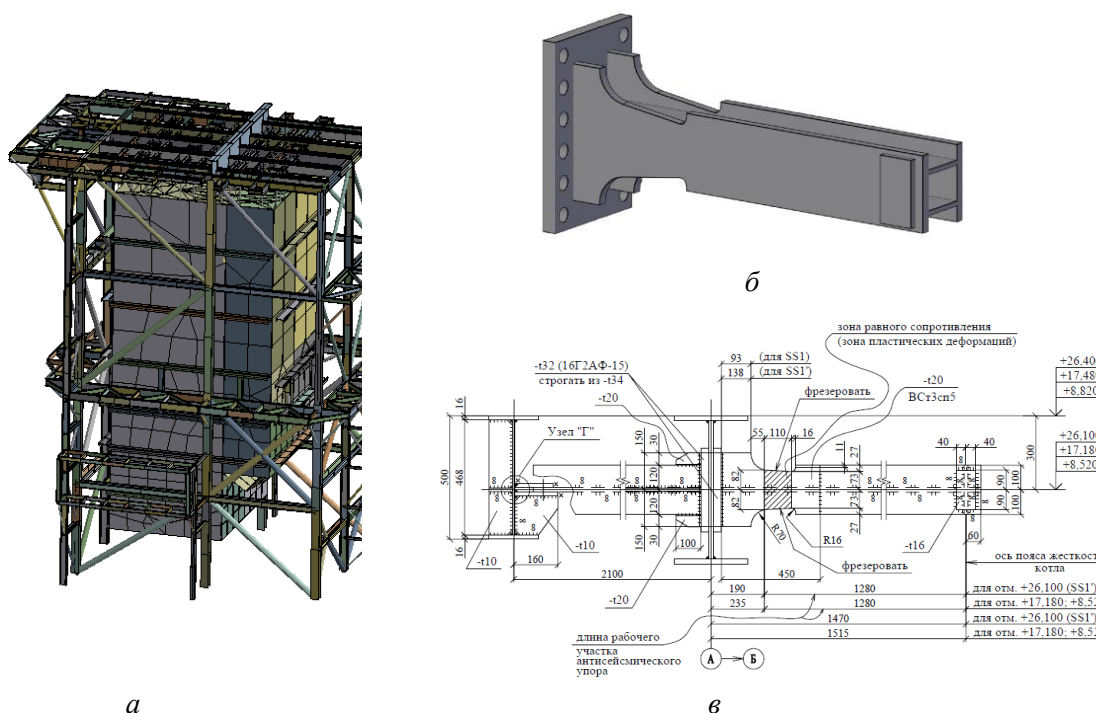


Рис. 1. Уругоупругий элемент раскрепления каркаса и котла: *а* – раскрепляемая система «каркас-котел»; *б* – 3D-визуализация УПЭ; *в* – вариант узла крепления УПЭ к каркасу

В настоящей статье рассматриваются результаты верификации численного моделирования УПЭ в программном комплексе *ANSYS* с данными серий натурных циклических испытаний образцов УПЭ [4] в режиме жесткого знакопеременного нагружения для различных амплитуд деформаций, которые проводились ЦНИИСК и НПО ЦКТИ в 1980–1990 гг. Квазистатический характер нагружения натурных образцов был выбран с учетом низкочастотного характера колебаний котла при сейсмике (0.1 – 0.5 Гц) и слабого отличия динамических характеристик элементов от характеристик при статическом нагружении.

В результате испытаний было установлено, что при проектных амплитудах колебаний УПЭ способны выдерживать до 40 циклов нагружения, что обеспечивает надежную работу в условиях сейсмического воздействия. Подтверждена возможность запроектной работы УПЭ: при двукратном увеличении проектной амплитуды количество циклов составляет 7–9; при четырехкратном увеличении проектной амплитуды количество циклов составляет 1,5.

Испытания ЦНИИСК проводились для УПЭ с двутавровым равнопрочным по длине сечением. Один конец УПЭ имел жесткое защемление, второй конец получал смещения посредством перемещения активного захвата силовой машины. Циклическое нагружение производилось при скорости 70 мм/мин. Испытания проводились для 3 амплитуд: 125 (проектная амплитуда колебаний); 250; 500 мм.

По результатам испытаний был сделан вывод о том, что применение сечений открытого профиля приводит к потере местной и общей устойчивости (рис. 2а), снижает стабильность работы УПЭ. Цикл деформаций консольных УПЭ имеет симметричный характер.

**К СТАТЬЕ А. М. АНУЩЕНКО, А. В. КУЛЬЦЕПА, А. Ю. ЩУКИНА  
 «ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ  
 УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСКРЕПЛЕНИЯ  
 КАРКАСОВ КОТЛОВ»**

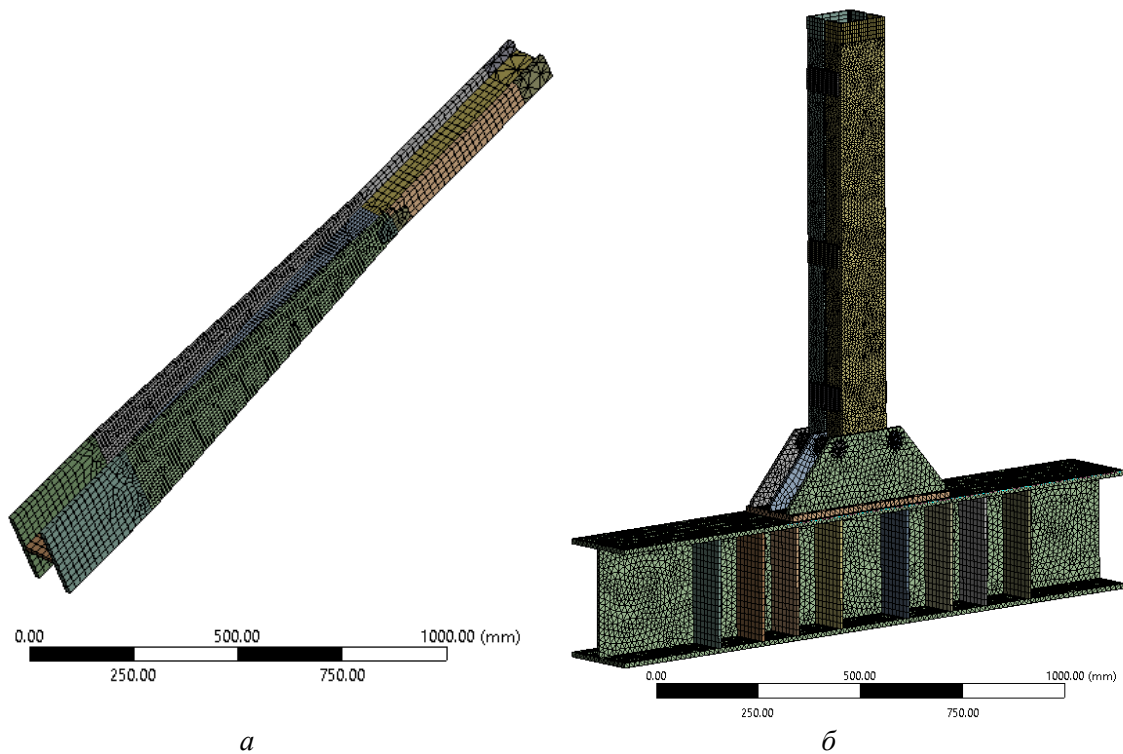


Рис. 1. Расчетные модели УПЭ (сетка конечных элементов): *а* – равнопрочный УПЭ; *б* – УПЭ коробчатого сечения из 2 швеллеров № 30 с опорной балкой

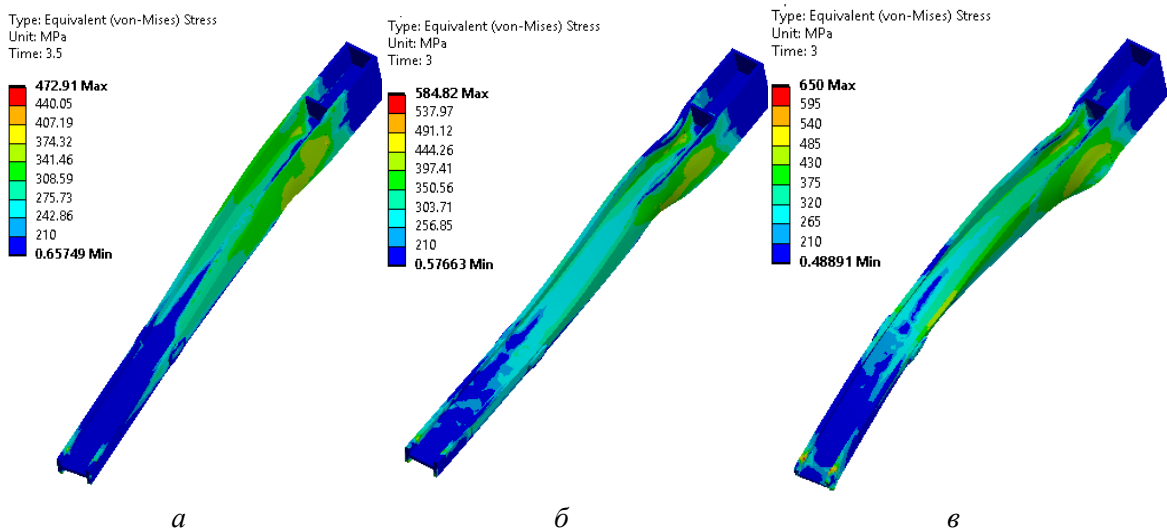
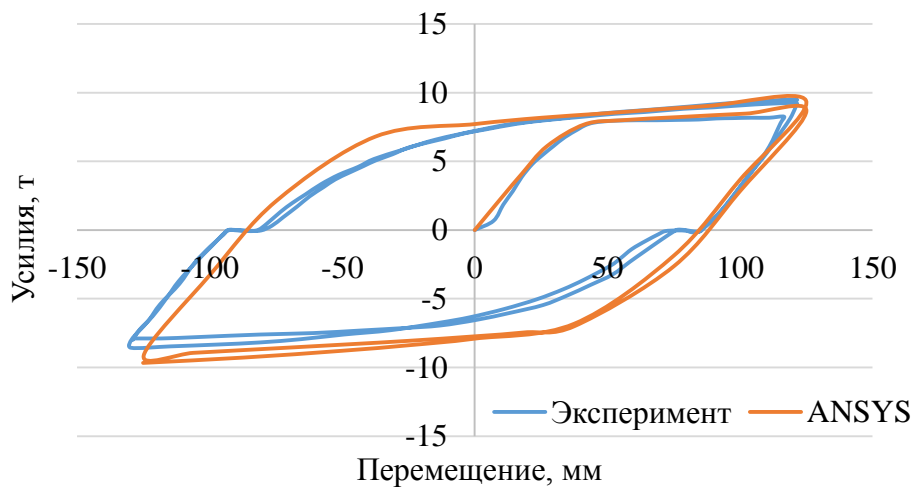
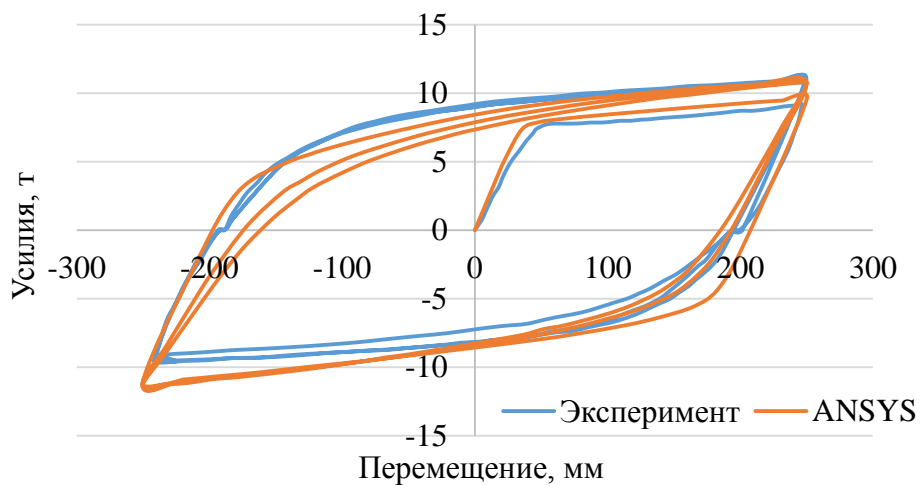


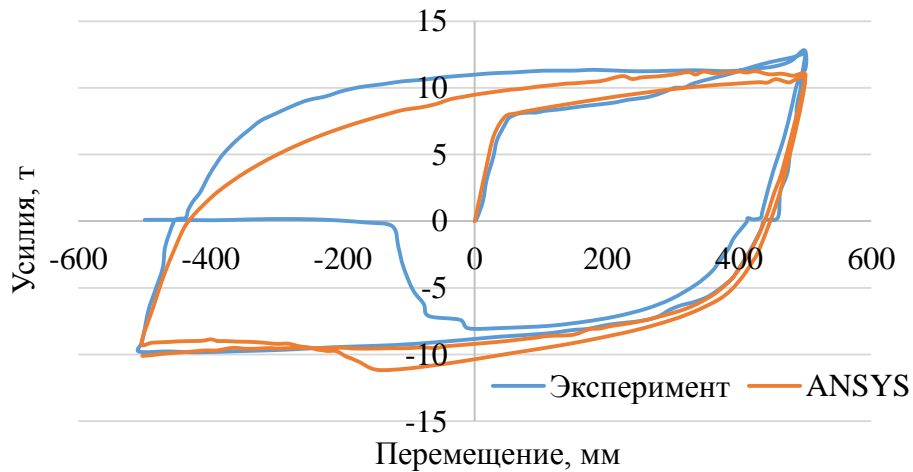
Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние моделей равнопрочных УПЭ при численном моделировании: *а* – амплитуда 125 мм; *б* – амплитуда 250 мм; *в* – амплитуда 500 мм



*a*



*b*



*v*

Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования в ANSYS и натурных испытаниях, проведенных ЦНИИСК для равнопрочных УПЭ консольного типа: *a* – циклы жесткого нагружения при амплитуде 125 мм; *b* – циклы жесткого нагружения при амплитуде 250 мм; *v* – циклы жесткого нагружения при амплитуде 500 мм

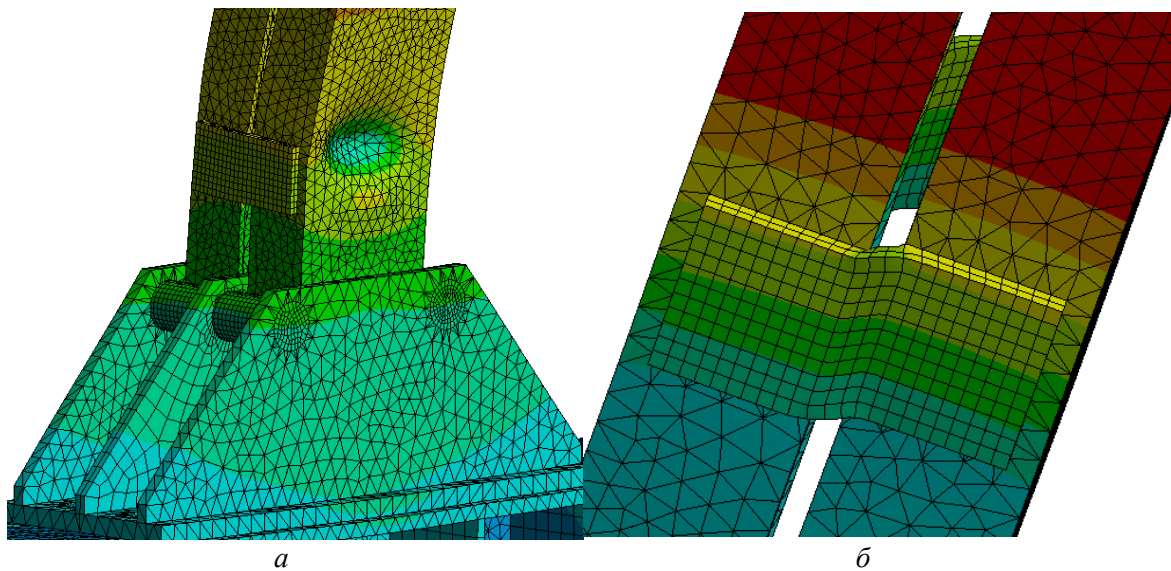


Рис. 4. Характер деформаций УПЭ коробчатого сечения в зонах развития пластических деформаций: *a* – в зоне заделки; *б* – в зоне соединительных пластин

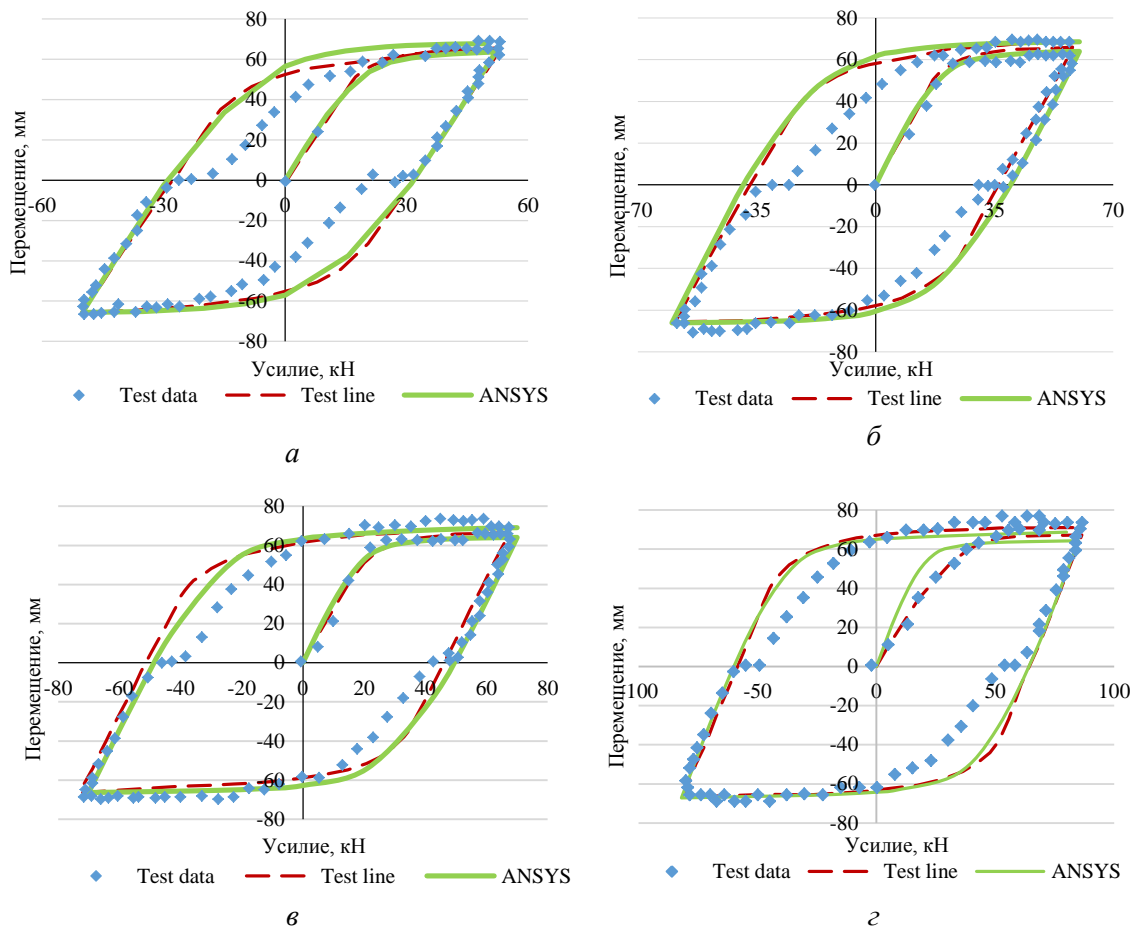


Рис. 5. Сравнение результатов численного моделирования в ANSYS и натурных испытаниях, проведенных НПО ЦКТИ, для УПЭ коробчатого сечения: *a* – циклы жесткого нагружения при амплитуде: *a* – 50 мм; *б* – 60 мм; *в* – 70 мм; *г* – 80 мм

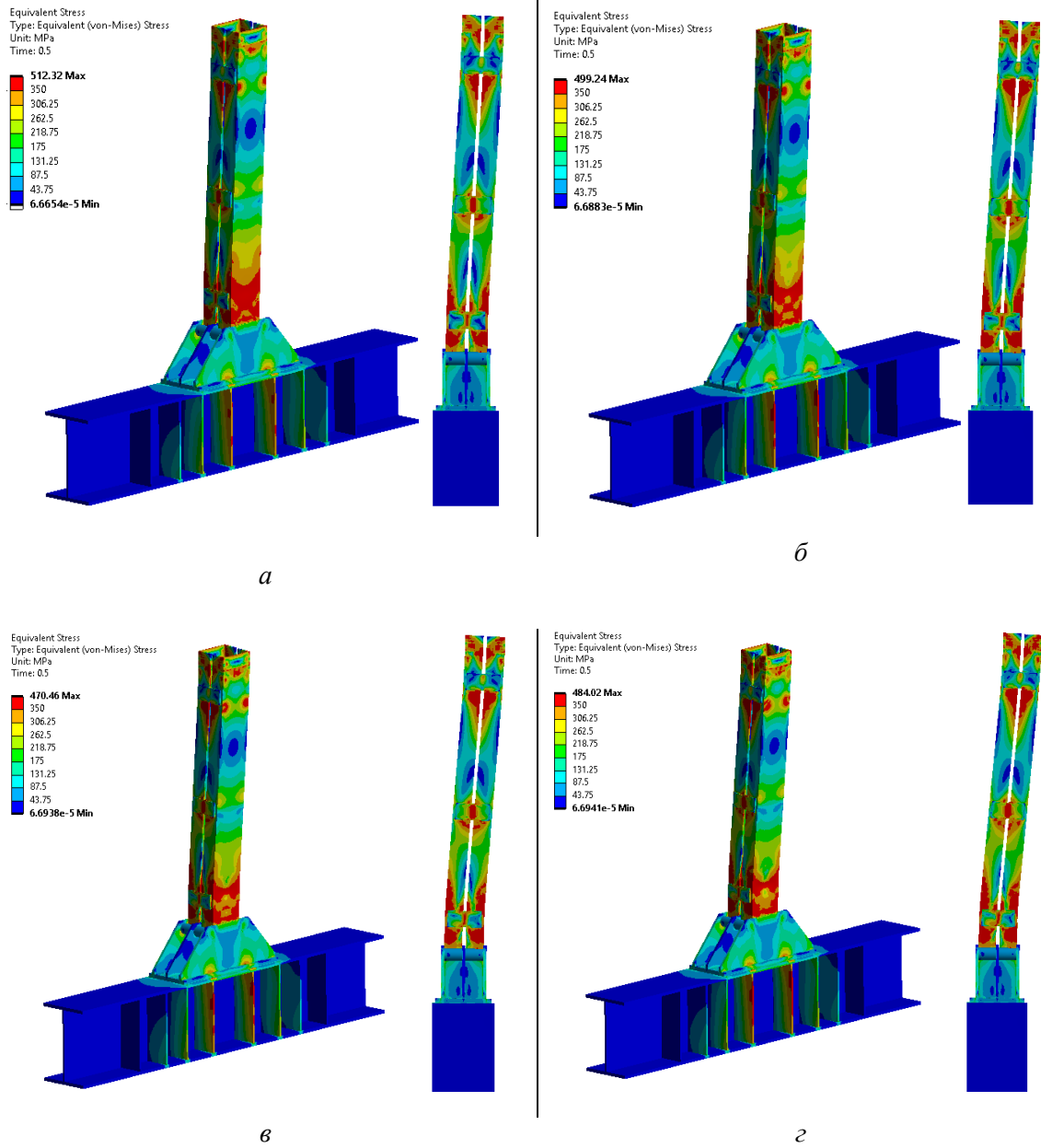


Рис. 6. Распределение напряжений в УПЭ коробчатого сечения и опорной балке с выделением зон пластических деформаций (красный цвет) на первом цикле нагружения до максимальной амплитуды: *a* – 50 мм; *б* – 60 мм; *в* – 70 мм; *г* – 80 мм



Испытания НПО ЦКТИ проведены для масштабной модели УПЭ коробчатого сечения из двух швеллеров № 30, который мог применяться для раскрепления котлов типа П-81 и ТГМП-344. УПЭ устанавливался на балке, имитирующей элемент каркаса (рис. 2б). В горизонтальном направлении балка соединялась с силоизмерительным устройством, позволявшим фиксировать передаваемое горизонтальное усилие от УПЭ при нагружении его консольного конца силовой машиной. Испытания проводились для 4 рабочих амплитуд: 50, 60, 70, 80 мм. Циклическое нагружение производилось с частотой 0,25 Гц, которая обеспечивала соответствие модельной скорости загрузки элемента реальным значениям.

Для всех образцов пластическая деформация сечения имела закономерный характер и проявлялась в виде выдавливания стенки швеллера, вдавливания полок (рис. 2в). Основная зона пластической деформации находилась в зоне заделки и имела размер 50–70 мм по высоте.

При испытаниях особенности оснастки и испытательных машин приводили к появлению люфтов, которые должны быть исключены из общего хода при анализе экспериментальных данных.

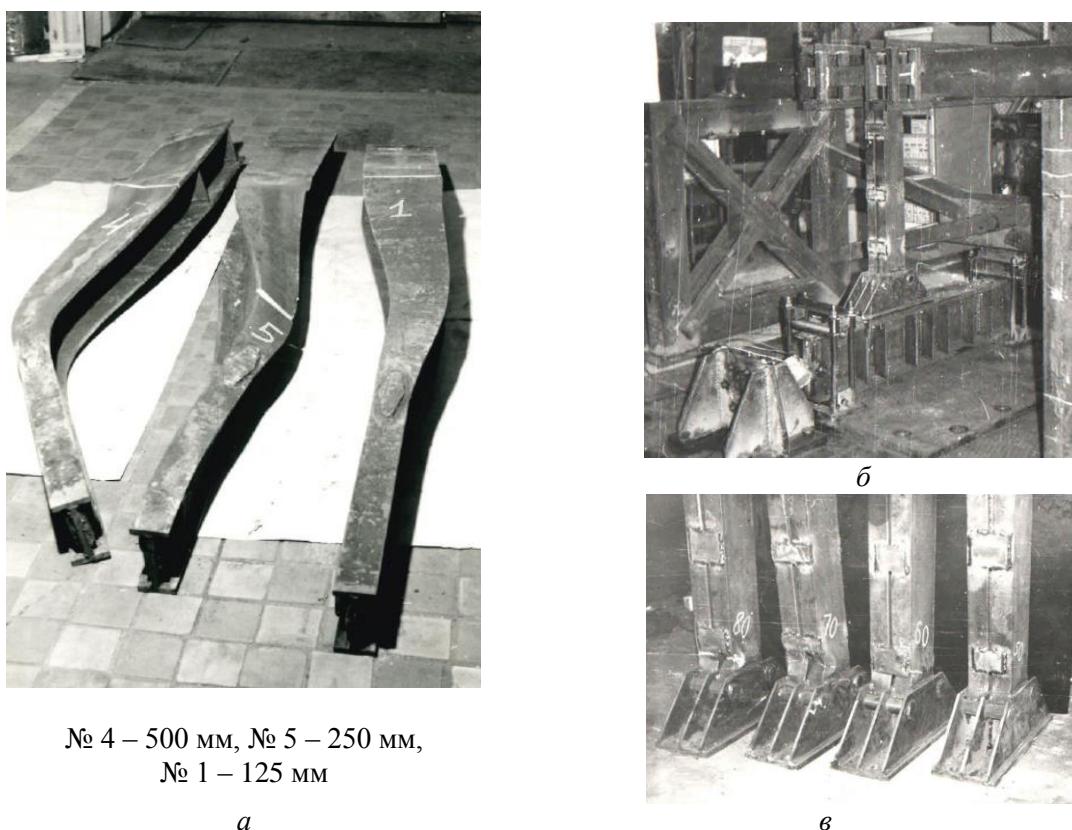


Рис. 2. Испытания УПЭ на базе ЦНИИСК и НПО ЦКТИ [4]: *a* – равнопрочные УПЭ после испытаний; *б* – испытание коробчатого УПЭ; *в* – коробчатые УПЭ после испытаний

Численное моделирование работы УПЭ осуществляется в программном комплексе ANSYS (рис. 1 цв. вклейки). Построение моделей производится в модуле *Design Modeler* с возможностью использования в дальнейшем объектно-



ориентированных средств управления задаваемыми геометрическими параметрами. Геометрические размеры сечений расчетных моделей соответствуют реальным геометрическим параметрам испытанных образцов. Сетки конечных элементов выполнены в сеточном препроцессоре *ANSYS Meshing* на основе гекса-, тетра- и призматических элементов [5].

Анализ результатов натурных испытаний [4] указывает на соответствие характера деформирования УПЭ билинейной модели с изотропным упрочнением. При задании характеристик материалов моделей в *ANSYS* выбирается параметр *Bilinear Isotropic Hardening*, задаются величины пределов текучести и прочности для стали [5].

Решение нелинейной задачи выполняется в модуле *Static Structural* с использованием метода Ньютона-Рафсона, минимальные величины шагов приращения нагрузки заданы на уровне 0,005 с. Циклическое нагружение моделируется путем задания амплитуд смещения консольного конца модели УПЭ в зависимости от времени в виде табличных данных для пошагового нагружения [5].

По результатам численного моделирования были получены данные о напряженно-деформированном состоянии УПЭ (рис. 2 – 6 цв. вклейки).

Характер деформаций равнопрочных УПЭ, полученный по результатам численного расчета (рис. 2 цв. вклейки), имеет хорошее качественное соответствие результатам испытаний натурных образцов (рис. 2а): наблюдаются явления потери местной и общей устойчивости. Графики зависимости «усилие – смещение» (рис. 3 цв. вклейки) достаточно хорошо соотносятся друг с другом: для амплитуд 125 и 250 мм максимальное усилие в УПЭ имеет расхождение менее 1 %, для амплитуды 500 мм расхождение составило порядка 15 %, что связано с невозможностью точного воспроизведения поведения консольного конца УПЭ в зоне захвата силовой машины, где на деформации оказывают влияние имеющиеся зазоры.

Зоны и характер деформаций коробчатых УПЭ, полученные по результатам численного расчета (рис. 4, 6 цв. вклейки), соответствуют данным натурных испытаний (рис. 2в). Графики зависимости «усилие – смещение» (рис. 5 цв. вклейки) показывают высокую качественную сходимость характера деформирования модели УПЭ с натурными образцами как по величинам упругой жесткости, так и по величинам максимальных усилий и энергии цикла деформации.

#### **Выводы:**

1. Численное моделирование УПЭ с применением модели билинейного изотропного упрочнения показывает хорошую качественную сходимость результатов с данными натурных испытаний. Соответствие результатов наблюдается по параметрам фиксируемой величины упругой жесткости; максимального усилия, воспринимаемого элементом; суммарной энергии цикла.

2. Численное моделирование может использоваться при проектировании новых образцов УПЭ с требуемыми согласно конкретному проекту параметрами сечений.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Elasto-plastic finite element analysis of long-lived seismic ties for thermal power boiler structure / K. Aida, S. Morikawa, M. Shimono and others // Proceedings of the ASME





2017 Pressure Vessels and Piping Conference. PVP201-65665. – URL: <https://doi.org/10.1115/PVP2017-65665>.

2. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation / A. Javanmardi, Z. Ibrahim, K. Ghaedi and others // Archives of Computational Methods in Engineering, March 2019. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09329-9>.

3. Анущенко, А. М. Инженерный подход к оценке сейсмостойкости систем «каркас-котел» с применением элементов пассивной сейсмозащиты при контрольном землетрясении / А. М. Анущенко, А. В. Кульцеп, А. Ю. Щукин. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 1. – С. 21–27.

4. Разработка узлов раскрепления для обеспечения сейсмостойкости котлов подвешенного типа (договор № 459-89 от 11.09.89). Экспериментальное исследование моделей ЭП и определение их технических характеристик. Примеры применения ЭП для обеспечения сейсмостойкости подвешенных котлов (договор № 924-88 от 01.12.88) : отчет по научно-исследовательской работе / НПО ЦКТИ. – Санкт-Петербург, 1992. – Текст : непосредственный.

5. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захаров. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 210 с. – ISBN 978-5-97060-425-0. – Текст : непосредственный.

**ANUSHCHENKO Aleksandr Mikhaylovich, Lead Engineer; KULTSEP Aleksandr Vladimirovich, Doctor of engineering (PhD); SHCHUKIN Aleksandr Yurievich, Head Specialist**

#### **VERIFICATION OF NUMERICAL MODELING METHOD OF HYSTERESIS RELEASE ELEMENTS FOR BOILER FRAMES**

LLC “CVS”

Russia, 195220, Saint-Petersburg, Gzhatskaya St. 9. Tel.: +7 (812) 327-85-99; e-mail: [cvc@cvs.spb.su](mailto:cvc@cvs.spb.su)

*Key words:* frame, boiler, seismic impacts, hysteresis dampers, field tests.

---

*The geometric parameters of hysteresis elements for loosening the frames of steam boilers can vary significantly in different projects. In this regard, it is necessary to develop numerical methods for designing hysteresis elements, which make it possible to determine the characteristics of their operation under seismic impacts without time-consuming and costly field tests. The article presents verification results of numerical modeling of hysteresis elements in the ANSYS software package with field tests conducted on the basis of CNIISK and NPO CKTI.*

---

#### REFERENCES

1. Aida K., Morikawa S., Shimono M., Kato M., Morishita K., Amano T. Elasto-plastic finite element analysis of long-lived seismic ties for thermal power boiler structure. Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. PVP201-65665. [<https://doi.org/10.1115/PVP2017-65665>].

2. Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Ghadim H. B., Hanif M. U. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation. Archives of Computational Methods in Engineering. March 2019. [<https://doi.org/10.1007/s11831-019-09329-9>].



3. Anushchenko, A. M. Inzhenernyj podhod k ocenke seysmostojkosti sistem «karkas-kotel» s primeneniem elementov passivnoj sejsmozashchity pri kontrol'nom zemletryasenii / A. M. Anushchenko, A. V. Kul'cep, A. Yu. Shchukin. – Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – 2023. – № 1. – P. 21–27.

4. Otchet po nauchno-issledovatel'skoy rabote «Razrabotka uzlov raskrepleniya dlya obespecheniya seysmostoykosti kotlov podvesnogo tipa (dogovor №459-89 ot 11.09.89)» «Eksperimentalnoye issledovaniye modeley EP i opredeleniye ikh tekhnicheskikh kharakteristiki. Primery primeneniya EP dlya obespecheniya seysmostoykosti podvesnykh kotlov (dogovor №924-88 ot 01.12.88)». NPO TsKTI. Sankt-Peterburg. 1992.

5. Fedorova. N. N. Osnovy raboty v ANSYS 17 / N. N. Fedorova, S. A. Valger, M. N. Danilov. Yu. V. Zakharov. – M.: DMK Press. 2017. – 210 p.

© **А. М. Анущенко, А. В. Кульцеп, А. Ю. Щукин, 2024**

Получено: 29.04.2024 г.