

consumers can assess their energy efficiency, understand the implications of their consumption habits, and make informed decisions to optimize their energy use.

This consumer-centric approach to energy management emphasizes the importance of evaluating energy efficiency based on key indicators. These indicators include the comparative energy consumption per product unit, which provides insights into the energy efficiency of production processes; energy wastages, which highlight areas for improvement and potential cost savings; and environmental impacts, which emphasize the broader ecological implications of energy consumption.

Integral to this discussion is the proposed Digital System for Assessing Energy Resource Efficiency (DSAERE). Developed within the scope of this dissertation, the DSAERE aims to be a comprehensive tool for evaluating energy efficiency. It has been meticulously designed to focus on the primary indicators mentioned above, ensuring a holistic approach to energy management. By harnessing the power of digital technologies and AI, the DSAERE promises to be an invaluable asset for both consumers and the energy industry at large, fostering a future of sustainable and efficient energy consumption.

REFERENCES

1. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. – Ташкент: Fan vatexnologiya, 2021. – 923 с.
2. Аллаев К.Р. Электроэнергетика Узбекистана и мира. – Ташкент: Fan vatexnologiya, 2009. – 463 с.
3. <https://www.theworldcounts.com/>
4. <https://yuz.uz/news/elektr-energiyasi-taminoti-muammo-bor-echim-ham>
5. Reis J., Amorim M., Melao N., Cohen Yu., Rodrigues M. Digitalization // A Literature Review and Research Agenda. – 2020. 10.1007/978-3-030-43616-2_47 p.
6. Marnay C., La, J., Stadler M., Siddiqui, A. Advances in the economics of energy systems and environmental policies: A homage to Welling (Willem) C. Boer // Energy. – 2012. – 37(1). – P. 1–6.
7. Mirzaei P.A., Azar A. A review of the role of energy monitoring and targeting in improving industrial energy efficiency // Journal of Cleaner Production. – 2019. –Vol. 216. – P. 429–440.
8. about.bnef.com
9. iea.org
10. Kulkarni S.S., Bhat S.R., Hunagund P.V. Artificial Intelligence-based Energy Management and Monitoring System: A Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 577, no. 1. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/577/1/012130>
11. Ramalingam G., Meikandasivam S., Vijayakumar D. Comparison of Smart Energy Monitoring Systems in Real-time for Future Smart Grid. – 2019.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТА НА ВЫБОР ТИПА ЗАХВАТА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ БЛОКОВ

А.Э. Риф

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. АЗ-05*

Научный руководитель: А.О. Павлюк, к.ф.-м.н., и.о. директора НИЦ ВЭ ТПУ

К данному моменту на территории Российской Федерации были остановлены все промышленные уран-графитовые реакторы, а также часть блоков с энергетическими реакторами типа АМБ, АМ, ЭГП-6 и РБМК. До сих пор находятся в эксплуатации 8 энергоблоков РБМК и 3 ЭГП-6. При этом основным вариантом вывода из эксплуатации энергетических и некото-

рых промышленных уран-графитовых реакторов (далее – УГР) является «немедленный демонтаж», который предполагает полное демонтирование конструкций реактора, в том числе и графитовой кладки.

Все УГР имеют схожие конструктивные особенности и элементы, однако устройство каждого УГР обладает различиями, которые оказывают существенное влияние на технологические подходы к их демонтажу. С одной стороны, особенности реакторов заключаются в их металлоконструкциях, способах размещения блоков в графитовой кладке, размерами самих блоков и их внутренних отверстий. С другой стороны, необходим учет состояния графитовых кладок после длительной эксплуатации, так как под радиационно-термическим воздействием происходит деформирование и искривление графитовых колонн, изменение физико-механических свойств графита как материала, образование трещин [1]. Данные изменения необходимо учитывать при разработке устройств, позволяющих проводить демонтаж графитовых кладок [2].

В России и мире в настоящее время разрабатываются различные устройства для извлечения блоков из графитовых кладок. Однако в силу технологической сложности процесса накоплен лишь небольшой практический опыт ликвидации УГР. Таким образом, остается актуальной задача разработки эффективного устройства захвата и извлечения блоков из графитовой кладки УГР.

Целью данного исследования является определение влияния изменений физико-механических свойств графита после длительного периода эксплуатации на выбор типа устройства захвата и извлечения графитовых блоков. Для достижения данной цели был проведен анализ влияния изменений свойств графита в процессе эксплуатации на подходы к его извлечению, созданы 3D-модели трех типов захвата на основе прототипов устройств, разработанных в РФ, оценены создаваемые напряжения в графитовых блоках. Результаты исследования позволяют определить эффективный подход к демонтажу графитовых кладок российских УГР после длительного периода эксплуатации.

3D-модель цангового захвата позволяет оценить, какие средние напряжения могли возникнуть в графитовом блоке при локальных воздействиях (рис. 1).

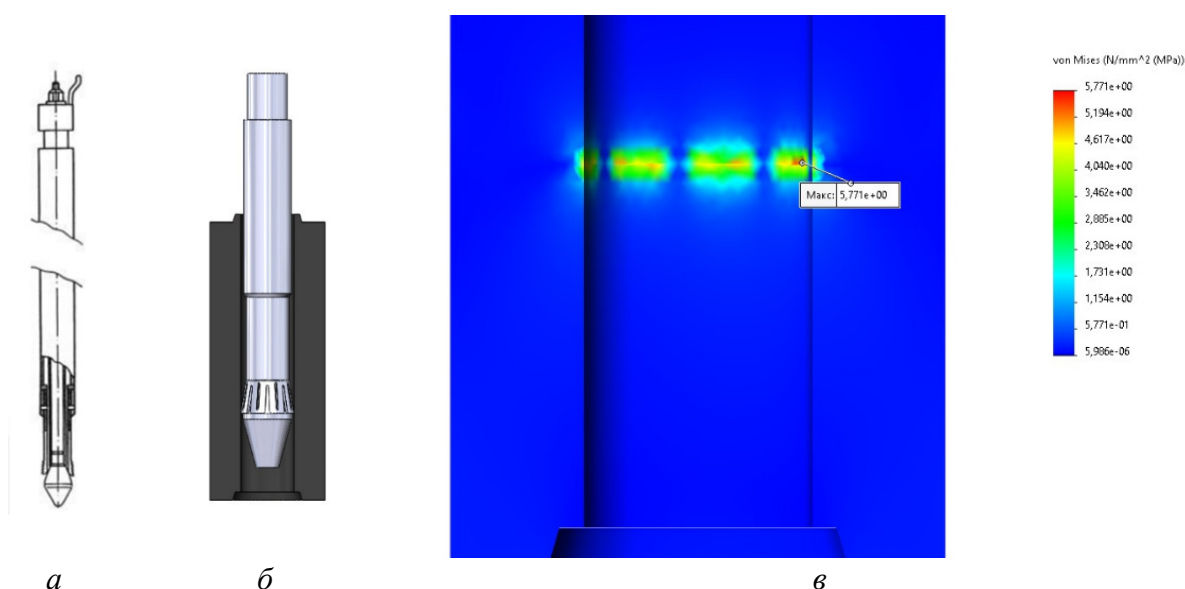


Рис. 1. Цанговый захват:
а – конструкция цангового захвата; б – 3D-модель захвата внутри блока;
в – результаты анализа напряжений

Особенностью такого захвата является создание механического воздействия на внутреннее отверстие графитового блока по небольшим площадям, что значительно повышает риск разрушения блока.

Максимальное напряжение под воздействием цанги изнутри на графитовый блок по площади соприкосновения составляет 5,8 МПа. Предел прочности необлученного графита в направлении экструзии составляет 7,6 МПа, по горизонтали – 6 МПа. Однако в процессе окисления на всем протяжении эксплуатации реактора АМБ, предел прочности графита мог быть значительно снижен (вплоть до 50 %), что и привело к разрушению и осыпанию отдельных блоков. Таким образом, данный опыт показал, что цанговый тип захвата не подходит для захвата и извлечения графитовых блоков, находящихся длительное время в эксплуатации.

Приведенный опыт позволяет сделать вывод, что для нефрагментированных графитовых блоков более целесообразно использовать устройства, исключая локальное влияние на внутреннее отверстие блока. Поэтому в ОДЦ УГР были испытаны 2 устройства, более совершенных по сравнению с цанговым: резиновый (рис. 2) и кулачковый захват (рис. 3) [3].

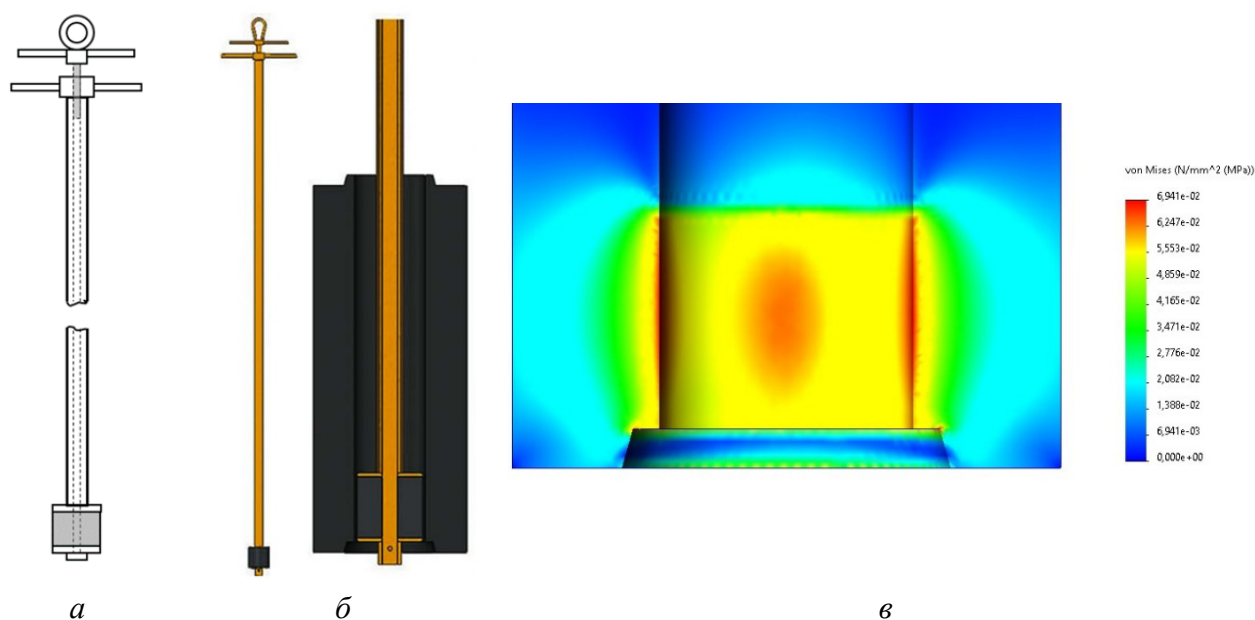


Рис. 2. Резиновый захват:
а – конструкция резинового захвата; б – 3D-модель захвата внутри блока;
в – результаты анализа напряжений

Данные типы захватов характеризуются низкими значениями максимальных напряжений (резиновый – 0,07 МПа, кулачковый – 1,9 МПа), снижением пылеобразования и рисков дополнительного растрескивания и фрагментации блоков. Однако для резинового захвата на данном этапе необходимо обоснование влияния облучения на материал распорного наконечника (резину), кулачковый захват при этом полностью выполнен из стали, что не требует дополнительных исследований.

Приведенные устройства были успешно протестированы на макетных испытаниях, кулачковый захват впоследствии был опробован при извлечении графитовых блоков из кладки ПУГР АДЭ-5. Устройства показали свою работоспособность и эффективность, а, следовательно, могут быть применены при извлечении блоков в промышленных масштабах.

Таким образом, данное исследование показало, что на условия применения устройств извлечения оказывают влияние не только конструктивные особенности УГР, но и состояние

графитовой кладки за длительный период эксплуатации. Необходим учет изменения характеристик графита как материала в процессе его облучения, особенно там, где имеет место окисление графита, приводящее к его ускоренной деградации. Разрабатываемые устройства должны исключать локальное механическое воздействие на внутреннюю поверхность отверстия (место локализации внутренних напряжений графита), действовать в направлении экструзии (выше предел прочности), а также само устройство должно состоять из материалов, не подвергающихся негативному влиянию облучения.

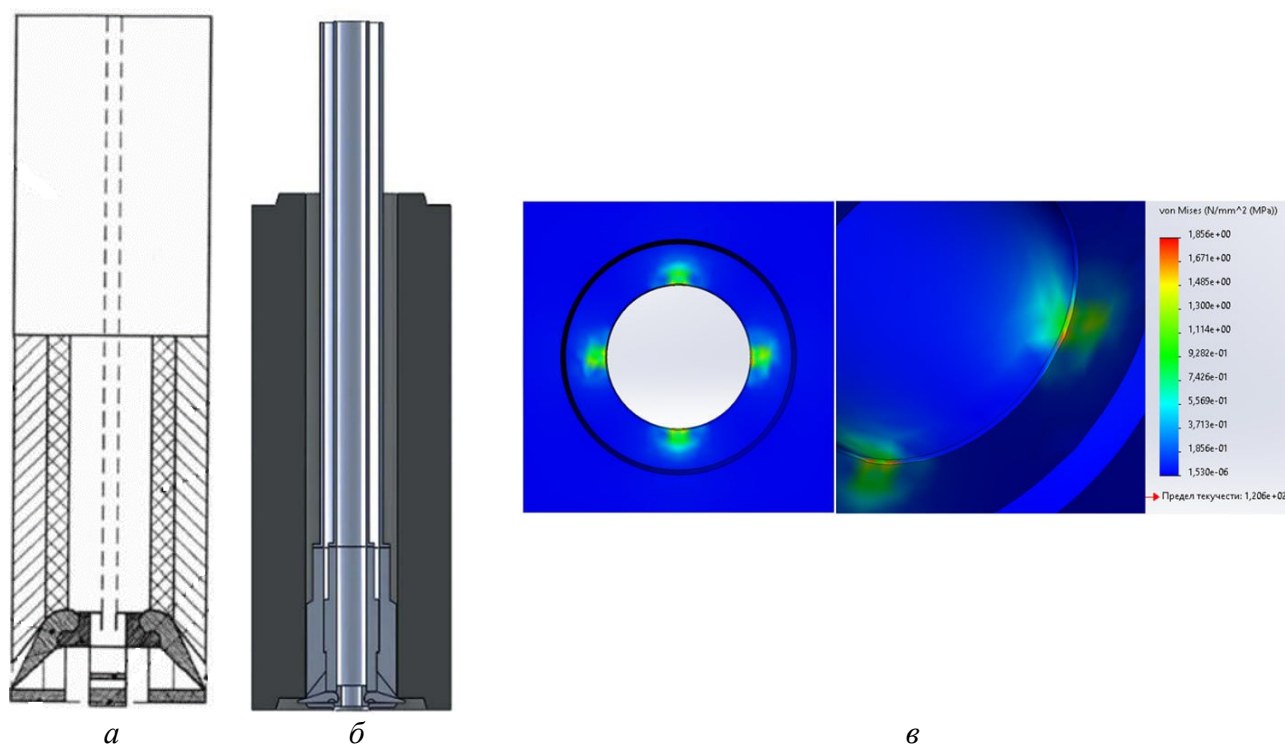


Рис. 3. Кулачковый захват:
а – конструкция кулачкового захвата; б – 3D-модель захвата внутри блока;
в – результаты анализа напряжений

На основе данного исследования в перспективе предполагается изучение механических воздействий на графитовые блоки, содержащие трещины или находящиеся в фрагментированном состоянии. А также разработка новых устройств и подходов к демонтажу графитовых кладок.

Работа выполнена в рамках программы *Приоритет 2030* (проект № *Приоритет -2030-НИИ/ЭБ-039-375-2023*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виргильев Ю.С., Селезнев А.Н., Свиридов А.А., Калягин И.П. Реакторный графит: разработка, производство и свойства // *Промышленные углеродные материалы*. – 2006. – № 1. – С. 4–12.
2. Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Беспала Е.В., Риф А.Э., Кан Р.И. Зарубежный опыт и подходы к извлечению графита из уран-графитовых реакторов // *Радиоактивные отходы*. – 2023. – № 2 (23).
3. Патент РФ 2741765. Способ характеристики графитовых блоков ядерного реактора и устройство для его осуществления / Павлюк А.О., Кан Р.И., Котляревский С.Г., Михайлец А.М., Шевченко О.М., Шевченко А.О. Заявитель и патентообладатель Госкорпорация «Росатом» № 2020120170; заявл. 11.06.2020; опубл. 28.01.2021. Бюл. 4