

---



---

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**


---



---

УДК 621.039.546

## АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНЫ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ

© 2021 А. А. Лапкис, А.Н. Безматъева, Е.А. Абидова

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.

В работе рассматривается возможность анализа деформированного состояния комплекта кассет ВВЭР-1000 с помощью системы управления машины перегрузочной. На основании данных, полученных при перегрузке топлива на действующей АЭС, построено типовое распределение сил трения по высоте активной зоны реактора ВВЭР-1000 при перемещении кассет различного срока облучения и поглощающих стержней.

*Ключевые слова:* ВВЭР, ядерное топливо, перегрузка топлива, машина перегрузочная, весоизмерительное устройство, затирание, распухание.

Поступила в редакцию 24.01.2021

После доработки 24.02.2021

Принята к печати 02.03.2021

### Общие положения

Деформации ядерного топлива при облучении в реакторе оказывают существенное влияние на безопасность эксплуатации и длительность перегрузки ядерных реакторов.

При воздействии внешних сил изгиб тепловыделяющих сборок (ТВС) является суммой изгибов двух форм: продольного изгиба – от действия осевой силы блока защитных труб (БЗТ) реактора, и поперечного изгиба – от действия нагрузок на дистанционирующие решетки (рис. 1).

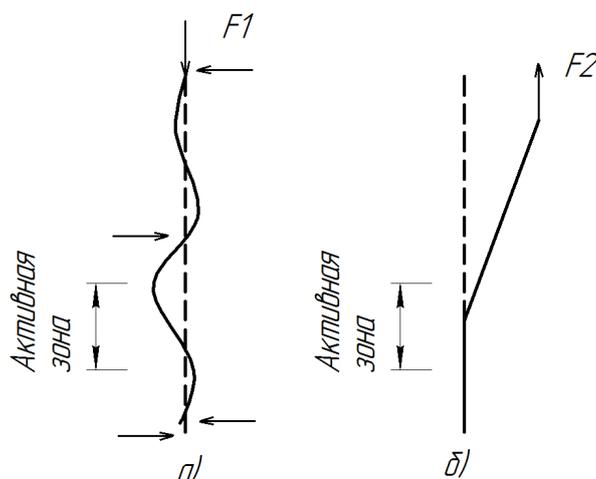


Рисунок 1 – Силы, действующие ТВС реактора ВВЭР-1000: а) с фиксацией сборки на трех уровнях по высоте, где  $F_1$  – усилие от сжатия ТВС БЗТ; б) сборки не фиксированы, где  $F_2$  – тянущее усилие от привода захвата рабочей штанги (ЗРШ) [Forces acting on WWER-1000 fuel assemblies: a) with assembly fixation at three levels in height, where  $F_1$  is the force from compression of thermal control protective tubes of fuel assemblies; b) assemblies are not fixed, where  $F_2$  is the pulling force from the drive of working rod gripper]

При этом возможность выявить и оценить количественно деформированное состояние ТВС появляется только при послереакторных исследованиях. [1-8].

Типовая форма деформированной ТВС при отсутствии поджатия сверху получена для топлива реакторов типа БН и приведена на рисунке 2 [2]. Такой случай соответствует состоянию топлива при перегрузке топлива.

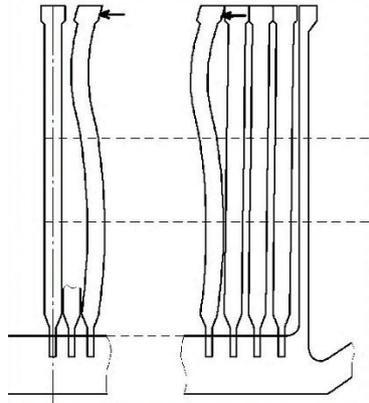


Рисунок 2 – Деформированная форма топлива в отсутствие поджатия сверху  
[Deformed shape of fuel in the absence of compression from above]

Все транспортно-технологические операции с ТВС на энергоблоке ВВЭР-1000, выполняемые машиной перегрузочной, проводят в сопровождении контроля веса на захвате рабочей штанги (ЗРШ) [9-10], который зависит от:

- числа движущихся секций (только первая секция с ЗРШ или первая и средняя секции);
- наличия перегружаемого изделия в ЗРШ (пустой захват, ТВС, пробка, чехол кластера или другой инструмент);
- внешних усилий, действующих на перегружаемое изделие;
- наличия и уровня воды в зоне обслуживания МП.

Весоизмерительное устройство расположено на площадке приводов тележки МП. Его сигналы используются для информирования оператора о наличии изделия в захвате, для формирования разрешений и запретов на перемещения механизмов МП.

Частичная потеря веса при установке перегружаемого изделия и рост весовой нагрузки во время извлечения могут свидетельствовать о появлении дополнительных сил трения. При увеличении сил трения свыше допустимых значений система управления машины перегрузочной (СУМП) останавливает движение ЗРШ. При этом допустимые значения определены без учета естественных изменений весовой нагрузки на захвате при движении ТВС в активной зоне [9-10].

#### **Задачи исследования**

В данной работе рассмотрена возможность косвенной оценки деформированного состояния ТВС и активной зоны по сигналам весоизмерительного устройства МП энергоблока ВВЭР-1000. Такая оценка может быть полезной для определения и корректировки более точных границ веса при нормальном извлечении ядерного топлива из активной зоны перегрузочной машиной. Исходные данные для исследования получены при измерении веса на трехсекционной рабочей штанге, используемой на машинах типа МПС-В-1000. Непосредственные задачи исследования:

- проверить предположение о взаимосвязи весовых нагрузок на ЗРШ с дополнительными силами трения, возникающими между кассетами в АЗ;
- если такая связь обнаружится, оценить ее количественно, и получить типовой высотный профиль сил трения ТВС и ПС СУЗ в активной зоне;
- проанализировать динамику сил трения ТВС в зависимости от их степени выгорания (времени под облучением).

### Анализ сигналов весоизмерительного устройства ЗРШ

Для анализа были выбраны данные, зафиксированные СУМП во время планово-предупредительных ремонтов на действующей атомной станции с реакторами ВВЭР-1000. На рисунках 3 и 4 для примера показаны графики зависимости весовой нагрузки на ЗРШ от его положения:

- для свежих ТВС, устанавливаемых в реактор – рисунок 3;
- для ТВС, облученных в течение трех кампаний и выгружаемых из реактора – рисунок 4.

На рисунках 3 и 4 номер линии соответствует номеру технологической операции по рабочему графику атомной станции.

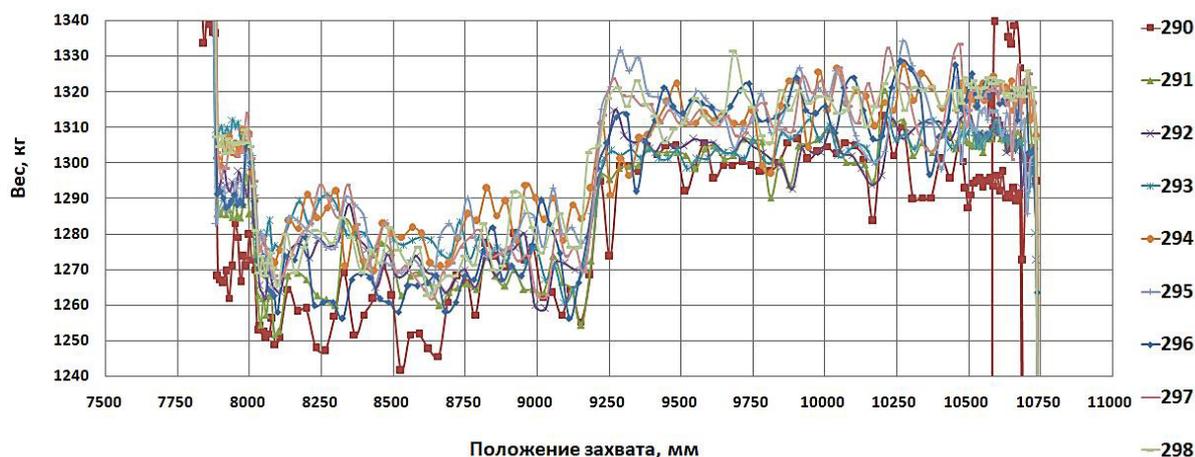


Рисунок 3 – График зависимости весовой нагрузки на ЗРШ от его положения для свежих ТВС при установке в реактор [The graph of the dependence of the weight load on the working rod gripper on its position for fresh fuel assemblies when installed in the reactor]

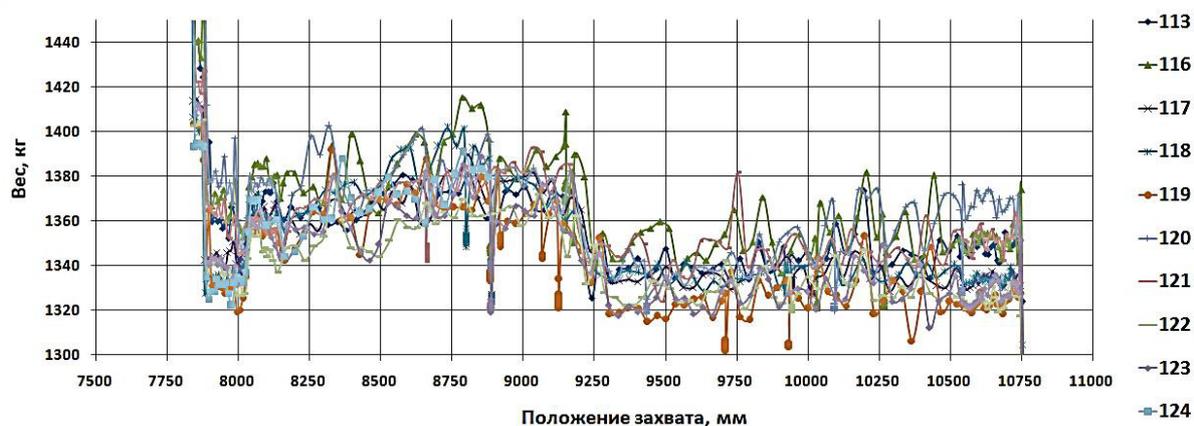


Рисунок 4 – График зависимости весовой нагрузки на ЗРШ от его положения для ТВС, облученных в течение трех кампаний при выгрузке из реактора [The graph of the dependence of the weight load on the working rod gripper on its position for fuel assemblies irradiated during three campaigns during unloading from the reactor]

На графиках значение высотной отметки 10780-10790 соответствует посадке захвата на ТВС, полностью установленную в опорную конструкцию активной зоны; высотная отметка 6600-6700 означает вход или выход ТВС из контакта с соседними кассетами в активной зоне.

Скачкообразное изменение веса на отметке 7750 мм соответствует подхвату или посадке средней секции. Соответствующая высотная схема приведена на рисунке 5.

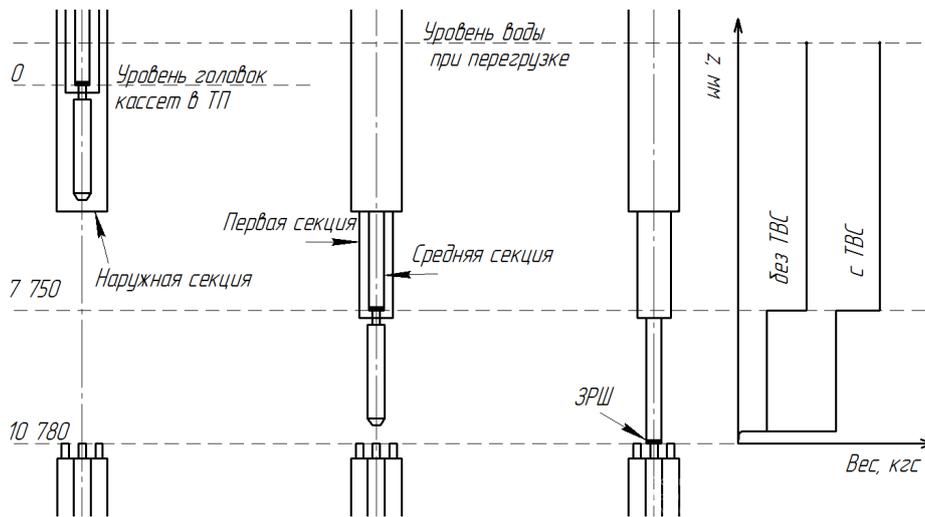


Рисунок 5 – Высотная схема расположения ЗРШ и кассет  
High-altitude layout of working rod gripper and cassettes]

Сопоставление профилей силы трения по АЗ с зарегистрированной скоростью вертикального передвижения захвата позволило заключить, что связи между этими величинами нет. В процессе передвижения захвата его скорость обусловлена требованиями ядерной безопасности и устанавливается минимальной (0,6 м/мин):

- при отрыве хвостовика ТВС от опорной конструкции реактора;
- при подхвате средней секции рабочей штанги МП;
- при выходе хвостовика ТВС из активной зоны.

В остальные моменты скорость устанавливается повышенной (до 1,2 мин в активной зоне и до 6,0 м/мин в слое воды над ней).

Таким образом, трение в комплекте кассет определяется не режимом работы механизма ЗРШ, а исключительно внешними силами, действующими на ТВС. По мере движения кассеты в активной зоне силы трения возрастают в диапазоне высот с 1600 мм до 3000 мм, достигая своего максимального значения на уровне 2200 мм, считая от точки закрепления хвостовика ТВС в активной зоне. Это говорит о том, что деформированная конфигурация тепловыделяющих сборок создает дополнительную силу трения величиной 60-100 кгс, препятствующую установке и извлечению кассет в АЗ.

Для оценки силы трения кассеты в АЗ использована формула (1), учитывающая зафиксированный рост и уменьшение веса при прохождении ТВС в реакторе.

$$2 \cdot F_{\text{тр}} \approx P_{\text{изв}} - P_{\text{уст}} = \Delta P_j, \quad (1)$$

где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения;

$P_{\text{изв}}$  – весовая нагрузка при извлечении ТВС из АЗ (кгс);

$P_{\text{уст}}$  – весовая нагрузка при установке ТВС в АЗ;

$\Delta P_j$  – разность показаний при извлечении и установке;

$j$  – число кампаний, в течение которых топливо выгорало.

Применение такой формулы возможно только для кассет с выгоранием в одну или две кампании, поскольку свежее топливо только устанавливают в АЗ, а топливо, облученное в течение трех кампаний, из нее только извлекают. Чтобы выявить влияние выгорания на силу трения в АЗ, были вычислены дополнительные величины, формулы (2) и (3).

$$\Delta P_{0-1} = P_{\text{уст}0} - P_{\text{уст}1}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{уст}0}$  – усилие при установке свежих ТВС;

$P_{\text{уст}1}$  – усилие при установке ТВС с выгоранием в течение одной кампании.

$$\Delta P_{3-2} = P_{\text{изв3}} - P_{\text{изв2}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{изв3}}$  – усилие при извлечении ТВС с выгоранием в течение трех кампаний;

$P_{\text{изв2}}$  – усилие при извлечении ТВС с выгоранием в течение двух кампаний.

Тогда прирост силы трения с выгоранием топлива может быть найден по формулам (4).

$$\begin{aligned} \Delta F_{1-0} &= -\frac{\Delta P_{0-1}}{2}; \Delta F_{2-1} = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{2}; \\ \Delta F_{3-2} &= \frac{\Delta P_{3-2}}{2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где индекс типа «m-n» означает прирост силы трения от топлива, выгоравшего m кампаний, к топливу, выгоравшему n кампаний.

Из-за того, что значения весовой нагрузки фиксировались датчиком автоматически на несовпадающих положениях ЗРШ, упорядочивание значений веса по уровням положения ЗРШ невозможно. Однако, такая сортировка необходима для выполнения математических операций с данными, в том числе для применения формул (1)-(4).

Была принята единая шкала значений положения ЗРШ с ценой деления 10 мм. Для каждой рассматриваемой операции были рассчитаны значения весовой нагрузки для точек основной шкалы высот с помощью метода линейной интерполяции по формуле (5).

$$P_0 = P_n + \frac{(x_0 - x_n) \cdot (P_{n+1} - P_n)}{x_{n+1} - x_n}, \quad (5)$$

где  $x_0$  и  $P_0$  – принятое в единой шкале значение положения захвата РШ и искомое значение величины веса соответственно;

$x_n$  и  $P_n$  – наиболее близкая по значению зафиксированная величина положения захвата РШ и вес в этой точке;

$x_{n+1}$  и  $P_{n+1}$  – те же величины в следующей точке, зафиксированной СУМП.

Полученный массив данных интерполированных значений использовался для дальнейших расчетов.

Чтобы оценить приращение величин дополнительных внешних сил со временем нахождения ТВС в активной зоне, были проанализированы графики прироста сил трения, построенные по формулам (4) для кассет с разным выгоранием топлива в течение одной, двух или трех топливных кампаний (рис. 6).

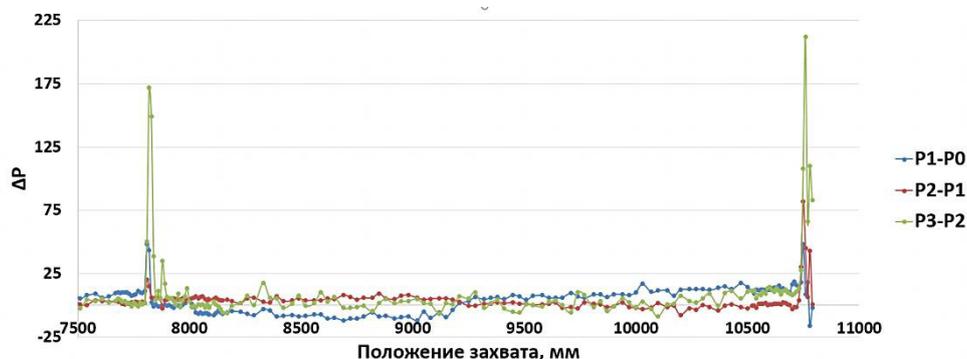


Рисунок 6 – График зависимости прироста силы трения с выгоранием топлива ТВС за две и три топливные кампании по высоте активной зоны [Graph of the dependence of the increase in the friction force with the fuel burnup of the fuel assembly for two and three fuel runs along the height of the core]

Сила трения принимает наибольшие значения в момент отрыва хвостовика ТВС и прохождении первых 50 мм при извлечении. Значения прироста сил трения с увеличением величины выгорания топлива растут. На всех графиках обозначились два уровня положения ЗРШ, на которых прирост силы трения наибольший – положение захвата на уровне 10760 мм и 10780 мм, что соответствует началу движения ТВС и отрыву хвостовика ТВС от опорного стакана.

Описанный выше прирост сил трения на высотах 8000-9250 мм снижается на 20-30 кг при выгорании в течение двух кампаний.

Были определены значения среднего прироста силы трения в килограммах веса за время пребывания кассет в активной зоне в течение двух топливных кампаний, формула (6).

$$\Delta \bar{P} = \bar{P}_{\text{изз3}} - \bar{P}_{\text{извл}} \quad (6)$$

где значения веса взяты при извлечении, а индексы «1» и «3» соответствуют кассетам, облученным в течение одной и трех кампаний.

Распределение величины прироста веса по высоте АЗ на начальном этапе подъема ТВС показано на рисунке 7.



Рисунок 7 – Прирост сил трения при выгорании топлива в течение двух кампаний [The increase in friction forces during fuel burnout during two campaigns]

Из графика видно, что кассета, облученная в течении трех топливных кампаний, в среднем отрывается от точки закрепления в активной зоне и проходит первые 50 мм при извлечении на 60 кг тяжелее, чем после одной топливной кампании.

#### Анализ сигналов весоизмерительного устройства ЗКл

Деформированное состояние ТВС оказывает влияние и на сопротивление прохождению поглощающих стержней через направляющие каналы. Для проанализированных в разделе 3 операций были построены также типовые графики зависимости усилия на захвате кластера (ЗКл) от его координаты при извлечении ПС СУЗ.

Для оценки разброса значений весовых нагрузок по высоте активной зоны, были рассчитаны среднеарифметические числовые значения веса и их доверительные интервалы в предположении о нормальном распределении результатов измерения веса, формулы (7).

$$P_i = \bar{P}_j \pm \frac{2,086}{\sqrt{k}} \cdot \sigma_i,$$

$$\bar{P}_j = \frac{\sum_{j=1}^k P_{jn}}{k}, \quad (7)$$

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^k (P_{jn} - \bar{P}_j)}{k-1},$$

где  $P_j$  – верхняя и нижняя граница доверительного интервала;

$P_{in}$  – зафиксированные значения весовых нагрузок в конкретной точке по высоте активной зоны;

$k$  – количество зафиксированных значений веса на выбранной высоте.

График зависимости среднеарифметических значений веса с указанными верхними и нижними значениями рассчитанного доверительного интервала по высоте активной зоны представлен ниже на рисунке 8.

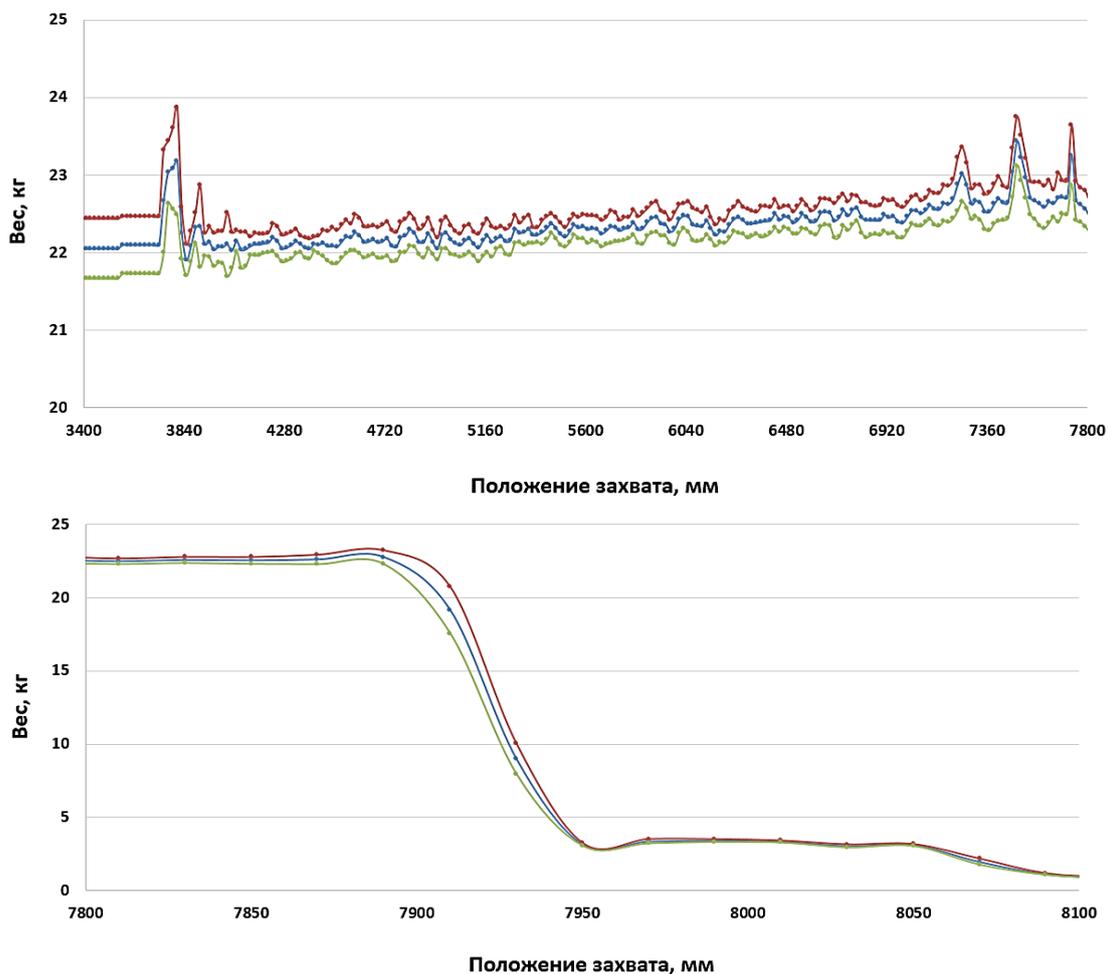


Рисунок 8 – График зависимости среднеарифметических значений веса с указанными верхними и нижними значениями рассчитанного доверительного интервала по высоте активной зоны [Graph of the dependence of weight arithmetic mean values with the indicated upper and lower values of the calculated confidence interval over the core height]

По мере извлечения поглощающего стержня нагрузка на канате снижается с темпом около 0,2 кг/м. При этом масса каната ЗКл не превышает 0,03 кг/м. Таким образом, можно описать характер трения поглощающего стержня в направляющих каналах ТВС как линейно зависимый от погруженной длины.

### Заключение

1. Выполненный анализ сигналов весоизмерительной системы МП позволил подтвердить предположение о связи параметров веса кассеты при перемещении ТВС в реакторе с деформацией элементов АЗ реактора ВВЭР-1000. Полученный характер изменения весовой нагрузки на захвате рабочей штанги по высоте АЗ может свидетельствовать о:

а) возникновении дополнительных сил трения порядка 60-100 кгс на уровнях с 1600 до 3000 мм от низа АЗ;

б) увеличении среднего усилия отрыва хвостовика кассет, отработавших три кампании, на 40-60 кгс по сравнению с ТВС, отработавшими одну кампанию;

в) снижении сил трения, описанных в пункте а), на 20-30 кгс при выгорании топлива в течение двух кампаний.

2. Полученные данные могут свидетельствовать об определенных формах деформации комплекта кассет АЗ реактора ВВЭР-1000. Можно заключить, что выгорание топлива приводит, с одной стороны, к затруднению отрыва хвостовика ТВС от опорного стакана АЗ, а с другой стороны, к снижению сил трения в центральной части АЗ. Это может объясняться тем, что деформированная форма ТВС по мере выгорания приходит в соответствие деформированной форме всего комплекта кассет в реакторе.

3. Характер сил трения при извлечении ПС СУЗ свидетельствует об их линейном снижении по мере подъема захвата. Таким образом, описать деформированное состояние направляющих каналов ТВС не представилось возможным.

4. Сигналы весоизмерительного устройства СУ МП имеют возможность дополнительного использования как инструмента для получения предварительных сведений о деформированной форме комплекта кассет в АЗ до проведения послереакторных исследований топлива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марков, Д.В. [и др.] Исследования по проблеме, связанной с изгибом ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации / Д.В. Марков, В.С. Поленок, С.В. Павлов, А.В. Смирнов // Сборник докладов V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, 1998. – Т. 1. – С. 47-59.*
2. *Марков, Д.В. Основные закономерности изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР и РБМК нового поколения в период эксплуатации по результатам комплексных послереакторных исследований : диссертация ... доктора технических наук: 05.14.03 / Д.В. Марков // Место защиты: ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». – 2018. – 397 с.*
3. *Fuel Assembly Deformation Measurements [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/50/006/50006707.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/006/50006707.pdf).*
4. *Strasser A., Sunderland D. A review of recent LWR fuel failures // Proc. IAEA TCM «Fuel failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Mechanisms and Management», Dimitrovgrad, Russia, 26-29 May 1992. IAEA-TECDOC-709. Vienna: IAEA 1993. P.17-25.*
5. *Kanashov B., Amosov S., Lyadov G., Markov D., Ovchinnikov V., Polenok V., Smirnov A., Sukhikh A., Bek Ye., Yenin A., Novikov V. Changes in geometry of claddings and fuel columns of spent WWER-440 and WWER-1000 fuel rods under steady-state and transient operating conditions. Fuel failure in water reactors: causes and mitigation. VIENNA. 2003. P. 171-188.*
6. *Dubrovin K.P., Ivanov E.G., Strijov P.N., Yakovlev, V.V. The results of postirradiation examinations of VVER-1000 and VVER-440 fuel rods/ Journal of Nuclear Materials. Volume 178. Issue 2. P. 306-311.*
7. *Bolshagin Sergey N., Gorodkov Sergey S., Sukhino-Khomenko Evgeniya A. The estimation of the control rods absorber burn-up during the VVER-1000 operation. Kerntechnik; Journal Volume: 78; Journal Issue: 4; Conference: 22. AER Symposium 2012, Pruhonice (Czech Republic). 2012. P. 280-284.*
8. *Марков, Д.В. Изменение основных геометрических параметров ТВС ВВЭР-1000 нового поколения при эксплуатации до 58.7 МВт\*сут/кгU / Д.В. Марков, Е.А. Звир, В.С. Поленок,*

- В.А. Жителев, Г.В. Шевляков // Межотраслевая научно-техническая конференция «Исследовательскому комплексу ИВВ-2М – 45 лет», г. Заречный, 2011.
9. Якубенко, И.А. Модернизация системы управления перегрузкой ядерного топлива на энергоблоке №1 Ростовской АЭС / И.А. Якубенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4(9). – С. 35-39.
  10. Федосовский, М.Е. Безопасность перегрузки ядерного топлива на энергоблоках с водо-водяным энергетическим реактором : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.Е. Федосовский. – Санкт-Петербург, 2009.
  11. Лапкис, А.А. Виброакустическая паспортизация режимов работы машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР / А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, Л.А. Первушин // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 2(27). – С. 82-90.

## REFERENCES

- [1] Markov D.V., Polenok V.S., Pavlov S.V., Smirnov A.V. Issledovaniya po probleme, svyazannoy s izgibom TVS VVER-1000 pri ekspluatatsii [Research the Problem Associated with the Bending of WWER-1000 Fuel Assemblies during Operation]. Sbornik dokladov V Mezhotraslevoy konferentsii po reaktornomu materialovedeniyu [Collection of Reports of the V Interdisciplinary Conference on Reactor Materials Science]. Dimitrovgrad 1998. T.1. P.47-59 (in Russian).
- [2] Markov D.V. Osnovnyye zakonomernosti izmeneniya svoystv i kharakteristik topliva VVER i RBMK novogo pokoleniya v period ekspluatatsii po rezul'tatam kompleksnykh poslereaktornykh issledovaniy.: dissertatsiya ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.14.03 [The Main Regularities of Changes in the Properties and Characteristics of WWER and RBMK Fuel of a New Generation during the Operation Period According to the Results of Complex Post-Irradiation Studies .: Doctor of Technical Sciences thesis: 05.14.03]. Mesto zashchity: FGBU «Natsional'nyy issledovatel'skiy tsentr «Kurchatovskiy institut» [FSBI National Research Center Kurchatov Institute]. 2018. 397 p. (in Russian).
- [3] Fuel Assembly Deformation Measurements. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/50/006/50006707.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/006/50006707.pdf) (in English).
- [4] Strasser A., Sunderland D. A review of recent LWR fuel failures // Proc. IAEA TCM «Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Mechanisms and Management», Dimitrovgrad, Russia, 26-29 May 1992. IAEA-TECDOC-709. Vienna: IAEA 1993, p.17-25 (in English).
- [5] Kanashov B., Amosov S., Lyadov G., Markov D., Ovchinnikov V., Polenok V., Smirnov A., Sukhikh A., Bek Ye., Yenin A., Novikov V. Changes in Geometry of Claddings and Fuel Columns of Spent WWER-440 and WWER-1000 Fuel Rods under Steady-State and Transient Operating Conditions. FUEL FAILURE IN WATER REACTORS: CAUSES AND MITIGATION IAEA, VIENNA, 2003. P.171-188 (in English).
- [6] Dubrovin K.P., Ivanov E.G., Strijov P.N., Yakovlev V.V. Results of Postirradiation Examinations of WWER-1000 and VVER-440 fuel rods / Journal of Nuclear Materials. Volume 178. Issue 2. P.306-311 (in English).
- [7] Bolshagin Sergey N., Gorodkov Sergey S., Sukhino-Khomenko Evgeniya A. The Estimation of the Control Rods Absorber Burn-Up during the WWER-1000 Operation. Kerntechnik; Journal Volume: 78; Journal Issue: 4; Conference: 22. AER Symposium 2012, Pruhonice (Czech Republic). 2012. P.280-284 (in English).
- [8] Markov D.V., Zvir Ye.A., Polenok V.S., Zhitelev V.A., Shevlyakov G.V. Izmeneniye osnovnykh geometricheskikh parametrov TVS VVER-1000 novogo pokoleniya pri ekspluatatsii do 58.7 MVt\*sut/kgU [Changes in the Main Geometric Parameters of New Generation of WWER-1000 Fuel Assemblies during Operation up to 58.7 MW \* Day / kgU]. Mezhotraslevaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Issledovatel'skomu kompleksu IVV-2M – 45 let» [Interdisciplinary Scientific and Technical Conference «Research Complex IVV-2M is 45 Years Old»]. Zarechny. 2011 (in Russian).
- [9] Yakubenko I.A. Modernizatsiya sistemy upravleniya peregruzkoy yadernogo topliva na energobloke №1 Rostovskoy AES [Modernization of the Nuclear Fuel Reloading Control System at Power Unit No. 1 of the Rostov NPP]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2013. № 4(9). P. 35-39 (in Russian).
- [10] Fedosovskiy M.Ye. Bezopasnost' peregruzki yadernogo topliva na energoblokakh s vodo-vodyanym energeticheskim reaktorom: avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Safety of Nuclear Fuel Reloading at Power Units with Pressurized Water Reactors. Abstract of PhD thesis in technical sciences]. Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet [St. Petersburg Polytechnic University]. St. Petersburg [Sankt-Peterburg]. 2009 (in Russian).

- [11] Lapkis A.A., Nikiforov V.N. Vibroakusticheskaya pasportizatsiya rezhimov raboty mashin peregruzochnykh energoblokov VVER [Vibroacoustic Certification of Operating Modes of Machines for Reloading Power Units of WVER]. 2018. № 2(27). P. 82-90 (in Russian).

### **Analysis of WVER-1000 Fuel Deformation Using the Refueling Machine Control System**

**A.A. Lapkis<sup>1</sup>, A.N. Bezmateva<sup>2</sup>, E.A. Abidova<sup>3</sup>**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», 73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

<sup>1</sup>*ORCID ID: 0000-0002-9431-7046*

*e-mail: AALapkis@mephi.ru*

<sup>2</sup>*alanbezm@icloud.com*

<sup>3</sup>*ORCID iD: 0000-0003-0258-5543*

*WoS Researher ID: O-1870-2018*

*e-mail: nii\_energomash@mail.ru*

**Abstract** – The analysis of the geometric dimensions of fuel assemblies, whose change may lead to mashing of the cassettes in the core, is performed at this stage only after removing the fuel assemblies from the reactor. This paper considers the possibility of analyzing the mashing of WVER-1000 cassettes using the control system of the reloading machine. Based on data from an industrial experiment at the Rostov NPP, a typical distribution of friction forces over the height of the WVER-1000 reactor core is assessed.

*Keywords:* WVER, nuclear fuel, refueling, refueling machine, weight measuring, fuel assembly deformation.