

УДК 621.039.546.8: 621.039.588

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-10-56-62

# Динамические процессы при всплытии тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-440

**В.И. Солонин, В.Г. Крапивцев, В.В. Перевезенцев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Dynamic Processes of Fuel Assemblies Lifting in the VVER-440 Reactor

**V.I. Solonin, V.G. Krapivtsev, V.V. Perevezentsev**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: en7@power.bmstu.ru, NYKLOH@mail.ru, perevezentsev@bmstu.ru



При потере контакта в опоре типа «шар по конусу» при всплытии тепловыделяющей сборки водо-водяного энергетического реактора в восходящем потоке теплоносителя ее вибрационное поведение может существенно измениться. В связи с этим должны быть определены условия всплытия (расход воды, высота подъема тепловыделяющей сборки) и реализуемые при этом вибрационные характеристики пучка тепловыделяющих элементов. Проведены экспериментальные исследования с использованием полномасштабного макета тепловыделяющей сборки ВВЭР-440 второго поколения и разработана модель ее движения при всплытии. Установлено, что всплытие макета происходит при расходе воды  $\sim 192$  м<sup>3</sup>/ч, что соответствует скорости потока в пучке тепловыделяющих элементов около 6 м/с. Возвращение макета в штатное положение наблюдается при снижении расхода воды со 183 до 171 м<sup>3</sup>/ч (при скорости потока в пучке тепловыделяющих элементов 5,7... 5,4 м/с). На основании результатов исследования в натурных реакторных условиях (давление теплоносителя 12,5 МПа, температура 285 °С) установлено, что всплытие тепловыделяющей сборки ВВЭР-440 возможно при расходе воды 296...315 м<sup>3</sup>/ч, т. е. при скорости потока в пучке тепловыделяющих элементов 9,3...9,9 м/с.

**Ключевые слова:** реактор ВВЭР-440, условия всплытия ТВС, вибрации пучка твэлов, действующие на ТВС силы



With the loss of contact in the “ball-cone” type of support structure when the fuel assembly lifts off in the upward coolant flow, its vibrational behavior can change considerably. Therefore, it is important to define the conditions of lifting (water rate, lifting height of the fuel assembly) and the vibrational characteristics of the fuel assembly rods. Experimental studies are conducted using a full-size mock-up of the fuel assembly for the VVER-440 of the second generation, and a model is developed simulating fuel assembly movement when lifting. It is established that the mock-up lifts when water rate is  $\sim 192$  m<sup>3</sup>/h, which corresponds to the velocity of flow in the fuel assembly rods of about 6 m/s. The return of the mock-up to the standard position occurs when the water rates decreases from 183 to 171 m<sup>3</sup>/h (velocity of flow in the fuel assembly rods of 5.7 to 5.4 m/s). Based on the results of studies under field conditions (coolant pressure 12.5 MPa, temperature 285 °C) it is established that lifting of the VVER-400 fuel assembly is possible when the water rate is 296 — 315 m<sup>3</sup>/h (velocity of flow in the fuel assembly rods of 9.3 — 9.9 m/s).

**Keywords:** VVER-440 reactor, fuel assembly lifting conditions, fuel rods vibration, forces acting on fuel assembly

При увеличении расхода теплоносителя через активную зону водо-водяного энергетического реактора возрастают вертикальные усилия, действующие на тепловыделяющую сборку (ТВС), связанные с гидравлическим сопротивлением, что может привести к потере контакта в опоре хвостовика типа «шар по конусу» и началу всплытия ТВС [1].

В реакторах с легкой водой фиксация ТВС в активной зоне обеспечена внутрикорпусными устройствами, содержащими опору хвостовика и головку с системой пружин, интегрированных в конструкцию головки [2–4].

Цель работы — анализ результатов экспериментальных исследований динамических процессов (включая вибрации пучка тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ)) в ТВС реактора ВВЭР-440 при расходах теплоносителя, приводящих к всплытию и возвращению ТВС в исходное штатное положение.

Эксперименты выполнены на стенде «Э7-Элемаш» [5–7] при испытании макета ТВС ВВЭР-440 второго поколения [1, 2]. Конструкция экспериментальной колонки стенда обеспечивает крепление хвостовика и головки ТВС, аналогичные реализованным в реакторе ВВЭР-440 (рис. 1).

Макет ТВС, изготовленный ПО «МСЗ», имеет массу 220 кг. Уравнительные отверстия в его чехле [1] были герметизированы: весь входящий в хвостовик расход воды поступал в пучок ТВЭЛОВ ТВС. Усилие поджатия  $P$  ТВС системой шести подпружиненных штырей в головке при их ходе 9,5 мм согласно паспортной характеристике пружин составляло 269 Н. Динамические характеристики макета ТВС при штатном закреплении в колонке стенда в диапазоне скоростей потока воды в макете до 5 м/с приведены в работах [8–11]. Исследование всплытия макета выполняли при отсутствии дроссельных шайб на входе в хвостовик ТВС, что обеспечило ско-

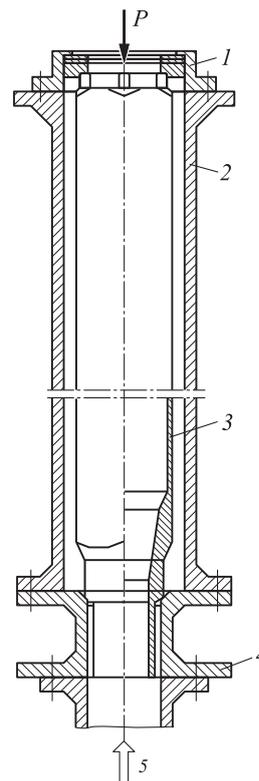


Рис. 1. Схема крепления макета ТВС ВВЭР-440 второго поколения в колонке стенда «Э7-Элемаш»: 1 — нажимное устройство; 2 — колонка; 3 — макет ТВС; 4 — опора; 5 — теплоноситель

рость потока воды в пучке ТВЭЛОВ до 6,4 м/с (объемный расход 208 м<sup>3</sup>/ч).

Вертикальное смещение ТВС при всплытии фиксировалось соединенным с ТВС резисторным датчиком ползункового типа с линейной зависимостью напряжение — перемещение. Случайная погрешность определения координаты положения ТВС не превышала 0,2 мм. Влияние расхода теплоносителя (воды с температурой 40 °С при давлении 0,2 МПа) стенда на положение макета ТВС в колонке иллюстрирует рис. 2. Видно, что увеличение расхода воды  $Q$  более 192 м<sup>3</sup>/ч приводит к вертикальному перемещению макета вверх.

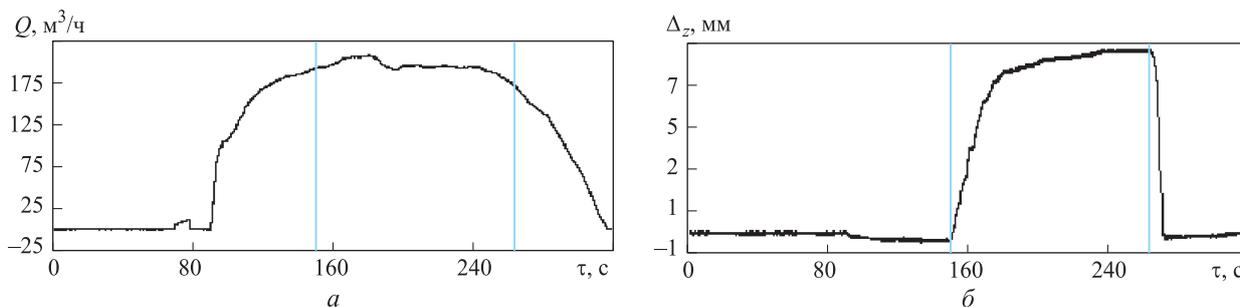


Рис. 2. Зависимости расхода воды  $Q$  через макет ТВС (а) и его положения относительно опоры хвостовика  $\Delta_z$  (б) от времени  $\tau$

При снижении расхода до  $171 \text{ м}^3/\text{ч}$  и дальнейшем его уменьшении макет возвращается в исходное штатное положение. Вертикальные маркеры (бирюзовые линии) показывают начало всплытия и возврат в исходное штатное положение макета ТВС. Пересечения вертикальных маркеров с кривой изменения расхода воды  $Q$  от времени соответствуют значениям  $Q$ , при которых начинаются всплытие и возврат в исходное штатное положение макета ТВС.

Динамика всплытия (возвращения в штатное положение) макета может быть связана с характером изменения расхода  $Q$ . В интервале времени  $87 \dots 182 \text{ с}$  расход теплоносителя увеличивается с  $0$  до  $208 \text{ м}^3/\text{ч}$ . После всплытия при  $Q \sim 192 \text{ м}^3/\text{ч}$  скорость подъема ТВС составляет примерно  $0,32 \text{ мм/с}$ . При дальнейшем снижении расхода (который по-прежнему больше  $192 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) скорость всплытия уменьшается, затем становится нулевой. При падении расхода до  $171 \text{ м}^3/\text{ч}$  начинается возвращение макета в исходное штатное положение со средней скоростью, несколько превышающей  $1,2 \text{ мм/с}$ , происходящее при дальнейшем снижении расхода до  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$  в момент возврата ТВС в положение  $\Delta_z = 0$ . Скорость увеличения расхода при всплытии в  $3,5$  раза ниже, чем скорость его уменьшения при возврате макета в штатное положение.

Различие в расходах, приводящих к всплытию и возвращению макета ТВС в штатное положение, зафиксировано в неоднократно повторенных экспериментах, результаты одного из которых представлены на рис. 3 в виде зависимости  $\Delta_z = f(Q)$ . Стрелка « $\uparrow$ » соответствует увеличению расхода воды (всплытию макета ТВС), стрелка « $\downarrow$ » — его уменьшению (возвращению макета в штатное положение).

Начало всплытия макета наблюдалось при расходе  $Q = 190 \dots 195 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а возвратное смеще-

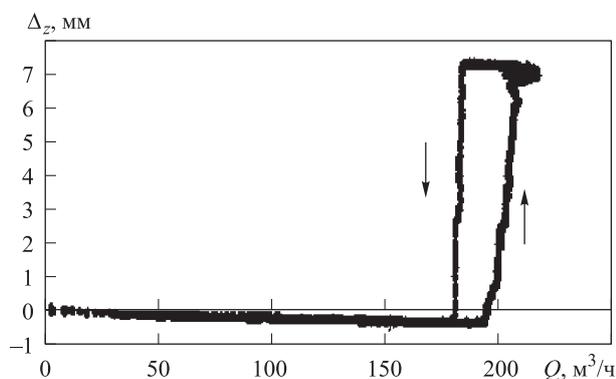


Рис. 3. Зависимость положения макета  $\Delta_z$  от расхода воды  $Q$

ние — при  $Q = 183 \dots 171 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При этом средняя скорость воды в пучке твэлов составляла  $6,0 \dots 6,1$  и  $5,7 \dots 5,4 \text{ м/с}$  соответственно.

После всплытия макета при  $Q = 192 \text{ м}^3/\text{ч}$  высота его подъема  $\Delta_z$  увеличивается с ростом расхода. Достигнув  $Q = 204 \text{ м}^3/\text{ч}$ , высота подъема  $\Delta_z$  не изменяется и составляет примерно  $7,8 \text{ мм}$ . При этом дополнительное сжатие пружин повышает осевую силу, удерживающую ТВС, на  $220 \text{ Н}$ . В диапазоне  $Q = 216 \dots 183 \text{ м}^3/\text{ч}$  положение всплывшего макета практически не изменяется. Снижение расхода до  $178 \text{ м}^3/\text{ч}$  приводит к возвращению макета ТВС в штатное положение, происходящему при меньшем, чем для всплытия, изменении расхода.

Различная динамика движения макета ТВС при всплытии и возвращении в штатное положение связана с конструкцией хвостовика ТВС реактора ВВЭР-440 и его расположении в посадочном отверстии  $\varnothing 105^{+0,054}$ . Наружная поверхность хвостовика в цилиндрической части имеет два размера —  $\varnothing 105_{-0,35}^{-0,12}$  и  $\varnothing 105_{-1,0}^{-0,12}$ . Первый соответствует нижней половине хвостовика, второй — верхней. Длина каждой из частей составляет  $100 \text{ мм}$ .

При всплытии макета уплотнение типа «шар по конусу» хвостовика перестает функционировать и через кольцевой зазор между поверхностями посадочного отверстия и хвостовика появляется поток воды. Как показывают расчеты, расход воды через кольцевой зазор, находящийся под перепадом давления, равным гидравлическому сопротивлению ТВС, не превышает  $1 \%$  расхода через ТВС. Следовательно, кольцевой зазор в области посадочного отверстия хвостовика является эффективным дросселем для байпасного расхода, возникающего при исчезновении контакта «шар по конусу» после всплытия ТВС.

При смещении ТВС после всплытия примерно на  $7,8 \text{ мм}$  (максимальное смещение ТВС, ограниченное пружинами, равно  $12,5 \text{ мм}$ ) общая высота кольцевого зазора уменьшается примерно на  $4 \%$ , что слабо влияет на значение байпасного расхода. Поэтому в экспериментах с погрешностью, превышающей  $1 \%$ , обеспечивалось равенство расходов в стенде и макете ТВС.

Исследования вибраций макета ТВС в условиях штатного закрепления в колонке стенда «Э7-Элемаш» [6–10] показали, что пучок твэлов макета совершает вынужденные колебания по первой форме на собственной частоте в воде

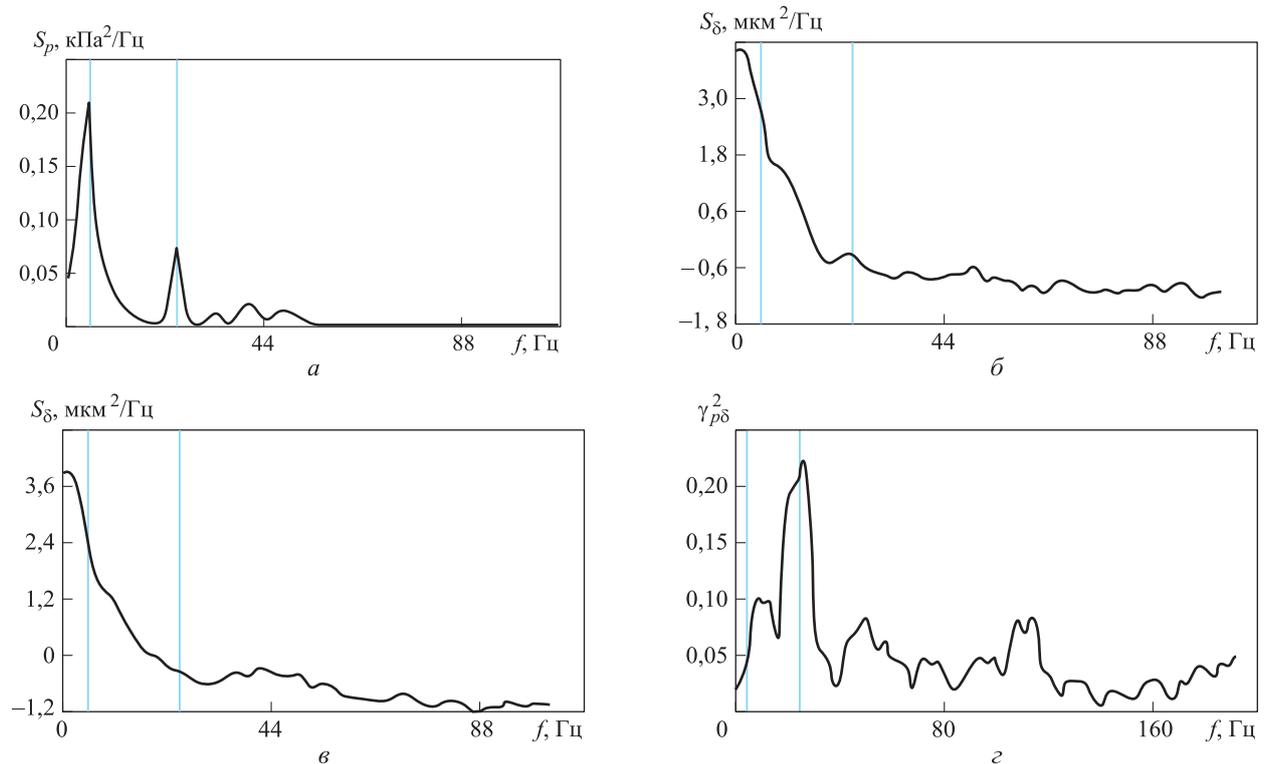


Рис. 4. Динамические характеристики всплывшего макета ТВС при скорости потока воды в пучке твэлов, равной 7 м/с:

*a* — спектр пульсаций давления на воде в макет; *b* и *в* — спектры виброперемещений пучка твэлов макета в условиях исходного штатного положения и всплытия; *г* — функция когерентности (взаимосвязи) пульсаций давления и виброперемещений

(3,9 Гц). При всплытии макета условия его закрепления в колонке стенда изменяются. В области хвостовика возникает свобода углового смещения макета на 0,06...0,22 угловых градуса, определяемых допусками на размер кольцевого зазора в нижней части посадочного места хвостовика. Это существенно изменяет спектры вибраций (виброперемещений) пучка твэлов (рис. 4).

Корреляция с пульсациями давления в потоке на собственной частоте колебаний пучка твэлов  $f = 3,9$  Гц в спектре виброперемещений отсутствует, слабо проявляется резонанс виброперемещения пучка твэлов на оборотной частоте насоса  $\sim 25$  Гц. Всплывший макет ТВС совершает колебания с частотой 2 Гц. Вертикальные маркеры на рис. 4 (бирюзовые линии) соответствуют собственной частоте изгибных колебаний пучка твэлов ( $\sim 3,9$  Гц) и оборотной частоте насоса ( $\sim 25$  Гц). Низкие значения когерентности  $\gamma_{p\delta}^2(f)$  виброперемещений и пульсаций давления потока подтверждают изменение возбуждения вибраций всплывшего макета ТВС.

Вследствие свободы углового смещения хвостовика колебания всплывшего макета приво-

дят к периодическому ударному контакту торца и поверхности хвостовика с поверхностью посадочного отверстия [12]. В области ударного контакта хвостовика возникает периодическая практически нормальная к поверхности посадочного отверстия сила, создающая силу трения, препятствующую вертикальному перемещению макета.

Выполним оценку силу трения. Как показывает анализ, инерционные эффекты играют несущественную роль при всплытии и возвращении в штатное положение макета ТВС. Поэтому баланс нагрузок, действующих на макет, включающих в себя силу гидравлического сопротивления  $F_{\Delta p}$ , силу Архимеда  $F_{Арх}$ , массовую силу  $Mg$ , силу поджатия пружин головки  $F_{пр}$ , а после всплытия макета и силу сопротивления движению хвостовика в посадочном отверстии  $F_{хв}$ , можно представить как

$$F_{\Delta p}(Q) + F_{Арх} - Mg - F_{пр}(\Delta_z) + (-1)^n F_{хв}(\Delta_z) = 0. \quad (1)$$

Здесь для всплытия макета  $n = 1$ , а для его возвращения в штатное положение  $n = 2$ .

Силы  $F_{\Delta p}$ ,  $F_{пр}$ ,  $F_{хв}$  содержат пульсационные составляющие. Поскольку сила Архимеда ( $F_{Арх} = 270$  Н) и сила начального поджатия пружин головки ( $F_{пр} = 269$  Н для  $\Delta_z = 0$ ) имеют практически одинаковые значения, выражение (1) принимает вид:

- для штатного положения макета

$$F_{\Delta p}(Q) - Mg = 0, \quad (2)$$

- для макета, всплывшего на высоту  $\Delta_z$ ,

$$F_{\Delta p}(Q) - Mg - F_{пр}(\Delta_z) + (-1)^n F_{хв}(\Delta_z) = 0. \quad (3)$$

Согласно результатам экспериментальных исследований, условие (2) выполняется до расхода  $Q = (192 \pm 2)$  м<sup>3</sup>/ч. Для преодоления дополнительного усилия сжатия пружин  $F_{пр} = 220$  Н при перемещении макета на 7,8 мм расход через макет должен увеличиться до 202 м<sup>3</sup>/ч, тогда как в эксперименте этот параметр достигал 205 м<sup>3</sup>/ч, что можно объяснить необходимостью преодолеть силу  $F_{хв}$ , составляющую около 70 Н.

Возвратное перемещение макета начинается при расходе воды  $(183 \pm 3)$  м<sup>3</sup>/ч и завершается при  $Q = (176 \pm 5)$  м<sup>3</sup>/ч. Сохранение положения всплывшего макета ( $\Delta_z = 7,8$  мм) при уменьшении расхода от 205 до 183 м<sup>3</sup>/ч можно объяснить силой сопротивления движению хвостовика  $F_{хв}(\Delta_z)$ , значение которой согласно выражению (3) в указанном диапазоне расхода должно составлять  $(250 \pm 50)$  Н. Для условия возвращения макета в штатное положение ( $Q = 176$  м<sup>3</sup>/ч) сила сопротивления движению хвостовика равна примерно 350 Н. Таким образом, диапазон изменения силы  $F_{хв} = 3...16$  % силы тяжести макета.

## Выводы

Экспериментальное исследование динамики всплытия штатно закрепленного полномасштабного макета ТВС реактора ВВЭР-440 второго

поколения, изготовленного ПАО «МСЗ», в потоке воды стенда «Э7-Элемаш» с температурой 40 °С позволило установить, что при высоте всплытия макета до ~8 мм (0,6 от максимально возможного):

- расход воды через пучок твэлов макета уменьшается по сравнению со значением в штатном положении менее чем на 1 % вследствие большого гидравлического сопротивления зазора между хвостовиком и его посадочным отверстием;

- всплывший макет совершает колебательные движения с частотой (~2 Гц), существенно меньшей, чем частота собственных колебаний штатно закрепленного макета (3,9 Гц); при колебаниях хвостовик макета ударно взаимодействует с посадочной поверхностью опоры, что приводит к созданию силы сопротивления движению макета;

- баланс сил, действующих на макет ТВС при его всплытии и возвращении в штатное положение, показывает, что возникающая в области хвостовика сила сопротивления его движению макета («заклинивающая сила») составляет ~70 Н для его перемещения макета вверх,  $(250 \pm 50)$  Н для удержания всплывшего макета в верхнем положении и ~350 Н для возвращения макета в штатное положение;

- в условиях стендовых экспериментов всплытие макета ТВС массой 220 кг при усилии поджатия ТВС подпружиненными штырями головки, равном 269 Н, происходило при средней скорости потока воды в пучке твэлов 6,0...6,1 м/с (при расходе 190...195 м<sup>3</sup>/ч), а возвращение макета в штатное положение — при средней скорости потока воды в пучке твэлов 5,7...5,4 м/с (при расходе 183...171 м<sup>3</sup>/ч);

- в натуральных условиях эксплуатации ВВЭР-440 (давление теплоносителя 12,5 МПа, температура 285 °С) всплытие ТВС будет иметь место при скорости потока воды 9,3...9,9 м/с (при расходе 296...315 м<sup>3</sup>/ч).

## Литература

- [1] Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. *Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций*. Москва, Академкнига, 2004. 220 с.
- [2] Бессалов Г.Г., Денисов В.П., Мельников Н.Ф., Драгунов Ю.Г. *Реакторы ВВЭР для АЭС средней мощности*. Москва, Академкнига, 2004. 208 с.
- [3] Резепов В.К., Денисов В.П., Кирилюк Н.А., Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б. *Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций*. Москва, Академкнига, 2004. 333 с.
- [4] Легасов В.А., ред. *Справочник по ядерной энерготехнологии*. Москва, Энергоатомиздат, 1989. 752 с.

- [5] Панюшкин А.К., Потоскаев Г.Г., Курсков В.С., Бек Е.Г., Солонин В.И., Крапивцев В.Г., Перевезенцев В.В., Рекшня Н.Ф., Столотнюк С.В., Гетья С.И., Матвеев А.Н., Кутычкин С.Г., Прус В.В. Стенд для экспериментальных исследований гидродинамических и вибрационных процессов в ТВС ВВЭР-440. *Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. Сб. ст.*, Москва, Изд-во МЭИ, 1999, с. 59–61.
- [6] Драгунов Ю.Г., Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Петров И.В. Вибрации пучков твэлов в ТВС ВВЭР, возбуждаемые турбулентным потоком теплоносителя. *Атомная энергия*, 2012, т. 113, № 3, с. 127–134.
- [7] Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Рекшня Н.Ф., Столотнюк С.В. Расчетно-экспериментальные исследования вибрационного поведения тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов в условиях комбинированного гидромеханического нагружения. *Безопасность АЭС и подготовка кадров. Тез. докл. 7-й Междунар. конф.*, Обнинск, 2001, с. 19–20.
- [8] Драгунов Ю.Г., Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Петров И.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР в турбулентном потоке теплоносителя. *Атомная энергия*, 2012, т. 113, № 4, с. 237–240.
- [9] Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Исследования влияния вибрации и гидродинамических нагрузок на пучки твэлов в тепловыделяющих сборках реакторных установок АЭС с ВВЭР. *Теплоэнергетика*, 2012, № 5, с. 40–46.
- [10] Солонин В.И., Павелко В.И., Перевезенцев В.В. Влияние условий гидродинамического возбуждения на гидроупругие колебания пучка твэлов ТВС ВВЭР-440. *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сб. тез. докл. 3 науч.-техн. конф.*, Подольск, 26–30 мая 2003, Подольск, ФГУП ОКБ ГИДРОПРЕСС, 2003, 54 с.
- [11] Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. *Экспериментальное обоснование тепло-гидравлической надежности реакторов ВВЭР*. Москва, Академкнига, 2004. 255 с.
- [12] Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Гидродинамическое и гидромеханическое возбуждение вибраций пучков твэлов ТВС ВВЭР-440. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС*, 2009, вып. 25, с. 50–61.

## References

- [1] Shmelev V.D., Dragunov Yu.G., Denisov V.P., Vasil'chenko I.N. *Aktivnye zony VVER dlya atomnyh elektrostantsiy* [The active zone for VVER nuclear power plants]. Moscow, Akademkniga publ., 2004. 220 p.
- [2] Bessalov G.G., Denisov V.P., Mel'nikov N.F., Dragunov Yu.G. *Reaktory VVER dlya AES sredney moshchnosti* [The VVER for nuclear power plants of average power]. Moscow, Akademkniga publ., 2004. 208 p.
- [3] Rezepov V.K., Denisov V.P., Kirilyuk N.A., Dragunov Yu.G., Ryzhov S.B. *Reaktory VVER-1000 dlya atomnyh elektrostantsiy* [VVER-1000 reactors for nuclear power plants]. Moscow, Akademkniga publ., 2004. 333 p.
- [4] *Spravochnik po yadernoy energotekhnologii* [Handbook of nuclear energy technology]. Ed. Legasov V.A. Moscow, Energoatomizdat publ., 1989. 752 p.
- [5] Panyushkin A.K., Potoskaev G.G., Kurskov V.S., Bek E.G., Solonin V.I., Krapivtsev V.G., Perevezentsev V.V., Rekshnya N.F., Stolotnyuk S.V., Getya S.I., Matveev A.N., Kutychkin S.G., Prus V.V. Stend dlya eksperimental'nyh issledovaniy gidrodinamicheskikh i vibratsionnyh protsessov v TVS VVER-440 [The stand for experimental researches of hydrodynamic and vibrational processes in fuel assemblies of the VVER-440]. *Nauchnye issledovaniya v oblasti yadernoy energetiki v tekhnicheskikh vuzakh Rossii. Sb. st.* [Research in the field of nuclear power in technical universities of Russia. Collected papers]. Moscow, MEI publ., 1999, pp. 59–61.
- [6] Dragunov Yu.G., Solonin V.I., Perevezentsev V.V., Petrov I.V. Vibratsii puchkov tvélov v TVS VVER, vzbuzhdaemye turbulentnym potokom teplonosatelya [Vibrations of the Fuel Elements Beams in VVER Fuel Assembly, Excited by Turbulent Coolant Flow]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2012, vol. 113, no. 3, pp. 127–134.
- [7] Solonin V.I., Perevezentsev V.V., Rekshnya N.F., Stolotnyuk S.V. Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya vibratsionnogo povedeniya teplovydelyayushchih sborok vodoohlazhdaemyh reaktorov v usloviyah kombinirovannogo gidromekhanicheskogo nagruzheniya [Computational and experimental studies of vibration behavior of fuel assemblies of water-cooled reactors under combined hydro-mechanical loading]. *Bezopasnost' AES i podgotov-*

- ka kadrov. Tez. dokl. 7-oy mezhdunar. konf.* [Nuclear safety and training. Abstracts of the 7<sup>th</sup> international conference]. Obninsk, 2001, pp. 19–20.
- [8] Dragunov Yu.G., Solonin V.I., Perevezentsev V.V., Petrov I.V. Eksperimental'nye issledovaniya dinamicheskikh harakteristik puchkov tvelov TVS VVER v turbulentnom potoke teplonositelya [Experimental the Analyses of the Fuel Rods Beams Dynamic Characteristics of the ВВЭР Fuel Assemblies in the Coolant Turbulent Flow]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2012, vol. 113, no. 4, pp. 237–240.
- [9] Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Studying the vibration and random hydrodynamic loads on the fuel rods bundles in the fuel assemblies of the reactor installations used at nuclear power stations equipped with VVER reactors. *Thermal Engineering*, 2012, vol. 59, no. 5, pp. 384–389.
- [10] Solonin V.I., Pavelko V.I., Perevezentsev V.V. Vliyanie usloviy gidrodinamicheskogo vzbuzhdeniya na gidrouprugie kolebaniya puchka tvelov TVS VVER-440 [Influence of hydrodynamic excitation on the hydroelastic vibrations of the fuel rod bundle fuel assembly of VVER-440]. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER. Sb. tez. dokl. 3 nauch.-tekhn. konf.* [Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER. Collection of abstracts 3 scientific and technical conference]. Podolsk, 26–30 May 2003, Podolsk, FGUP OKB GIDROPRESS publ., 2003, 54 p.
- [11] Logvinov S.A., Bezrukov Yu.A., Dragunov Yu.G. *Eksperimental'noe obosnovanie teplogidravlicheskoj nadezhnosti reaktorov VVER* [Experimental substantiation of thermal-hydraulic reliability of VVER reactors]. Moscow, Akademkniga publ., 2004. 255 p.
- [12] Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Gidrodinamicheskoe i gidromekhanicheskoe vzbuzhdenie vibratsiy puchkov tvelov TVS VVER-440 [Hydrodynamic and hydro-mechanical excitation of vibrations of fuel rod beams of VVER-440 fuel Assembly]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES* [Issues of nuclear science and technology. Ser. Security nuclear power plants]. 2009, is. 25, pp. 50–61.

Статья поступила в редакцию 26.06.2018

## Информация об авторах

**СОЛОНИН Владимир Иванович** (Москва) — доктор технических наук, профессор, первый заместитель зав. кафедрой «Ядерные реакторы и установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: en7@power.bmstu.ru).

**КРАПИВЦЕВ Вениамин Григорьевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: HUKLOH@mail.ru).

**ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Владимир Васильевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Ядерные реакторы и установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: perevezentsev@bmstu.ru).

## Information about the authors

**SOLOININ Vladimir Ivanovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, First Deputy Head, Department of Nuclear Reactors and Installations. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: en7@power.bmstu.ru).

**KRAPIVTSEV Veniamin Grigoryevich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: HUKLOH@mail.ru).

**PEREVEZENTSEV Vladimir Vasilyevich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: perevezentsev@bmstu.ru).

### Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Солонин В.И., Крапивцев В.Г., Перевезенцев В.В. Динамические процессы при всплывании тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-440. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 10, с. 56–62, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-56-62.

### Please cite this article in English as:

Solonin V.I., Krapivtsev V.G., Perevezentsev V.V. Dynamic Processes of Fuel Assemblies Lifting in the VVER-440 Reactor. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 10, pp. 56–62, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-56-62.