

В. И. Солонин, Ф. Д. Сорокин,
В. В. Перевезенцев

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ В ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Разработанная авторами для условий колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости модель демпфирования использована для определения количественных характеристик рассеяния энергии колебаний в потоке теплоносителя. При обтекании пучка твэлов наряду с молекулярной вязкостью проявляются и эффекты турбулентной вязкости. На этом основании демпфирование колебаний пучка в условиях продольного обтекания потоком теплоносителя рассмотрено на базе модели для макронеподвижной жидкости с эффективной вязкостью. Получено соответствие расчетных и экспериментальных значений декрементов колебаний, что подтверждает справедливость обобщения модели демпфирования в макронеподвижной жидкости на условия течения теплоносителя.

Ключевые слова: ядерные реакторы, тепловыделяющие сборки, гидродинамика, вибрации пучков твэлов, вибропрочность, демпфирование колебаний, влияние потока на демпфирование.

Вибрации стержневых тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) в тепловыделяющих сборках (ТВС) энергетических ядерных реакторов с легкой водой являются одной из основных причин возникновения дефектов оболочек ТВЭлов вплоть до их разгерметизации и выхода радиоактивных продуктов деления в теплоноситель [1]. Изгибные деформации пучка ТВЭлов, объединенных дистанционирующими решетками в ТВС, приводят в результате усталостных процессов к образованию и последующему развитию микротрещин оболочек. В зоне контакта пучков дистанционирующих решеток с оболочками из-за вибраций происходит их истирание (фреттинг-износ) и могут образоваться сквозные дефекты. Взвешенные в теплоносителе мелкие твердые частицы (например, продукты коррозии), попадая в пространство между дистанционирующей решеткой и оболочкой ТВЭла, усиливают процесс ее истирания при вибрациях. Наконец, в зоне крепления концевых элементов ТВЭлов в нижней опорной решетке, используемой в отечественных конструкциях ТВС ВВЭР, из-за вибраций возникают знакопеременные напряжения, которые могут привести к повреждениям концевых элементов с нарушением условий закрепления ТВЭлов. Поэтому разработка моделей расчета интенсивности вибраций пучков ТВЭлов в продольном потоке теплоносителя является важной проблемой повышения надежности и безопасности эксплуатации ядерных энергетических установок.

Тепловыделяющие сборки в целом и пучок ТВЭлов, в частности, с точки зрения гидродинамически возбуждаемых вибраций необходимо

рассматривать как гидроупругую колебательную систему, состоящую из механической и гидродинамической подсистем. Сложный характер их взаимодействия, недостаточно изученные закономерности формирования нестационарных гидродинамических нагрузок со стороны потока на обтекаемые поверхности, влияние характеристик потока на динамические свойства механической подсистемы, малочисленные количественные данные по эффектам демпфирования колебаний обуславливают отсутствие универсальных методик прогнозирования вибрационного поведения ТВС. В настоящее время имеется успешный опыт расчетного анализа и экспериментальных исследований, главным образом, собственных частот и форм изгибных и крутильных колебаний, конструкционного демпфирования ТВС ядерных реакторов. В то же время механизмы взаимодействия механической и гидродинамической подсистем исследованы недостаточно.

В частности, отсутствуют количественные данные по эффектам гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов в потоке теплоносителя. Демпфирование (конструкционное и гидродинамическое) и действующие со стороны потока гидродинамические нагрузки определяют интенсивность вибраций пучка твэлов и ТВС в целом. Диссипативную силу (силу сопротивления колебаниям) традиционно считают пропорциональной скорости движения упругого элемента:

$f_{dis} \sim -\zeta \frac{d\delta}{d\tau}$, где ζ — коэффициент демпфирования; δ — виброперемещение [2]. Очевидно, что коэффициент демпфирования складывается из двух составляющих, одна из которых ζ_k обусловлена конструктивными потерями энергии (трение в зоне контактов пуклевки дистанционирующих решеток с оболочками твэлов, внутреннее демпфирование в материале оболочек и т.д.), а вторая ζ_g — потерями энергии на преодоление сопротивления колебаниям со стороны потока теплоносителя:

$$\zeta = \zeta_k + \zeta_g. \quad (1)$$

Коэффициент конструкционного демпфирования пучка твэлов зависит от многих характеристик ТВС как механической системы, и его количественные значения могут быть определены только экспериментально. По данным работы [3], коэффициенты гидродинамического демпфирования могут существенно превышать коэффициенты конструкционного демпфирования и их роль может быть определяющей в ограничении интенсивности вибраций. Поэтому исследования процессов рассеяния энергии колебаний пучка твэлов в продольном потоке теплоносителя и получение надежных количественных данных по гидродинамическому демпфированию колебаний являются необходимым этапом разработки моделей гидродинамически возбуждаемых вибраций ТВС ядерных реакторов.

В предыдущей работе [4] авторов предложен механизм и разработана модель демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости применительно к чехловым ТВС водоохлаждаемых

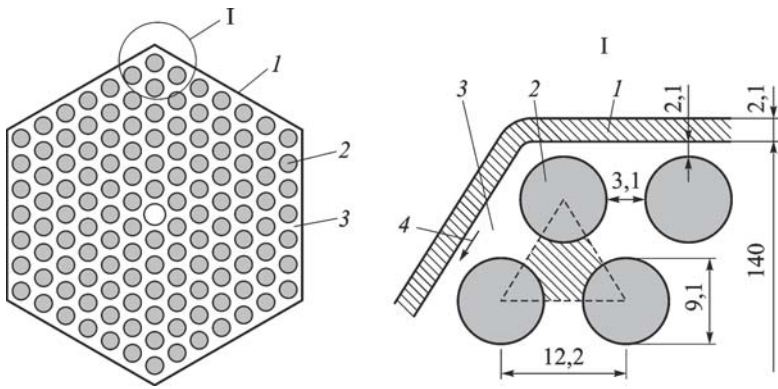


Рис. 1. Поперечное сечение пучка твэлов в шестигранном чехле ТВС:

1 — шестигранный чехол; 2 — внешний ряд твэлов; 3 — зазор между внутренней поверхностью чехла и внешним рядом твэлов; 4 — перемещение жидкости по периметру зазора

реакторов. В соответствии с работой [4] демпфирование колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости связано с рассеянием энергии из-за затрат на перемещение жидкости по периметру зазора между внутренней поверхностью шестигранного чехла и внешним рядом твэлов пучка (рис. 1). Виброперемещения пучка твэлов как единого целого приводят к возникновению периодических перемещений жидкости по периметру этого зазора. На базе уравнений движения в форме Лагранжа и неразрывности для течения в зазоре получены соотношения для оценки присоединенной массы и коэффициента гидродинамического демпфирования в макронеподвижной жидкости. Полученные результаты показывают, что гидродинамическое демпфирование в макронеподвижной жидкости может быть соизмеримо или превышать конструкционное демпфирование. Продольное обтекание пучка твэлов теплоносителем приводит к интенсификации процессов рассеяния энергии колебаний.

Разработанная модель гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости [4] распространена и на условия течения теплоносителя в ТВС, при которых отмечается интенсификация процессов рассеяния энергии колебаний. Исходным является допущение, что при турбулентном течении теплоносителя условия колебательных движений жидкости по периметру зазора между чехлом и пучком твэлов определяются эффектами молекулярной и турбулентной вязкости. Турбулентная вязкость потока в ТВС с продольным течением жидкости в решетке твэлов и при малых амплитудах колебаний слабо зависит от их величины. Это дает возможность оценить турбулентную вязкость и рассматривать повышение демпфирующих свойств потока жидкости как следствие влияния эффективной вязкости в модели макронеподвижной жидкости. В свете изложенного для оценки характеристик гидродинамического демпфирования в потоке предлагается использовать модель для макронеподвижной жидкости, эффективная вязкость которой зависит от

скорости течения. Очевидно, что при таком подходе качество оценки демпфирующих свойств потока будет определяться значениями коэффициентов эффективной вязкости жидкости, заполняющей зазор между внутренней поверхностью шестигранного чехла и внешним рядом твэлов колеблющегося пучка.

Важно отметить, что указанный коэффициент эффективной вязкости движущейся жидкости здесь рассматривается как параметр, который в рамках модели демпфирования качественно и количественно учитывает влияние течения на рассеяние энергии колебаний. Поэтому его значение может быть принято постоянным в сечении, а не изменяющимся от оси потока к поверхности, как это имеет место для течений в каналах. Значение коэффициента эффективной вязкости может быть определено по гидравлическому сопротивлению пучка твэлов, полученному расчетом или экспериментально.

С учетом принятых допущений течение в зазоре между чехлом и внешним рядом твэлов пучка описывается уравнениями Навье–Стокса для стационарного течения жидкости в плоском канале [5] с эффективной вязкостью $\mu_{\text{эф}}$:

$$\mu_{\text{эф}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Из уравнений (2) следует оценка коэффициента эффективной вязкости $\mu_{\text{эф}}$ жидкости, в которой происходят колебания пучка твэлов:

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{h^2}{12\bar{u}} \frac{dp}{dz}. \quad (3)$$

где h — ширина зазора между чехлом и внешним рядом твэлов пучка.

Значения $\mu_{\text{эф}}$ были получены по экспериментальным данным о потерях давления в пучке твэлов натуральных размеров макета ТВС ВВЭР-440. Для этого измеряли перепады статического давления на внутренней поверхности шестигранного чехла при проливках макета на гидродинамическом стенде кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Средняя скорость течения в макете ТВС составляла до $\sim 5,6$ м/с, что в 1,5 раза превышает эксплуатационную скорость в ТВС ВВЭР-440. Градиент гидравлического сопротивления макета при различных скоростях течения воды приведен в таблице. Используя полученные по уравнению (3) значения $\mu_{\text{эф}}$ и модель демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости, получены значения коэффициентов гидродинамического демпфирования и соответствующих им декрементов колебаний. При этом ширина приведенного зазора между внутренней поверхностью чехла и внешним рядом твэлов на основе данных работы [4] принималась равной $h = 5,5$ мм. Результаты расчетов значений коэффициентов демпфирования и декрементов колебаний для различных скоростей течения воды в макете ТВС также представлены в таблице. Видно, что коэффициент демпфирования колебаний за счет движения теплоносителя в

ТВС увеличивается и при скорости 5,59 м/с более чем в 8 раз больше по сравнению с полученным для макронеподвижной жидкости. Здесь же приведены относительные значения эффективной вязкости $\mu_{эф}/\mu_0$ (где μ_0 — молекулярная вязкость) в зазоре, оцененные по измеренным потерям статического давления в ТВС. При скорости воды в ТВС 5,59 м/с эффективная вязкость более чем в 27 раз превышает молекулярную, что и обуславливает более интенсивное рассеяние энергии колебаний пучка.

Таблица

Гидравлическое сопротивление и демпфирующие свойства потока теплоносителя в ТВС ВВЭР-440

Средняя скорость воды в макете ТВС \bar{u} , м/с	Градиент гидравлического сопротивления пучка твэлов dp/dz , кПа/м	Относительная эффективная вязкость, $\mu_{эф}/\mu_0$	Коэффициент демпфирования ζ , Н·с/м ²	Декремент колебаний d
0	0	1,0	256	0,34
0,43	0,95	5,1	660	0,58
0,86	2,55	6,9	791	0,65
1,29	5,25	9,5	967	0,75
1,72	8,59	11,6	1106	0,83
2,15	12,76	13,8	1244	0,90
2,58	17,74	16,0	1383	0,98
3,01	22,65	17,5	1480	1,04
3,44	28,69	19,4	1603	1,11
3,87	35,02	21,1	1710	1,17
4,30	41,92	22,7	1817	1,23
4,73	49,89	24,6	1940	1,30
5,16	57,50	25,9	2033	1,36
5,59	158,20	27,7	2148	1,42

В связи со значительным ростом эффективной вязкости при увеличении скорости продольного потока следует отметить следующее. Гидродинамическое демпфирование при колебаниях труб в макронеподвижной жидкости ранее рассматривалось рядом авторов. В частности, в работе [6] расчет коэффициента демпфирования основывался на рассмотрении потерь энергии в вибрирующем пограничном слое. При этом предполагалось очевидным, что в системе коаксиально расположенных труб пограничные слои на неподвижной поверхности наружной трубы и движущейся поверхности внутренней трубы не взаимодействуют друг с другом, так как размеры слоев весьма малы. Для макронеподвижной воды [6] $\zeta = 250$ Н·с/м², что практически совпадает с полученным в настоящей работе значением. В условиях течения

воды в ТВС и при замене в работе [6] молекулярной вязкости μ_0 на эффективную вязкость $\mu_{эф}$ формулы [6] дают значения ζ , существенно меньшие в сравнении с оценками по разработанной модели. Расхождения достигают 40 % и могут быть объяснены взаимным влиянием пограничных слоев, которое учитывается в работе [4], но не учитывается в работе [6]. Размеры пограничных слоев увеличиваются при повышении эффективной вязкости и становятся сопоставимыми по величине с приведенным зазором h .

Валидация предложенной модели демпфирования и декрементов колебаний проведена по результатам экспериментального определения характеристик демпфирования, основанного на анализе процессов затухания механических колебаний выведенного из состояния равновесия пучка твэлов макета ТВС ВВЭР-440 путем создания его начального прогиба [4]. Все эксперименты проводились на полномасштабном макете ТВС ВВЭР-440 второго поколения, изготовленном из штатных конструкционных материалов по штатной технологии. Макет отличается от натурной ТВС только наличием свинцовых имитаторов таблеток ядерного топлива. Методика экспериментального исследования характеристик демпфирования позволяет определить суммарный эффект рассеяния энергии колебаний пучка твэлов также за счет конструкционных потерь и влияния гидродинамического сопротивления. В условиях отсутствия воды в макете ТВС, когда затухание колебаний обусловлено только конструкционными потерями, значение коэффициента демпфирования составило $\zeta_k = 250 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$. Это значение соответствует декременту колебаний $d \approx 0,33$, соизмеримому с расчетным значением для макронеподвижной жидкости. Следует отметить высокие конструкционные демпфирующие свойства пучка твэлов, объединенных дистанционирующими решетками. По данным работы [2], для отдельных труб с числом опор до 8 значения декрементов колебаний не превышают 0,15.

Колебания пучка твэлов фиксировались с помощью установленных в некоторых твэльных трубках двухкомпонентных пьезорезистивных виброакселерометров, включенных в измерительные каналы с интегрирующими усилителями [7]. На рис. 2 приведены характерные записи затухающих колебаний пучка твэлов при различных скоростях течения воды в ТВС. Видно, что с ростом скорости течения усиливается демпфирующее влияние потока. На основе полученных реализаций затухающих колебательных процессов были построены их огибающие – экспоненциальные функции убывания амплитуд при различных скоростях течения воды в ТВС (рис. 3):

$$\delta(z, \tau) = \delta(z, 0) \exp(-\gamma\tau), \quad (4)$$

где $\delta(z, \tau)$ и $\delta(z, 0)$ – амплитуды колебаний в сечении пучка z в моменты времени τ и $\tau = 0$; γ – коэффициент затухания амплитуды колебаний.

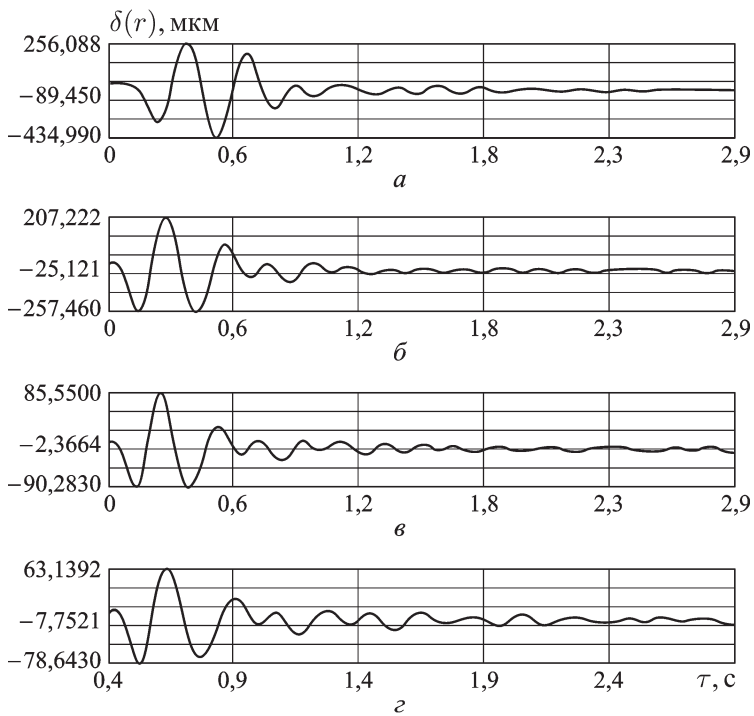


Рис. 2. Характерные затухающие колебания выведенного из состояния равновесия за счет начального прогиба пучка твэлов при различных скоростях течения теплоносителя в ТВС:

a – в макронеподвижной жидкости; *б* – $\bar{u} = 0,86$ м/с; *в* – $2,58$ м/с; *г* – $3,44$ м/с

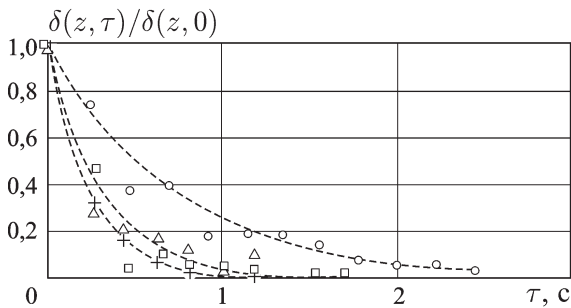


Рис. 3. Функции затухания амплитуд колебаний пучка твэлов при различных скоростях течения теплоносителя в ТВС:

○ – в макронеподвижной жидкости; □ – $\bar{u} = 2,15$ м/с; Δ – $3,87$ м/с

Декремент колебаний определяется по значениям амплитуд, отстоящих друг от друга на период колебаний $T = 1/f$

$$d = \ln \frac{\delta(z, \tau)}{\delta(z, \tau + T)} = \gamma T = \gamma / f, \quad (5)$$

где f – низшая собственная частота колебаний пучка твэлов.

Низшая собственная частота колебаний пучка твэлов в воде (с учетом присоединенной массы) составляет $3,9$ Гц [4] и практически не

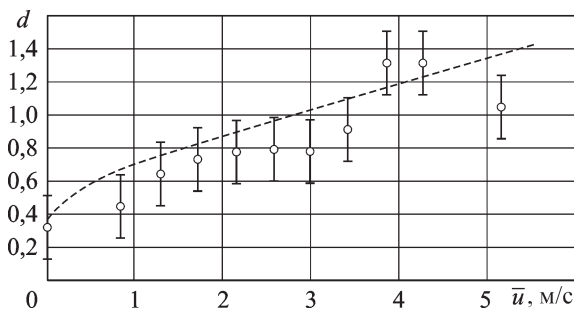


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета (---) с экспериментальными значениями (○) декрементов колебаний пучка твэлов в зависимости от скорости течения теплоносителя в ТВС

зависит от скорости течения воды. На рис. 4 приведены результаты расчетов декрементов колебаний на основе модели для макронеподвижной жидкости с эффективной вязкостью $\mu_{эф}$ в сопоставлении с экспериментальными значениями. Можно отметить достаточно хорошее (в пределах 35 %) соответствие расчетных и экспериментальных значений декрементов колебаний.

Результаты расчетов и экспериментальные данные свидетельствуют о значительном влиянии турбулентного течения теплоносителя в ТВС на эффекты демпфирования колебаний пучка твэлов, что способствует ограничению амплитуд вибраций при высоких скоростях потока. В области скоростей потока более 1 м/с расчетные значения декрементов колебаний практически линейно зависят от скорости потока, что согласуется с данными работы [6].

Таким образом, проведенные расчетные и экспериментальные исследования показывают, что разработанная для макронеподвижной жидкости модель демпфирования колебаний пучка твэлов ТВС реакторов ВВЭР может быть использована и для расчета демпфирования колебаний в движущейся жидкости. При этом интенсификация процессов рассеяния энергии колебаний в условиях течения трактуется как увеличение затрат энергии движения пучка на перераспределение по периметру зазора более вязкой макронеподвижной жидкости. Полученные данные по коэффициентам демпфирования и декрементам колебаний свидетельствуют об определяющей роли гидродинамических процессов рассеяния энергии колебаний пучка твэлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадов Г. В., Павелко В. И., Усанов А. И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. – М.: Энергоиздат, 2004. – 344 с.
2. Федорович Е. Д., Фокин Б. С., Аксельрод А. Ф., Гольдберг Е. Н. Вибрации элементов оборудования ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 168 с.
3. Динамика конструкций гидроаэроупругих систем / К.В. Фролов, Н.А. Махутов, С.М. Каплунов и др. – М.: Наука, 2002. – 397 с.

4. Солонин В. И, Сорокин Ф. Д., Перевезенцев В. В. Демпфирование колебаний пучка твэлов чехловых тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. – 2008. – № 3. – С. 75–85.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
6. Федотовский В. С., Синявский В. Ф., Спиров В. С., Кухтин А. Б. Гидродинамическое демпфирование колебаний упругой трубы в продольном турбулентном потоке // Вопросы судостроения. ЦНИИ “Румб”. – 1983. – Вып. 33. – С. 65–71.
7. Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для исследования вибраций ТВС ВВЭР-440 / С.И. Гетья, В.И. Солонин, В.В. Перевезенцев и др. // Датчики и системы. – 2006. – № 10. – С. 23–29.

Статья поступила в редакцию 20.04.2009

Владимир Иванович Солонин родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана, Заслуженный деятель науки и техники РФ. Автор более 150 научных работ в области гидродинамики и теплофизических процессов в ядерных энергетических установках.

V.I. Solonin (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Nuclear Reactors and Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Author of more than 150 publications in the field of hydrodynamics and thermal and physical processes in nuclear power generating facilities.



Федор Дмитриевич Сорокин родился в 1960 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области динамики и прочности конструкций.

F.D. Sorokin (b. 1960) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. D. Sc. (Eng.), professor of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of dynamics and strength of constructions.



Владимир Васильевич Перевезенцев родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области гидродинамики и теплофизических процессов в ядерных энергетических установках.

V.V. Perevezentsev (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear Reactors and Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of hydrodynamics and thermal and physical processes in nuclear power generating facilities.

