

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

621.311.25

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ВИБРАЦИИ ПУЧКА ТВЭЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В ТВС ВВЭР-440

Д-р техн. наук, проф. В.И. СОЛОНИН, канд. техн. наук, доц. В.В. ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ

Получены на полномасштабном макете экспериментальные данные по гидродинамически возбуждаемым вибрациям пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440. Показано существенное влияние гидродинамики потока перед опорной решеткой (на входе в пучок) на интенсивность вибраций. Разработана энергетическая модель возбуждения вибраций пучка, основанная на положении о равенстве в условиях стационарных вибрационных процессов подводимой к пучку твэлов энергии потока и диссипируемой при колебаниях пучка энергии из-за необратимых потерь при изгибных деформациях стенок оболочек твэлов, трением в дистанционирующих решетках и рассеянием энергии в потоке теплоносителя. На основе модели получено соотношение для оценки виброперемещений пучка по первой форме колебаний с использованием данных о среднеквадратичных значениях пульсаций давления на входе в пучок.

Experimental data on flow-induced vibrations of a fuel rods beam in fuel assembly WWER-440 are received on full scale test model. Essential influence of hydrodynamics of a stream before a lower end spacer grid (on an input in a fuel rods beam) on intensity of vibrations is shown. The power model of excitation of vibrations of fuel rods beam, based on regulations about equality in conditions of stationary vibrating processes brought to a fuel rods beam energy of a stream and dissipated is developed at fluctuations of a fuel rods beam of energy because of irreversible losses at bending deformations of walls of fuel rods clothing, by friction in spacer grids and dispersion of energy in a stream of the coolant. On the basis of model the expression for an estimation amplitude a fuel rods beam under the first form of fluctuations with use of the data on root-mean-square values of pulsations of pressure on an input in a fuel rods beam is received.

Исследование гидродинамически возбуждаемых вибраций тепловыделяющих сборок (ТВС) водоохлаждаемых реакторов является важным этапом отработки ее конструкции и позволяет получить информацию как о свойствах такой сложной механической системы, какой является ТВС, так и об условиях ее нагружения потоком теплоносителя.

ТВС реактора ВВЭР-440 как механическая колебательная система состоит из пучка расположенных по треугольной решетке тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), жестко закрепленных одним концом в нижней опорной решетке и через верхнюю дистанционирующую решетку — упругую опору связанных с шестигранной чехловой трубой. Кроме нижней и верхней опор, твэлы объединены в пучок промежуточными, не взаимодействующими с чехловой трубой, дистанционирующими решетками (рис. 1).

Расчетные методы в настоящее время не позволяют получать надежных количественных данных о вибрационном поведении ТВС, главным образом, из-за отсутствия информации о ее динамических характеристиках (собственные частоты, присоединенные массы и эффекты демпфирования) и действующих на конструкцию гидродинами-

ческих нагрузках в потоке теплоносителя. Основным способом получения этих данных — проведение экспериментов с использованием полномасштабных макетов.

Экспериментальные данные по гидродинамически возбуждаемым вибрациям твэлов в ТВС ВВЭР-440 получены на полномасштабных макетах, выполненных из штатных конструкционных материалов по штатной технологии, что обеспечило идентичность механических (статических и динамических) характеристик макетов рабочим ТВС в состоянии их поставки на АЭС. Исследования вибрационных характеристик макетов ТВС выполнены на гидродинамическом стенде [1]. В условиях частичного моделирования нагружения пучка твэлов потоком воды в контуре стенда средняя скорость воды при температуре до 50 °С в пучке твэлов макета составляла до 7 м/с, а давление не превышало 0,3 МПа. С целью изменения гидродинамических параметров потока на входе в пучок твэлов перед хвостовиком ТВС устанавливались влияющие на структуру потока входные устройства, в частности, дроссельные шайбы и перфорированный отверстиями диск. Перфорированный диск имел 149 отверстий диаметром 6 мм, расположенных по треугольной решетке с шагом 7,5 мм, что обеспечивало пористость около 0,5.

Достаточно простой и наиболее надежный способ определения динамических характеристик — это анализ затухающих процессов свободных колебаний выведенной из состояния равновесия механической системы. Динамические характеристики пучка определяли методом его начального отклонения в плоскости, перпендикулярной оси ТВС. Для экспериментального определения динамических характеристик пучка твэлов начальный прогиб обеспечивался за счет усилия стержня с электромагнитным приводом перпендикулярно грани пучка в области шестой дистанционирующей решетки. При отключении питания электромагнита прекращается силовое воздействие стержня, и пучок совершает свободные колебательные движения (рис. 2). Реализации затухающих колебаний пучка фиксировались по сигналам установленного в периферийном среднем по грани пучка твэлов в шестом пролете, т.е. практически в середине пучка. Видно, что в условиях штатного закрепления ТВС собственная частота пучка в воздухе составляет около 4,9 Гц. В макронеподвижной воде, как и следовало ожидать, собственная частота из-за эффектов присоединенной массы становится ниже и составляет около 3,9 Гц. Течение воды через ТВС практически не влияет на собственную частоту пучка. По значениям собственных частот в воздухе и в воде была оценена присоединенная масса для пучка твэлов, колеблющегося на собственной частоте. Относительная присоединенная масса (по отношению к присоединенной массе в идеальной жидкости

$$M_0 = (\pi d^2/4)\rho_{\text{ж}}n,$$

где d — диаметр оболочки твэла; n — количество твэлов в пучке; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность воды) составила 3,49. Зависимость логарифмического декремента колебаний от скорости потока воды в пучке приведена на рис. 3. Видно, что наблюдается практически линейная зависимость логарифмического декремента колебаний от скорости потока, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [2] и теоретическим анализом [3].

Исследовались вибрационные характеристики твэлов с использованием двухкомпонентных тензорезистивных виброакселерометров в комплекте с аналоговыми интегрирующими усилителями. Одновременно с виброперемещениями твэлов измерялись пульсации давления потока воды перед опорной решеткой, т.е. на входе в пучок, и в пяти сечениях по длине пучка на внутренней поверхности чехла макета ТВС [4].

Анализ условий гидродинамического нагружения проводился, главным образом, по данным об амплитудно-частотных характеристиках пульсаций давления и их корреляци-

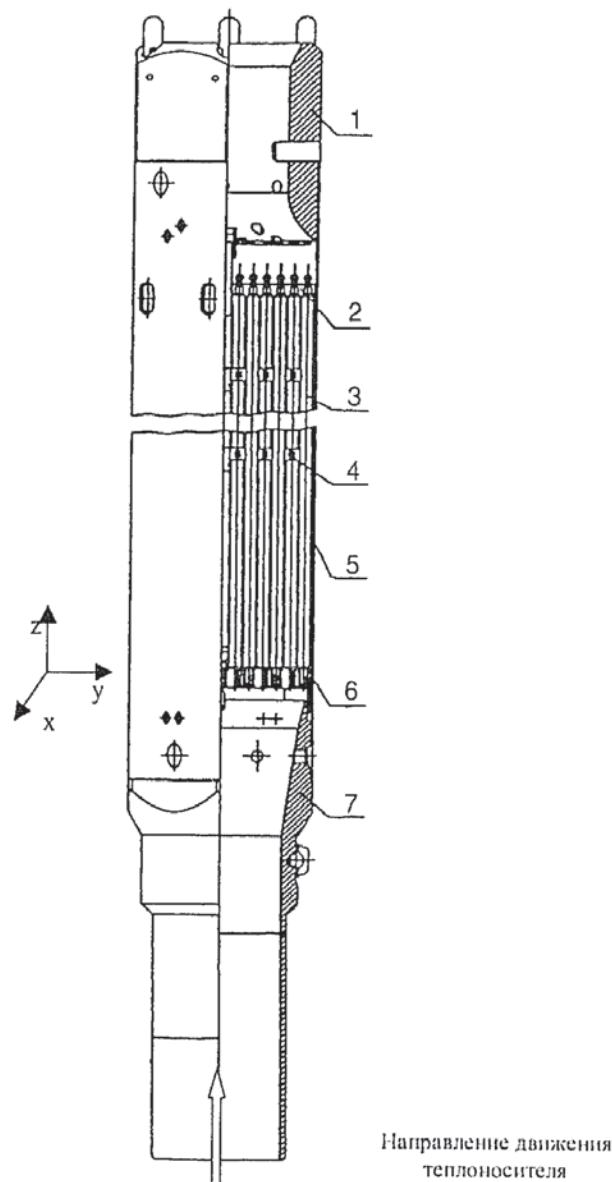


Рис.1. Тепловыделяющая сборка (кассета рабочая) ВВЭР-440: 1 — головка; 2 — решетка верхняя; 3 — тепловыделяющий элемент; 4 — решетка дистанционирующая; 5 — чехол; 6 — решетка нижняя опорная; 7 — хвостовик

ях с вибрационными процессами. На рис. 4 приведены среднеквадратичные пульсации давления перед нижней опорной решеткой в зависимости от скорости течения теплоносителя в пучке для различных входных устройств. Видно, что существенное затеснение проходного сечения хвостовика ТВС дроссельной шайбой с диаметром центрального отверстия 50 мм приводит к генерации пульсаций давления высокой интенсивности, увеличивающихся с ростом скорости течения практически по квадратичному закону. В то же время при установке перед хвостовиком равномерно перфорированного диска или в условиях без входного устройства пульсации давления увеличиваются с ростом скорости течения сравнительно слабо. Причем перфорированный диск формирует сравнительно мелкомасштабную структуру потока с равномерным распределением скоростей потока в сечении перед опорной решеткой. Все это приводит даже к некоторому снижению уровней пульсаций давления по сравнению с невозмущенным какими-либо входными устройствами потоком.

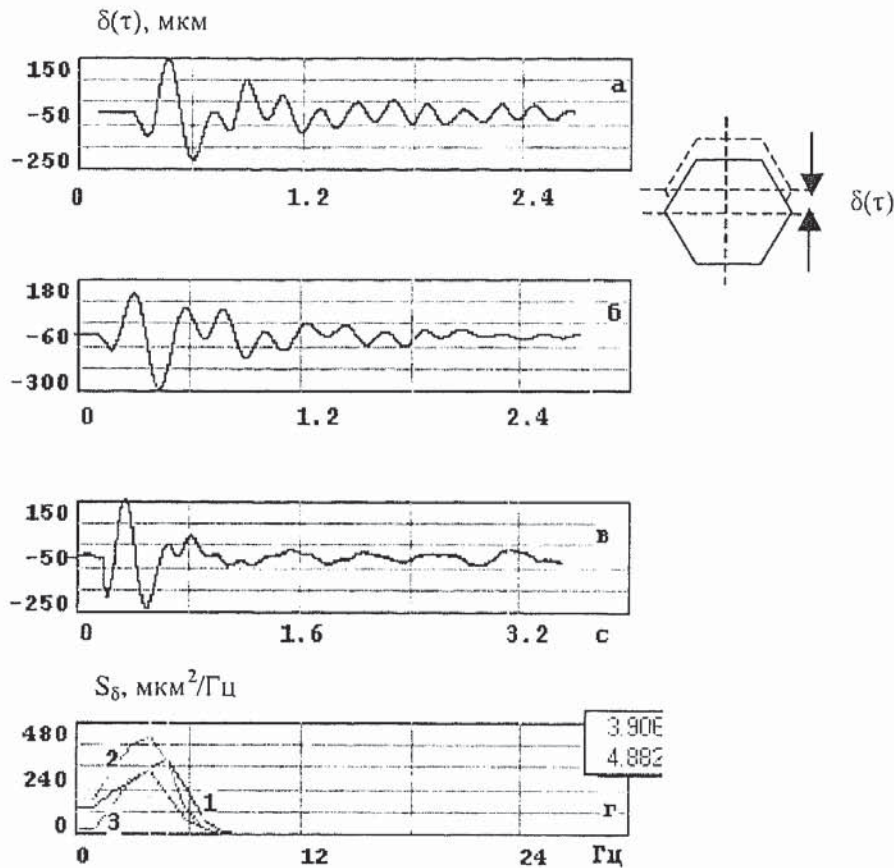


Рис.2. Затухающие колебания пучка твэлов при начальном отклонении 600 мкм в воздухе (а), в макронеподвижной воде (б), при скорости течения воды в пучке 2,58 м/с (в) и соответствующие им спектры колебаний (г): 1 — в воздухе; 2 — в макронеподвижной воде; 3 — при скорости воды в пучке 2,58 м/с

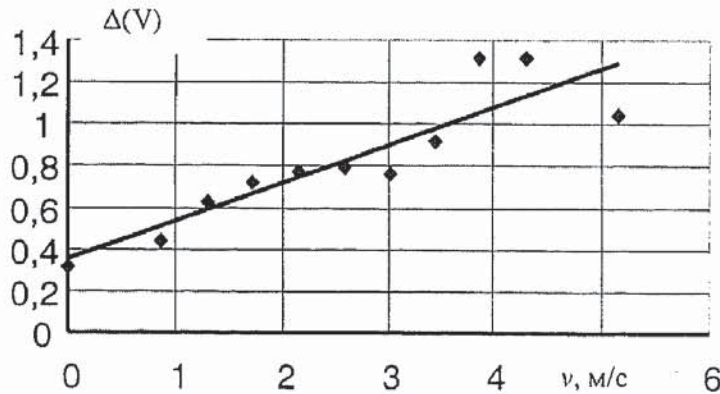


Рис. 3. Зависимость логарифмического декремента колебаний от скорости воды в пучке твэлов

На рис. 5 приведено сопоставление уровней виброперемещений в середине пучка твэлов в условиях существенно отличающейся гидродинамики потока. В полном соответствии с зависимостью среднеквадратичных значений пульсаций давления от скорости течения теплоносителя (рис. 3) изменяются и виброперемещения пучка твэлов. Видно, что более высоким уровням пульсаций давления на входе в пучок при наличии дроссельной шайбы диаметром 50 мм перед хвостовиком ТВС соответствуют и большие значения виброперемещений. При этом резкое увеличение виброперемещений наблюдается при скоростях теплоносителя более 2 м/с, когда и пульсации давления значительно, более чем в два раза, выше по сравнению с условиями отсутствия входного устройства или при наличии перфорированного диска. Дроссельная шайба диаметром 50 мм формирует

крупномасштабную вихревую структуру потока, которая, деформируясь, проходит через нижнюю опорную решетку и возбуждает достаточно интенсивные вибрации. Наиболее низкие уровни виброперемещений характерны для сформированного перфорированным диском потока теплоносителя, когда пульсации давления также принимают наименьшие значения.

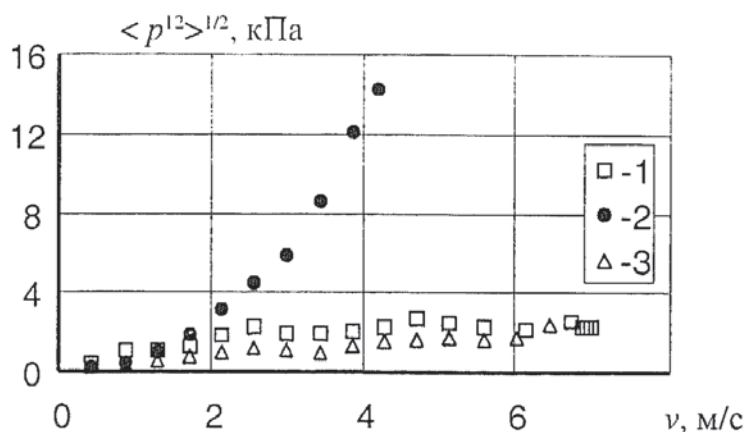


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичных в общей полосе частот значений пульсаций давления перед нижней опорной решеткой ТВС ВВЭР-440 от скорости течения теплоносителя в пучке твэлов для различных гидродинамических условий на входе в пучок: 1 — невозмущенный поток; 2 — дроссельная шайба диаметром 50 мм; 3 — перфорированный диск

В условиях стационарных процессов подводимая к пучку твэлов энергия потока равняется диссипации энергии при вибрации, обусловленной необратимыми потерями при изгибных деформациях стенок в дистанционирующих решетках и рассеянием энергии в потоке теплоносителя. В первом приближении можно считать, что диссипация связана с колебаниями пучка твэлов по первой форме, для которой поперечные виброперемещения при условиях шарнирного закрепления концов описываются выражением [5]

$$y(z, \tau) = y_{\max} \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \sin(2\pi f_1 \tau), \quad (1)$$

где y_{\max} — амплитуда виброперемещений; f_1 — собственная частота колебаний пучка твэлов.

Независимо от природы процессов рассеяния энергии при вибрациях сила сопротивления колебаниям может быть представлена в виде [5]

$$f_{\text{дисс}}(z, \tau) = 2f_1 \Delta(V) M \partial y(z, \tau) / \partial \tau, \quad (2)$$

где Δ — логарифмический декремент колебаний, M — полная (с учетом присоединенной массы жидкости) масса на единицу длины пучка твэлов.

При смещении участка dz пучка твэлов на величину dy при вибрации происходит рассеяние энергии в количестве

$$dE_{\text{дисс}} = f_{\text{дисс}}(z, \tau) dz dy. \quad (3)$$

Тогда за период времени $T = 1/f_1$ средняя мощность диссипативных сил при вибрациях пучка твэлов длиной l с учетом (1), (2) составит

$$\langle N_{\text{дисс}} \rangle = \frac{\int_0^l \int_0^T dE}{T} = f_1 \int_0^l \int_0^T dE = 2\pi^2 \delta M \langle y_{\text{max}}^2 \rangle f_1^3 l, \quad (4)$$

где $\langle y_{\text{max}}^2 \rangle$ — средний квадрат виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов.

Подвод энергии от потока теплоносителя к пучку твэлов обусловлен переносом пульсационной энергии вдоль их боковой поверхности. Пульсации давления $\langle p'^2 \rangle^{1/2} : \rho \langle u'^2 \rangle / 2$ характеризуют объемную удельную пульсационную энергию потока теплоносителя. При объемном расходе теплоносителя Q в единицу времени к пучку твэлов подводится пульсационная энергия

$$N_{\text{гидр}} = \langle p'_{\text{вх}}'^2 \rangle^{1/2} Q, \quad (5)$$

где $\langle p'_{\text{вх}}'^2 \rangle^{1/2}$ — среднеквадратичные значения пульсаций давления на входе в пучок.

Тогда плотность потока пульсационной энергии в пучке твэлов

$$q = N_{\text{гидр}} / F_{\text{пр}} = \langle p'_{\text{вх}}'^2 \rangle^{1/2} v, \quad (6)$$

где $F_{\text{пр}}$ — площадь проходного сечения пучка, v — скорость теплоносителя в пучке.

Часть пульсационной энергии распределяется по боковой поверхности продольно обтекаемому пучку твэлов и вызывает их изгибные колебания. Тогда подводимая к пучку твэлов за счет гидродинамических сил мощность может быть представлена в виде

$$\langle N_{\text{возб}} \rangle = q S_{\text{бок}} = \langle p'_{\text{вх}}'^2 \rangle^{1/2} v \pi n d l, \quad (7)$$

где $S_{\text{бок}}$, n , d — площадь боковой поверхности твэлов пучка, количество твэлов в пучке и диаметр твэла соответственно.

Часть мощности гидродинамических сил затрачивается на возбуждение вибрационных процессов в пучке твэлов, и, следовательно, можно записать равенство

$$\langle N_{\text{дисс}} \rangle = C \langle N_{\text{возб}} \rangle, \quad (8)$$

Из (8) следует соотношение для оценки с точностью до постоянной C среднеквадратичных значений виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов

$$\langle \bar{y}_{\text{max}}^2 \rangle^{1/2} = C \sqrt{\frac{\langle p'_{\text{вх}}'^2 \rangle^{1/2} v n d}{2\pi \Delta(V) M f_1^3}}. \quad (9)$$

Здесь логарифмический декремент колебаний $\Delta(V)$ является функцией скорости течения теплоносителя в пучке.

Экспериментальные значения виброперемещений пучка твэлов по первой форме колебаний определялись путем цифровой фильтрации сигналов на выходе с интегрирующих усилителей, размещенных в середине пучка твэлов виброакселерометров. На рис. 5 приведены экспериментальные данные по среднеквадратичным значениям виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов, полученные в условиях существенных различий формирования структуры потока на входе в пучок, в сопоставлении с расчетом по (9). При этом виброперемещения по двум взаимно перпендикулярным

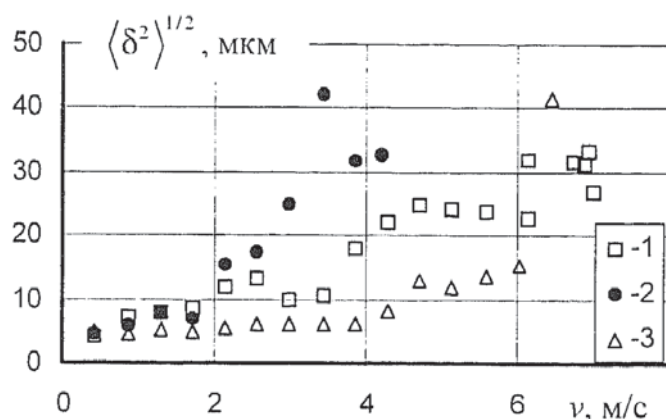


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичных в общей полосе частот значений виброперемещений в середине пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 от скорости течения теплоносителя для различных гидродинамических условий на входе в пучок: 1 — невозмущенный поток; 2 — дроссельная шайба диаметром 50 мм; 3 — перфорированный диск

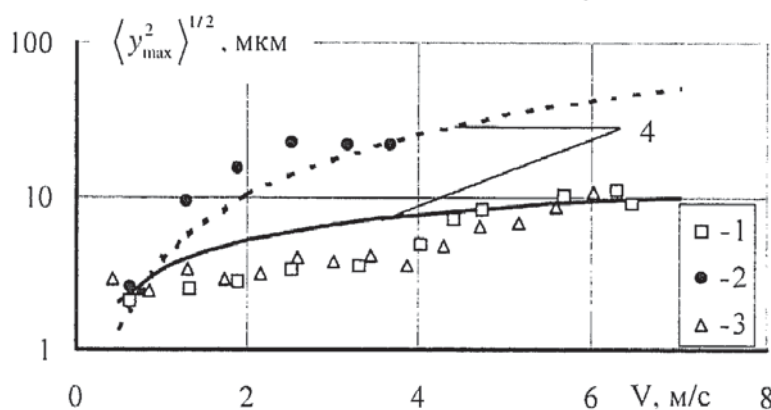


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных и расчетных среднеквадратичных значений виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов ТВС ВВЭР-440: 1 — невозмущенный поток; 2 — дроссельная шайба диаметром 50 мм; 3 — перфорированный диск; 4 — расчет по формуле (9)

направлениям суммировались и определялись результирующие виброперемещения следующим образом $(\bar{y}_{\max}^2)^{1/2} = \sqrt{\delta_{\max x}^2 + \delta_{\max y}^2}$. Видно, что расчет при значении константы $C=1,6 \cdot 10^{-5}$ достаточно хорошо согласуется с экспериментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенд для гидродинамических и вибрационных исследований ТВС ВВЭР-440 / В. И. Солонин, В.Г. Крапивцев, В.В. Перевезенцев и др. / Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. — М.: изд-во МЭИ, 1999. — С. 59—61.
2. Shin Y.S., Wambsganss M.W. Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review. Nuclear Engineering and Design, 1977. — V. 40. — № 2. — P.p. 235—284.
3. Гидродинамическое демпфирование колебаний упругой трубы в продольном турбулентном потоке / В.С. Федотовский, В.Ф. Синявский, В.С. Спиров и др. // Вопросы судостроения. ЦНИИ «Румб». — 1983. — Вып. 33. — С. 65—71.
4. Измерение пульсаций давления и вибраций в пучках стержней / Р.С. Брехов, С.И. Гетья, С.М. Шарикпулов и др. / Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. — С. 61—62.
5. Динамика конструкций гидроаэроупругих систем / Фролов К.В., Махутов Н.А., Каплунов С.М. и др. — М.: Наука, 2002. — 397 с.