

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В ОБОСНОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ТВЭЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ВИНТООБРАЗНОГО ВИХРЯ

В.В. Шипилов; Е.Ф. Авдеев

ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249040, Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д. 1



Представлена попытка теоретического обоснования колебаний твэлов в ТВС, приводящих к разрушению дистанционирующих решеток и поломкам твэлов в местах заделки, а также истиранию твэлов на периодических расстояниях.

Использованы опытные данные, полученные при организации вокруг стержня винтообразного вихревого шнура. Найдено теоретическое выражение поперечной мощности, полученное на основании рассмотрения взаимодействия инерционных волн и винтообразного вихря. Приведены расчёты разнонаправленных по длине стержня сил, вызывающих его колебание. Величина сил найдена из опытных данных и по теоретической формуле. Причем значения найденных величин по теоретической формуле и опытные данные оказались очень близки друг к другу.

Указана возможная опасность применения дистанционирующих решеток с дефлекторами, которые закручивают поток вокруг твэла, а это как раз и способствует истиранию и поломкам твэлов. Их ресурсные испытания проводились на воздухе, в то время как в формулу для поперечной мощности входит плотность. Также опасения вызывает применение расходомеров ШАДР в технологических каналах РБМК.

Продолжение данной работы подразумевает определение амплитуды колебаний стержня, возникающего максимального напряжения в стержне и сравнение его с допустимым напряжением на излом, а также решение уравнения колебаний при силе найденной природы.

Ключевые слова: винтообразный вихревой шнур, износ стержня, вектор угловой скорости, вектор инерционных волн, период и частота колебаний, амплитуда колебаний давления, поперечная мощность.

В монографии [1] приведены результаты уникального эксперимента, моделирующего колебания твэла, при наличии в потоке винтообразного вихревого шнура, охватывающего стержень диаметром 3 мм. Стержень жестко закреплен в торцах прозрачной трубки диаметром 18 мм и длиной 2 м, по которой прокачивалась вода с высокими числами Рейнольдса (от $3,5 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^5$ и более). Вход в трубку организован таким образом, чтобы возник винтообразный вихревой шнур. Приведены его

© *В.В. Шипилов; Е.Ф. Авдеев, 2020*

фотографии (рис. 1), измерены пульсации давления и частота вибраций. Через 18 часов работы происходило разрушение дистанционирующих устройств (если таковые прикреплялись к стержню), истирание и разрыв стержня на периодических расстояниях или отрыв стержня в местах заделки (рис. 2).

Так как в [1] отсутствует теоретическое обоснование эксперимента, в представленной работе делается попытка, с одной стороны, найти поперечную мощность (произведение максимальной пульсации давления на поперечную скорость) по данным эксперимента, с другой – вычислить эту мощность по теоретической формуле, полученной при рассмотрении взаимодействия инерционных волн и вихревого шнура.

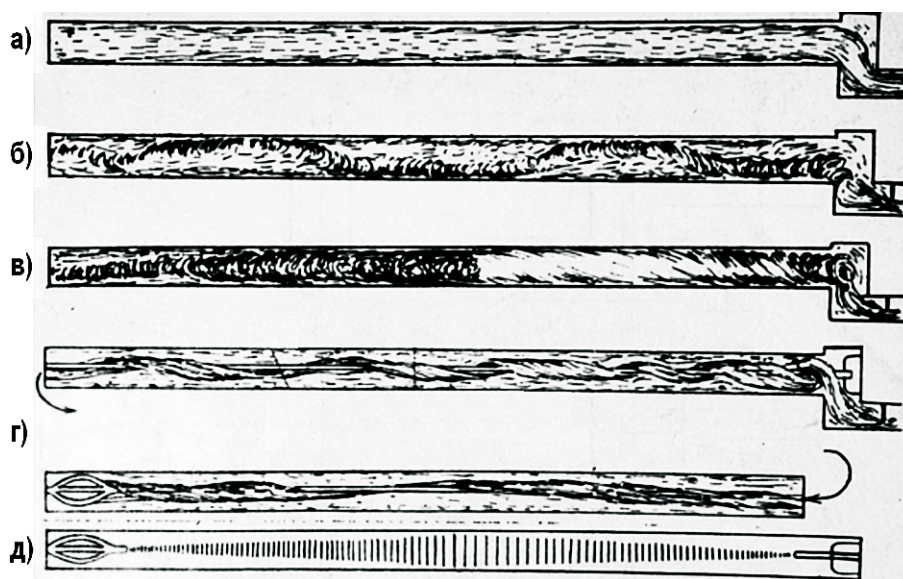


Рис.1. Гидродинамическая структура потока, воспроизведенная по фотоснимкам [1]

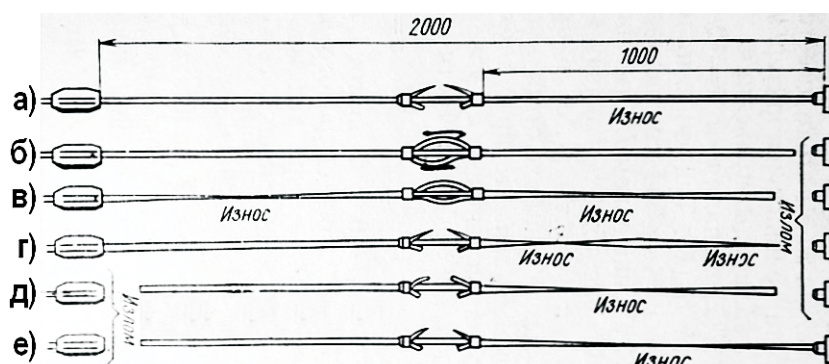


Рис.2. Схематический вид износа и излома стержней и разрушение дистанционирующего устройства от воздействия потока теплоносителя при наличии в нём вихревого шнура [1]

Приводится уравнение колебаний стержня [2] с сохранением наиболее важных с гидродинамической точки зрения членов. Дифференциальное уравнение колебаний стержня в потоке имеет вид

$$M \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \cdot y + \xi \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot y + E \cdot J \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x, t), \quad (1)$$

где y – поперечное смещение стержня; x – направление вдоль оси стержня; M – собственная масса стержня на единицу длины; m – присоединенная масса; U – средняя скорость потока; ξ – коэффициент гидродинамического демпфирования; E – модуль упругости; J – момент инерции сечения стержня; $F(x, t)$ – проекция возмущающей силы, действующей со стороны обтекающего турбулентного потока на стержень в направлении y (или внешнее гармоническое воздействие). Отметим, что в уравнении (1) опущен ряд членов, связанных со свойствами материала стержня и условиями заделки концов. Обычно эти члены малы, но при необходимости легко могут быть учтены.

Таким образом, реакция стержня на заданную возбуждающую силу $F(x, t)$ может быть определена, если будут известны присоединенная масса m и коэффициент демпфирования ξ , обусловленные динамическим взаимодействием колеблющегося стержня с потоком жидкости. Третье слагаемое в уравнении (1) имеет смысл силы инерции, действующей со стороны жидкости, движущейся по криволинейной траектории, на искривленный стержень.

В диссертации теоретически задаётся сила, направленная в сторону от положения равновесия стержня и изменяющаяся по гармоническому закону, а также рассматриваются частные случаи закрепления стержня (жесткая и шарнирная заделки концов или консоль). Из решения уравнения находится поперечное отклонение стержня. В отличие от виртуальной силы в данной диссертации делается попытка теоретического установления этой силы, возникающей при взаимодействии вихревого шнура со стержнем. После установления поперечной мощности, обусловленной вихревым шнуром, это делается просто делением мощности на скорость и умножением полученной пульсации давления на площадь миделя. Это невозможно сделать без теоретической формулы для поперечной мощности

$$P \cdot v = \rho \cdot \Omega \cdot A^2 \cdot \alpha^{-1} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

где P – максимальная пульсация давления; v – поперечная скорость; Ω – суммарная угловая скорость (от вихревого шнура и общего вращательного движения); α – абсолютное значение вектора инерционных волн (направлен всегда по направлению основного течения); ρ – плотность жидкости; θ – угол между угловой скоростью и вектором α .

Первоначально по данным эксперимента, определённым приближенно, так как точные значения даны только для частоты колебаний и пульсации давления, были найдены по частоте волны $n = 30$ кол·с⁻¹ период колебаний $T = 0,033$ с (приближенно), поперечная скорость $v = 0,9$ м·с⁻¹ и угловая скорость $\Omega = 187$ об·с⁻¹. По экспериментальным данным максимальной пульсации давления $P = 5395$ Па и поперечной скорости получена поперечная мощность $P \cdot v = 4855$ Вт·м⁻². Площадь миделя принята по длине волны 0,8 м и диаметру стержня $\sigma = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м² и определена поперечная сила, возбуждающая колебания,

$$F = P \cdot \sigma = 12,9 \text{ Н} = 1,32 \text{ кгс}. \quad (3)$$

Для теоретического определения поперечной мощности (согласно приведенной формуле) необходимо значение амплитуды скорости, величина вектора α и угла θ . Этот угол определен визуально по фотографии эксперимента и принят равным 30°. Величина вектора α находилась из условия

$$v = A \cdot \cos(\alpha x - 2\Omega t) \quad (4)$$

при $v = A$, т.е. $\alpha x - 2\Omega t = 0$, $t = T$, $x = \lambda$. В таком случае $\alpha = 2\Omega T / \lambda = 15$.

Расчёт, выполненный по теоретической формуле, даёт значения поперечной

мощности $P \cdot v = 5049 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, пульсации давления $P = 5610 \text{ Па}$, поперечной силы $F = 13,4 \text{ Н} = 1,37 \text{ кгс}$, т.е. практически равной силе, найденной по экспериментальной пульсации давления.

Возможно полученное совпадение является случайным, однако следует заметить, что причины разбивания твэлами дистанционирующих решеток и разрушения твэлов, обнаруженные на реакторах ВВЭР-440 Кольской АЭС, искривления и гильотинный отрыв технологических каналов РБМК имеют одну и ту же природу и обусловлены возникновением вихревых структур. В связи с изложенным опасение вызывает внедрение дистанционирующих решеток с дефлекторами, которые закручивают поток. Ресурсные их испытания проводились на воздухе, а как видно из приведенной формулы для поперечной мощности, в неё входит плотность.

Продолжение работы предполагает и решение уравнения колебаний при силе найденной природы, определение амплитуды колебаний стержня, возникающего максимального напряжения и сравнение его с допустимым напряжением на излом.

Литература

1. Фомичев М.С. Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 248с.
2. Микляев И.А. Колебательные процессы при течениях в каналах со сложным поперечным сечением. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. – М.: МФТИ, 2001. – 92 с.
3. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. – М.: Атомэнергоиздат, 2010. – 770 с.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Атомэнергоиздат, 1990. – 360 с.
6. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
7. Аугутис Ю., Алзбутас Р., Матузас В. Управление надежностью системы измерения расхода теплоносителя ШАДР-32М в реакторе РБМК-1500. // Энергетика. – 2002. – № 4. – С. 27-32.
8. Перегуда А. И. Надёжность системы измерения расхода теплоносителя РБМК-1000. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 148-159. DOI: 10.26583/pre.2018.3.13.
9. Проскураков К.Н., Анিকেев А.В., Афшар Е., Писарева Д.А. Использование CFD-модели реактора ВВЭР-1200 для прогнозирования колебаний тепловыделяющих сборок. // Глобальная ядерная безопасность. Эксплуатация ядерных объектов. – 2019. – № 4. – С. 62-70. DOI: 10.26583/gns-2019-04-07.
10. Денисов В.П., Драгунов Е.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных станций. – М.: ИздАТ, 2002. – 480 с.
11. Перевезенцев В.В. Спектральные характеристики пульсации давления и гидродинамических нагрузок на пучки твэлов в турбулентном потоке теплоносителя в ТВС ВВЭР. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 7. – С. 46-53. DOI: 10.1134/s0235711919070083
12. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. – М.: Атомиздат, 1975. – 408 с.
13. Перегуда А.И., Белозеров В.И. Прогнозирование надежности датчиков расхода теплоносителя ШАДР-32М. // Известия вузов. Ядерная энергетика, – 2017. – № 1. – С. 51-62. DOI: 10.26583/pre.2017.1.05.
14. Капур С., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 598 с.
15. Троянов В.М., Лихачёв Ю.И., Фоломеев В.И. Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках. // Известия вузов.

Ядерная энергетика. – 2002. – № 2. – С. 44-54.

16. Субботин В.И., Ушаков П.А., Габрианович Б.Н., Таланов В.Д., Свириденко И.П. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление в плотноупакованных коридорных пучках стержней. // Атомная энергия. – 1962. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 162-169.

17. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.

18. Аин Е.М., Пучков П.И. Гидравлическое сопротивление тесных продольно обтекаемых пучков гладких стержней. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – № 8. – С. 129.

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

Рекомендована к публикации оргкомитетом
XV Международной молодежной научно-практической конференции
«Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019»

Авторы

Шипилов Владимир Викторович, студент
E-mail: VVShipilov@bk.ru

Авдеев Евгений Фёдорович, доцент, канд. техн. наук
E-mail: e.avdeev@iate.obninsk.ru

UDC: 621.039.588

THE PROBLEM FORMULATION TO STUDY THE EXCITATION OF OSCILLATIONS OF FUEL ELEMENTS IN THE PRESENCE OF A HELICAL VORTEX

Shipilov V.V., Avdeev E.F.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI
1 Stugorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The article presents an attempt to theoretically substantiate the oscillations of fuel elements in fuel assemblies, leading to the destruction of spacing grids and breakdown of fuel elements.

The experimental data obtained when organizing a helical vortex cord around a rod are used to get theoretical expression of the transverse power. It is based on the investigation of interaction of inertial waves and a helical vortex.

Calculations of forces multidirectional along the length of the rod causing it to oscillate are presented. The magnitude of forces is found from experimental data and according to a theoretical formula.

The possible danger of using spacer grids with deflectors swirling the flow around the fuel rod, as well as «SHADR» flow meters in RBMK technological channels, is indicated.

Key words: helical vortex cord, breakdown of fuel elements, angular velocity vector, inertial wave vector, vibration period and frequency, pressure fluctuation amplitude, shear power.

REFERENCES

1. Fomichev M.S. *Experimental Hydrodynamics of Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989. 248 p. (in Russian).
2. Miklyaev I.A. *Oscillating Processes at Flows in Channels with Complex Cross-Sections*. Dr.

- Phys. and Math. Sci. Diss. Moscow. MFTI Publ., 2001, 92 p. (in Russian).
3. Dement'ev B.A. *Nuclear Power Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p. (in Russian).
4. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yur'ev Yu.S. *Handbook of Thermal Hydraulic Calculations in Nuclear Power Engineering*. Moscow. Atomenergoizdat Publ., 2010. 770 p. (in Russian).
5. Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. *Handbook of Thermal-Hydraulic Calculations (Nuclear Reactors, Heat Exchangers, Steam Generators)*. Moscow. Atomenergoizdat Publ., 1990. 360 p. (in Russian).
6. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. *Heat and Mass Transfer in Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2000. 456 p. (in Russian).
7. Augutis Yu., Alzbutas R., Matuzas V. Reliability management of the system for measuring the flow of coolant SHADR-32M in the RBMK-1500 reactor. *Energetika*. 2002, no. 4, pp. 27-32 (in Russian).
8. Pereguda A. I. Reliability of the RBMK-1000 coolant flow measurement system. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 3, pp. 148-159; DOI: 10.26583/npe.2018.3.13 (in Russian).
9. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E., Pisareva D.A. Use of CFD-model of VVER-1200 reactor for forecasting of fluctuations of fuel assemblies. *Globalnaya Yadernaya Bezopasnost. Eksploatatsiya Yadernykh Obyektov*. 2019, no. 4, pp. 62-70; DOI: 10.26583/gns-2019-04-07 (in Russian).
10. Denisov V.P., Dragunov E.G. *VVER Reactor Plants for Nuclear Power Plants*. Moscow. IzdAT Publ., 2002. 480 p. (in Russian).
11. Perevezentsev V.V. Spectral characteristics of pressure pulsation and hydrodynamic loads on the fuel rod bundles in the turbulent flow of the coolant in the fuel assemblies of PWR. *Problemy Mashinostroyeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2019, no. 7, pp. 46-53; DOI: 10.1134/s0235711919070083 (in Russian).
12. Subbotin V.I., Ibragimov M.Kh., Ushakov P.A. *Hydrodynamics and Heat Exchange in Nuclear Power Plants*. Moscow. Atomizdat Publ., 1975. 408 p. (in Russian).
13. Pereguda A.I., Belozеров V.I. Prediction of reliability of flow sensors of SHADR-32m heat carrier. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 1, pp. 51-62; DOI: 10.26583/npe.2017.1.05 (in Russian).
14. Kapur S., Lamberson L. *Reliability and System Design*. Moscow. Mir Publ., 1980. 598 p. (in Russian).
15. Troyanov V.M., Lihachyov Yu.I., Folomeev V.I. Method for calculating the longitudinal-transverse bend of the VVER-1000 nonshell fuel assembly at operating loads. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2002, no 2. pp. 44-54 (in Russian).
16. Subbotin V.I., Ushakov P.A., Gabrianovich B.N., Talanov V.D., Sviridenko I.P. Heat transfer and hydraulic resistance in the densely packed corridor rod beams. *Atomnaya Energiya*. 1962, v. 13, iss. 2, pp. 162-169 (in Russian).
17. Petukhov B.S. *Heat Exchange and Resistance at Laminar Flow of Liquid in Pipes*. Moscow. Energiya Publ., 1967, 412 p. (in Russian).
18. Ain E.M., Puchkov P.I. Hydraulic Resistance of the Close Longitudinal Flowing Beams of Smooth Rods. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 1996, no. 8, p. 129 (in Russian).

Authors

Shipilov Vladimir Viktorovich, Student

E-mail: VVShipilov@bk.ru

Avdeev Yevgeny Fyodorovich, Assisiant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: e.avdeev@iate.obninsk.ru