

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПОГЛОЩАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ В ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИИ НАКОНЕЧНИКА СТЕРЖНЯ И ДИАМЕТРА НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА

М.Н. Исманский

maximisman@gmail.com

SPIN-код: 4604-6471

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Выполнен качественный анализ гидродинамических сил сопротивления, действующих на поглощающий элемент (ПЭЛ) системы управления и защиты реактора серии ВВЭР-1000. Расчеты проведены с использованием программного комплекса вычислительной гидродинамики STAR-CCM+. Получены распределения давлений на поверхностях моделируемых тел для наконечников ПЭЛ различной геометрии. Анализ показал, что силы сопротивления, действующие на тело, зависят не только от его формы, но и от величины зазора между внутренней поверхностью тела и внешней поверхностью канала. Полученные данные могут быть использованы для обоснования возможности применения гидравлического демпфирующего устройства в реакторах серии ВВЭР-1000.

### Ключевые слова

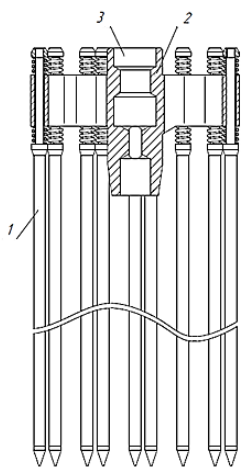
Ядерный реактор, водо-водяной энергетический реактор, система управления и защиты, поглощающий элемент, гидродинамика, гидродинамическая сила, программный комплекс Star-CCM+

Поступила в редакцию 10.07.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

---

**Введение.** Система управления и защиты является неотъемлемой частью любой ядерной установки, работающей на мощности и имеющей эффективный коэффициент размножения нейтронов  $K_{eff} \approx 1$ . Предназначение системы управления и защиты (СУЗ) — контроль мощности реактора и управление цепной ядерной реакцией деления в любых режимах работы установки. СУЗ реактора ВВЭР-1000 представляет собой подвижную траверсу (рис. 1) с установленными в ней поглощающими элементами, прикрепленную через штангу и электромагнитный захват к приводам, осуществляющим движение кластера. При необходимости быстрого погружения поглощающих элементов в активную зону происходит отключение электромагнитного захвата. Скорость падения кластера в активную зону составляет 1,2...2,7 м/с. Для демпфирования в головке тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-1000 предусмотрен пружинный блок, состоящий из 16 пружин [1–3]. Сила сопротивления, действующая на ПЭЛ со стороны жидкости, зависит от формы его наконечника. В представленной работе изучается данная зависимость, а также влияние на сопротивление величины зазора между ПЭЛ и внутренней стенкой направляющего канала. Последнее имеет



**Рис. 1.** Траверса органов регулирования СУЗ с ПЭЛ:

1 — ПЭЛ; 2 — траверса органов регулирования СУЗ; 3 — отверстие для закрепления штанги СУЗ

важное прикладное значение, так как благодаря этому в качестве системы гашения падения становится возможным использовать гидравлический демпфер, таким образом снижая нагрузку на пружинный блок.

**Подготовка геометрической, физической и сеточной моделей.** Рассмотрим различные геометрии наконечников поглощающих элементов, для этого воспользуемся программным комплексом (ПК) Star-CCM+. Выберем расчетную модель на основе следующих исходных данных:

– направляющий канал представлен трубой внутренним диаметром  $d_{нк}$  и длиной 0,2 м;

– ПЭЛ имеет цилиндрическую часть длиной 0,1 м с различными наконечниками для каждого из расчетов, диаметр ПЭЛ  $d_{пэл} = 8,2$  мм [2];

– скорость течения воды постоянна,  $W_{ж} = 3$  м/с;

– параметры жидкости и среды:  $T_{ср} = 315$  °С;

$p_{ср} = 16$  МПа;  $\rho_{ж} = 690$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{ж} = 6,194 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

Для расчетов будем использовать 2D-модель — это позволит минимизировать вычислительные мощности и ускорить решение задачи. Параметры конечно-элементной сетки представлены ниже:

Тип сетки .....Автоматическая сетка (2D)  
 Тип конечного элемента .....Многоугольник  
 Наличие призматического слоя ..... Есть  
 Число призматических слоев ..... 1  
 Базовый размер конечного элемента ..... 0,001...0,005

Для наиболее точного решения задачи пограничного слоя требуется использовать призматический слой. Общую толщину призматического слоя принимаем равной 5 % базового размера [4].

Рассмотрим выбранную физическую модель. Для упрощения задачи было принято решение считать плотность жидкости постоянной [5, 6]. Для определения режима течения вычислим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_{ж} W_{ж} d_{нк}}{\mu_{ж}},$$

где  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости в канале;  $W_{ж}$  — скорость жидкости в канале;  $d_{нк}$  — диаметр канала;  $\mu_{ж}$  — динамическая вязкость жидкости.

Рассчитанное число Рейнольдса  $Re = 2,78 \cdot 10^5$  соответствует турбулентному режиму течения.

В качестве модели турбулентности выберем  $k-\epsilon$ -модель, так как она не требует большого объема памяти, характеризуется быстрой сходимостью и при этом позволяет хорошо моделировать задачи обтекания тел.

Поскольку скорость жидкости принята постоянной и при решении данной задачи нет необходимости в рассмотрении изменения параметров процесса во времени, примем стационарную модель течения [7, 8].

Отметим, что в данной работе сравниваются значения сил сопротивления для различных форм тел, а качественные отношения между ними сохраняются при любых значениях скорости потока, потому конкретные значения выбранной скорости не имеют особой важности.

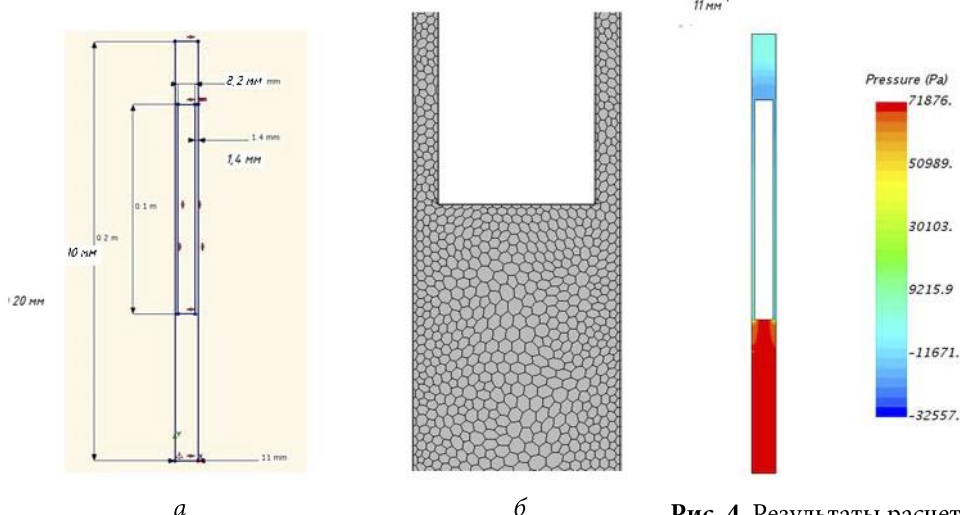
Границы модели заданы следующим образом (рис. 2).

Всего будет изучено три модели ПЭЛ. Рассмотрим каждую из них.

**Модель 1. Стержень без наконечника (модель продольного обтекания цилиндра в канале).** Геометрические параметры модели представлены ниже:

Диаметр ПЭЛ $d_{ПЭЛ}$ , мм .....	8,2
Диаметр направляющего канала $d_{НК}$ , мм .....	11
Тип наконечника ПЭЛ .....	Без наконечника

Построим геометрическую модель (рис. 3, а). Конечно-элементную модель зададим в соответствии с указанными выше параметрами (рис. 3, б). В результате расчета получим распределение давления в канале (рис. 4).



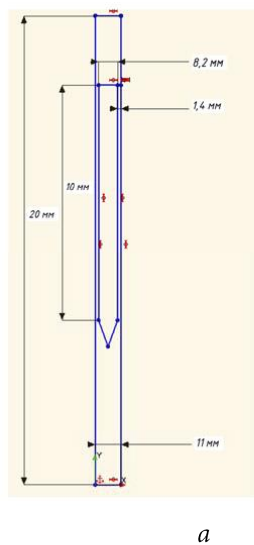
**Рис. 3.** Геометрическая (а) и сеточная (б) модели ПЭЛ без наконечника

**Рис. 4.** Результаты расчета модели 1 в программном комплексе Star-CCM+

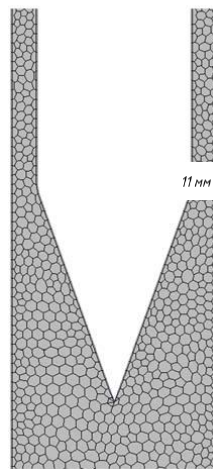
**Модель 2. Стержень с коническим наконечником.** Модель имеет следующие характеристики:

Диаметр ПЭЛ $d_{\text{ПЭЛ}}$ , мм .....	8,2
Диаметр направляющего канала $d_{\text{НК}}$ , мм .....	11
Тип наконечника ПЭЛ .....	Конический

Рассмотрим модель 2. В отличие от модели 1 она имеет конический наконечник (рис. 5, а). Соответствующая конечно-элементная модель показана на рис. 5, б, полученное распределение давления представлено на рис. 6.



а



б

Рис. 5. Геометрическая (а) и сеточная (б) модели ПЭЛ с коническим наконечником

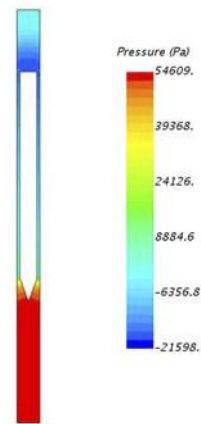


Рис. 6. Результаты расчета модели 2 в программном комплексе Star-CCM+

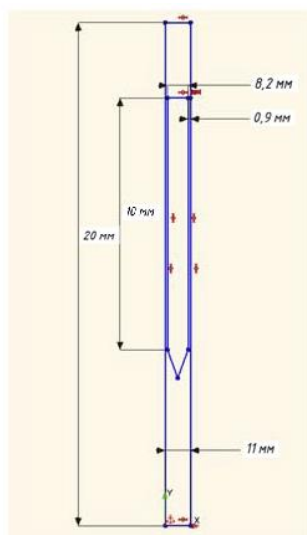
**Модель 3. Стержень с коническим наконечником и уменьшенным зазором с внутренней стенкой направляющего канала.** Модель имеет следующие характеристики:

Диаметр ПЭЛ $d_{\text{ПЭЛ}}$ , мм .....	8,2
Диаметр направляющего канала $d_{\text{НК}}$ , мм .....	10
Тип наконечника ПЭЛ .....	Конический

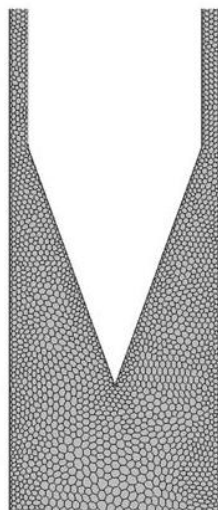
Модель 3 представляет собой ПЭЛ с коническим наконечником (рис. 7, а) в канале уменьшенного диаметра. Для увеличения точности расчета в данном случае необходимо уменьшить размер конечного элемента (рис. 7, б). Результаты расчета показаны на рис. 8.

**Обработка результатов.** Касательные силы, действующие на боковые поверхности тел, в первых двух моделях различаются незначительно. Кроме того, они значительно меньше сил, действующих на торцевые поверхности, поэтому

для оценки результатов влиянием касательной силы можно пренебречь. В модели 3 для удобства также не будем учитывать касательную силу, однако ее влияние на результат в дальнейших исследованиях может потребовать уточнения.



а



б

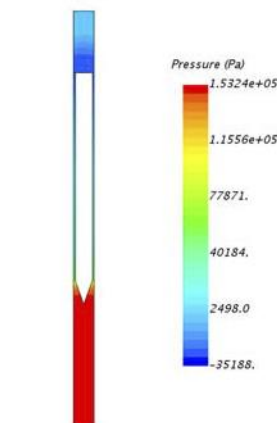


Рис. 8. Результаты расчета модели 3 в программном комплексе Star-CCM+

Рис. 7. Геометрическая (а) и сеточная (б) модели ПЭЛ с коническим наконечником и уменьшенным зазором

Определим суммарные давления, действующие на стержни в каждом из опытов. Из представленных выше изображений распределений видно, что давление вдоль поверхности наконечника не является постоянной величиной. Поэтому для упрощения анализа примем давление для каждого опыта постоянным и равным среднему значению, действующему на поверхности. Также заметим, что давление в хвостовой части каждой модели меньше среднего внутриреакторного, и учтем это в расчете суммарных давлений и сил [9]. Суммарная сила, действующая на тело, может быть найдена по зависимости

$$F_i = p_{li} S_{li} - p_{ki} S_{ki},$$

где  $F_i$  — силы, действующие на тело в каждом из опытов;  $p_{li}$  — давления, действующие на лобовой торец модели ПЭЛ;  $p_{ki}$  — давления, действующие на кормовой торец модели ПЭЛ;  $S_{li}$ ,  $S_{ki}$  — площадь торцов каждой модели ПЭЛ.

Данные по каждому из опытов приведены в таблице.

#### Суммарные значения давлений и сил

Номер модели	Усредненное давление, действующее на тело, Па	Усредненная сила, действующая на тело, Н
1	86423	4,56
2	62325	3,29
3	158644	8,38

Из анализа распределения следует, что наибольшее значение силы, оказывающей сопротивление движению тела, фиксируется в модели 3.

**Заключение.** По полученным данным становится понятно, что при отсутствии наконечника стержня, на ПЭЛ будет действовать большая гидродинамическая сила сопротивления, чем в случае с коническим наконечником, но важно помнить, что при этом замедление движения происходит на всем пути движения ПЭЛ. Подобное явление, конечно, уменьшает силу от удара траверсы, но при этом и увеличивает время входа стержней системы СУЗ в активную зону, что недопустимо [10].

В модели 3 была получена следующая важная информация: гидродинамическая сила также возрастает и при уменьшении зазора между ПЭЛ и внутренней стенкой направляющего канала. На основе этих данных возможно ввести систему демпфирования падения СУЗ путем уменьшения внутреннего диаметра направляющего канала в его нижней части. Таким образом, гидродинамическое сопротивление будет возникать, только когда ПЭЛ уже введены в активную зону.

### Литература

- [1] Адамов Е.О., ред. Машиностроение ядерной техники. Т. 4-25. Кн. 1. М., Машиностроение, 2005.
- [2] Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И. Конструирование ядерных реакторов. М., Энергоиздат, 1982.
- [3] Будов В.М., Фарафонов В.А. Конструирование основного оборудования АЭС. М., Энергоатомиздат, 1985.
- [4] Колпаков Г.Н., Селиванникова О.В. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. Томск, Изд-во ТПУ, 2009.
- [5] Чижюмов С.Д. Основы гидродинамики. Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2007.
- [6] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., Наука, 1987.
- [7] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984.
- [8] STAR-CCM+ UserGuide 7.06. CD-adapco Group, 2012.
- [9] Ионайтис Р.Р. Взаимодействие жидкости и стержня СУЗ. *Атомная энергия*, 1965, т. 18, № 4, с. 422–425.
- [10] Погосов А.Ю. Технические средства управления ядерным реактором с водой под давлением для АЭС. Одесса, Наука и техника, 2012.

**Исманский Максим Николаевич** — студент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Сатин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

### Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Исманский М.Н. Сравнительный анализ сил, действующих на поглощающий элемент системы управления и защиты в потоке вязкой несжимаемой жидкости, в зависимости от геометрии наконечника стержня и диаметра направляющего канала. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 08(49). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-08-631>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FORCES ACTING ON THE ABSORBING ELEMENT OF THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEM IN A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID FLOW, DEPENDING ON THE GEOMETRY OF THE ROD TIP AND THE DIAMETER OF THE GUIDE CHANNEL

M.N. Ismanskiy

maximisman@gmail.com

SPIN-code: 4604-6471

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*A qualitative analysis of the hydrodynamic resistance forces acting on the absorbing element (PEL) of the control and protection system of the WWER-1000 series reactor has been carried out. The calculations were carried out using the STAR-CCM+ computational fluid dynamics software. The distributions of pressures on the surfaces of the simulated bodies for absorber rod tips of various geometry are obtained. The analysis showed that the resistance forces acting on the body depend not only on its shape, but also on the size of the gap between the inner surface of the body and the outer surface of the channel. The data obtained can be used to substantiate the possibility of using a hydraulic damping device in WWER-1000 reactors.*

### Keywords

*Nuclear reactor, pressurized water power reactor, control and protection system, absorbing element, hydrodynamics, hydrodynamic force, Star-CCM+ software package*

Received 10.07.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

---

### References

- [1] Adamov E.O., ed. Mashinostroenie yadernoy tekhniki. T. 4-25. Kn. 1 [Mechanical engineering in nuclear industry. Vol. 4-25. P. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005 (in Russ.).
- [2] Emel'yanov I.Ya., Mikhan V.I., Solonin V.I. Konstruirovaniye yadernykh reaktorov [Nuclear reactor design]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982 (in Russ.).
- [3] Budov V.M., Farafonov V.A. Konstruirovaniye osnovnogo oborudovaniya AES [Designing main equipment for atomic power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985 (in Russ.).
- [4] Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. Konstruktsii tvelov, kanalov i aktivnykh zon energeticheskikh reaktorov [Construction of fuel pins, channels and active zones of energetic reactors]. Tomsk, Izd-vo TPU Publ., 2009 (in Russ.).
- [5] Chizhiumov S.D. Osnovy gidrodinamiki [Fundamentals of hydrodynamics]. Komso-mol'sk-na-Amure, KnAGTU Publ., 2007 (in Russ.).
- [6] Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1987 (in Russ.).
- [7] Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods for solving heat transfer and fluid dynamic problems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984 (in Russ.).
- [8] STAR-CCM+ UserGuide 7.06. CD-adapco Group, 2012.

- [9] Ionaytis R.R. Interaction between liquid and CPS rod. *Atomnaya energiya*, 1965, vol. 18, no. 4, pp. 422–425 (in Russ.).
- [10] Pogosov A.Yu. Tekhnicheskie sredstva upravleniya yadernym reaktorom s vodoy pod davleniem dlya AES [Technical equipment for managing pressurized water reactor for atomic power station]. Odessa, Nauka i tekhnika Publ., 2012 (in Russ.).

**Ismanskiy M.N.** — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Satin A.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Ismanskiy M.N. Comparative analysis of the forces acting on the absorbing element of the control and protection system in a viscous incompressible fluid flow, depending on the geometry of the rod tip and the diameter of the guide channel. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 08(49). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-08-631.html> (in Russ.).