

УДК: 621.039.5:532 БН

## Расчетное исследование запаса до всплытия тепловыделяющей сборки быстрого натриевого реактора

Д. В. Диденко<sup>а</sup>, О. Л. Никаноров, С. А. Рогожкин

АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова»,  
Россия, 603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, д. 15

E-mail: <sup>а</sup> nikanorov@okbm.nnov.ru

Получено 11.08.2020, после доработки — 02.09.2020.

Принято к публикации 18.09.2020.

В статье приводится описание расчетного исследования гидродинамических процессов, происходящих при течении теплоносителя через тепловыделяющую сборку активной зоны реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. В рамках исследования разработаны методика и расчетная модель на базе программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision, которые позволили с помощью обоснованных упрощений получить коэффициент запаса до всплытия тепловыделяющей сборки, а также исследовать гидродинамические характеристики процессов, происходящих при моделировании различных исходных событий, влияющих на движение тепловыделяющей сборки активной зоны реактора.

Для проведения расчетного обоснования разработана эквивалентная по гидравлическим сопротивлениям модель тепловыделяющей сборки, позволяющая не моделировать явным образом сложную натурную конструкцию сборки. Упрощение геометрии сборки позволило уменьшить количество расчетных ячеек в модели и сократить используемые вычислительные ресурсы и время счета.

Выполнение расчетов гидродинамических параметров эквивалентной модели тепловыделяющей сборки в программном комплексе FlowVision проводилось в два этапа. На первом этапе с целью определения минимального коэффициента запаса до всплытия тепловыделяющей сборки и минимального расхода теплоносителя, при котором происходит перемещение сборки, проведены стационарные расчеты, в которых на входе в модель были заданы различные значения расхода и, далее, определены силы, действующие на сборку. На втором этапе проведена серия расчетов динамических режимов. В этих режимах на входе в модель было задано скачкообразное увеличение давления, являющееся исходным событием, которое гипотетически может произойти в реакторной установке на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, а также определены гидродинамические параметры и силы, действующие на тепловыделяющую сборку.

По результатам первого этапа расчетного исследования подтверждены минимальный коэффициент запаса до всплытия тепловыделяющей сборки реактора на быстрых нейтронах, обоснованный в материалах проекта реакторной установки, а также минимальный расход теплоносителя через сборку, при котором возможно ее перемещение. По итогам второго этапа исследования сделаны выводы о невозможности перемещения тепловыделяющей сборки при исходном событии, связанном со скачкообразным повышением давления в напорной камере реактора.

Ключевые слова: активная зона, реактор с жидкометаллическим теплоносителем, тепловыделяющая сборка, гидродинамика, расчетная модель, FlowVision

UDC: 621.039.5:532 БН

## Analytical study of rod lifting margin of fuel assembly of fast sodium reactor

D. V. Didenko<sup>a</sup>, O. L. Nikanorov, S. A. Rogozhkin

Joint Stock Company “Afrikantov OKB Mechanical Engineering”,  
15 Burnakovskij proezd, Nizhny Novgorod, 603074, Russia

E-mail: <sup>a</sup> nikanorov@okbm.nnov.ru

*Received 11.08.2020, after completion — 02.09.2020.*

*Accepted for publication 18.09.2020.*

The paper describes an analytical study of hydrodynamic processes taking place in the course of coolant flow through a fuel assembly of the core of a fast neutron sodium-cooled reactor. Within the framework of the study, a procedure and an analytical model were developed based on program complex FlowVision of computational fluid dynamics, which, using proved simplifications, permits to obtain a coefficient of rod lifting margin of a fuel assembly and to study hydrodynamic characteristics of processes taking place in the course of simulation of different initial events influencing motion of a reactor core fuel assembly.

For analytical justification a fuel assembly model was developed, which is equivalent by hydraulic resistance values and permits not to simulate explicitly a complicated full-scale fuel assembly design, thus, decreasing a number of computational cells in the model and, as a result, reducing computational and time resources.

Hydraulic parameters of the equivalent fuel assembly model in program complex FlowVision were analyzed in two stages. At the first stage, to determine the minimum rod lifting margin coefficient of a fuel assembly, steady-state analyses were performed, where various flowrate values were assigned at the model inlet and forces acting upon the assembly were analyzed. A series of dynamic mode analyses was performed at the second stage. Jump-like pressure increase being the initial event which could occur hypothetically in the fast neutron sodium cooled reactor plant was assigned in these modes. Hydrodynamic parameters and forces acting upon the fuel assembly were determined.

The results of the first stage of the analytical study proved the minimum coefficient of rod lifting margin of a fuel assembly of the fast neutron reactor justified in reactor plant design documentation. As a result of the second stage of the study, conclusions were made on impossibility for the fuel assembly to move at the initial event associated with jump-like pressure increase in the reactor pressure chamber.

Keywords: core, liquid-metal cooled reactor, fuel assembly, hydrodynamics, analytical model, FlowVision

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1307–1321 (Russian).

## 1. Введение

К перспективным реакторным установкам на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) предъявляются повышенные требования в части обеспечения безопасности. Одним из требований является обоснование запаса до всплытия тепловыделяющей сборки (ТВС) в различных, в том числе и гипотетических, ситуациях. В частности, рассматривается ситуация с резким увеличением давления в напорной камере реактора, из которой теплоноситель распределяется по ТВС активной зоны. Для удержания ТВС во втулке напорной камеры применяется гидравлический принцип, основанный на балансе сил, обусловленных наличием перепада давления на ТВС, и веса сборки. Скачкообразное изменение давления в напорной камере может нарушить баланс сил и вызвать перемещение ТВС, что в свою очередь приведет к снижению расхода теплоносителя через активную зону и нарушению ее структурной целостности.

К настоящему времени как отечественными, так и зарубежными исследователями накоплен опыт моделирования с помощью CFD-кодов теплогидравлических процессов, происходящих при течении жидкометаллического теплоносителя в ТВС РУ типа БН. В работах [Sakar et al., 2019; Roelofs et al., 2013] исследуются особенности теплопереноса и гидродинамики в ТВС в составе целого реактора. В работе [Лубина и др., 2015] большее внимание уделяется теплофизическим процессам и связанным с ними характеристикам, таким как температура конструкционных материалов и оболочек тепловыделяющих элементов. В работе [Jeong et al., 2017] представлено практическое применение RANS-подхода при моделировании ТВС реактора PGSFR (Prototype Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor).

В опубликованных работах зачастую определяются только гидродинамические характеристики, связанные с течением теплоносителя внутри ТВС, и не придается большого значения гидродинамическим силам, действующим на ТВС при работе реактора. Вместе с тем, учитывая возможности современных кодов вычислительной гидродинамики, возникает задача расчетного исследования с помощью CFD-кода, целью которого является обоснование запаса до всплытия ТВС в вышеописанных ситуациях. Исследование проводится с помощью программного комплекса (ПК) вычислительной гидродинамики FlowVision [Рогожкин и др., 2013; Аксёнов и др., 2017a, 2017b], который аттестован для моделирования теплогидравлических процессов, происходящих при течении натриевого теплоносителя в РУ БН [Аттестационный паспорт FlowVision, 2019].

Расчетное исследование состоит из двух этапов. На первом этапе проводятся стационарные расчеты с целью определения коэффициента запаса до всплытия ТВС и минимального расхода теплоносителя, при котором возможно перемещение ТВС. На втором этапе выполняются расчеты динамических режимов, в которых определяются силы, действующие на ТВС при скачкообразном повышении давления на входе в расчетную модель.

В данной статье приводится описание разработанной на базе ПК FlowVision методики, которая позволяет на основании анализа гидродинамических характеристик обосновывать невозможность перемещения ТВС при работе РУ БН и определять минимальный коэффициент запаса до всплытия сборки. Также в статье приведены результаты расчетных исследований.

## 2. Описание расчетной модели

Конструкция ТВС РУ БН [Усынин, Кусмарцев, 1985] представлена на рис. 1. Все сборки активной зоны реактора имеют шестигранный чехол (5), к которому с торцов приварены головка (9) для сцепления с устройствами системы перегрузки и переходник (4). К переходнику приваривается хвостовик (2), служащий для подвода теплоносителя и правильной установки сборки во втулку напорной камеры. В верхней (3) и нижней (1) части хвостовика расположены спиральные уплотнения, уменьшающие протечки теплоносителя. В средней части чехла ТВС находятся тепловыделяющие (6) и поглощающие (8) элементы.

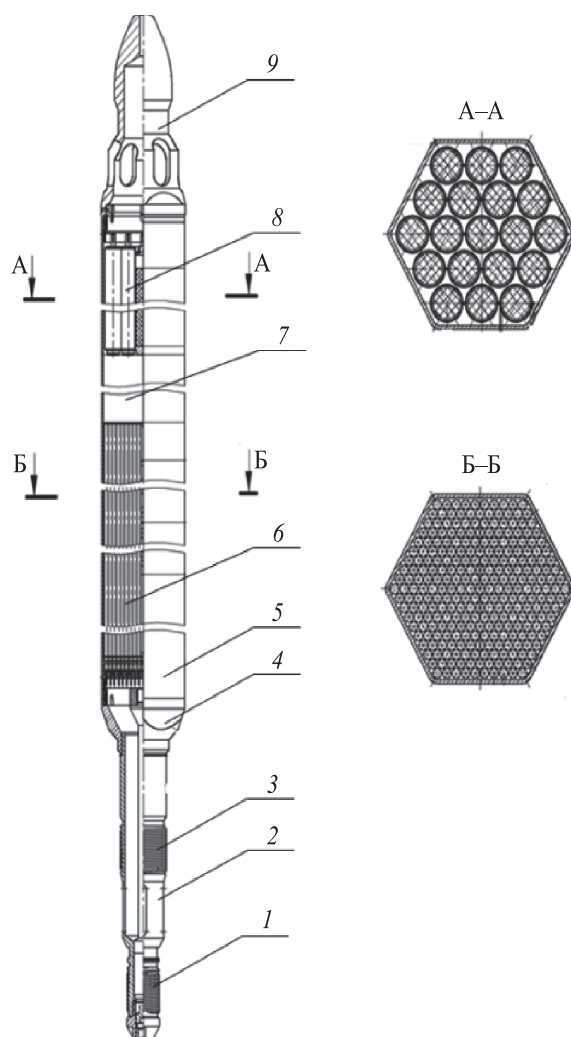


Рис. 1. Конструкция тепловыделяющей сборки реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: 1 — нижнее уплотнение хвостовика, 2 — хвостовик, 3 — верхнее уплотнение хвостовика, 4 — переходник, 5 — шестигранный чехол, 6 — участок тепловыделяющих элементов, 7 — натриевая полость, 8 — участок поглощающих элементов, 9 — головка

Конструкция ТВС достаточно сложная (см. рис. 1), и ее непосредственное моделирование в трехмерной постановке сопряжено с привлечением больших вычислительных и временных ресурсов. В связи с этим в процессе разработки расчетной модели конструкция ТВС была упрощена. Упрощение заключалось в замене сложных конструктивных элементов ТВС (таких как тепловыделяющие и поглощающие элементы, верхнее и нижнее уплотнение хвостовика) на тела простой формы, с сохранением эквивалентных гидравлических сопротивлений по участкам ТВС. На рис. 2 представлена конструкция эквивалентной ТВС.

Головка и хвостовик расчетной модели по своей конструкции не отличаются от натурной сборки, а участки тепловыделяющих и поглощающих элементов, а также верхнего и нижнего уплотнения хвостовика заменены на цилиндрические тела. Гидравлическое сопротивление тепловыделяющих и поглощающих элементов моделируется с помощью зазоров между искусственным цилиндрическим телом и внутренней поверхностью шестигранного чехла. Площади проходных сечений на участках тепловыделяющих и поглощающих элементов и гидравлические диаметры кольцевых зазоров в местах уплотнений хвостовика получаются из равенства перепадов давления на соответствующих участках штатной и эквивалентной ТВС [Идельчик, 1992].

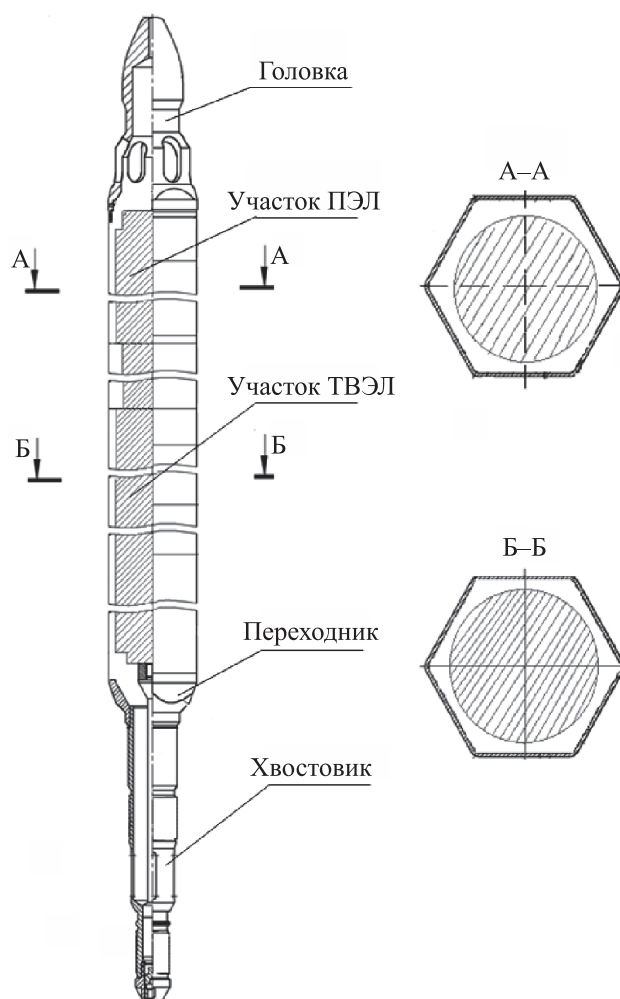


Рис. 2. Конструкция ТВС, эквивалентная по гидравлическому сопротивлению натурной ТВС

Расчетная модель, созданная в ПК FlowVision, включает в себя втулку напорной камеры реактора, эквивалентную ТВС, фрагмент пространства между соседними сборками (межпакетное пространство) и фрагмент верхней полости реактора, в который происходит выход теплоносителя (рис. 3).

Геометрия эквивалентной ТВС загружается в расчетную модель в виде отдельного импортированного объекта, на котором задается модификатор «подвижное тело». Данный модификатор в FlowVision позволяет геометрическому объекту перемещаться в расчетной области относительно ее границ, а также получать параметры движения объекта (в нашем случае — ТВС), такие как его координаты в пространстве и действующие на него силы и моменты.

Для корректного моделирования течения теплоносителя в местах верхнего и нижнего уплотнений хвостовика ТВС использовалась модель зазора [Ozturk et al., 2019], которая позволяет не разрешать расчетной сеткой узкие (по сравнению с основной геометрией) каналы.

Исследование в ПК FlowVision течения теплоносителя в проточной части ТВС выполняется в рамках URANS-подхода, с использованием стандартной  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности [Wilcox, 1994]. Теплоноситель входит в расчетную модель через четыре окна во втулке напорной камеры (поз. 7 на рис. 3). На входе в модель на первом этапе расчетного исследования задается нормальная составляющая массовой скорости теплоносителя, а на втором этапе — скачкообразное изменение давления. Выход теплоносителя из модели происходит через цилиндрическую поверхность фрагмента верхней полости реактора (поз. 6 на рис. 3). На этой выходной поверхности задается нулевое значение статического давления. На остальных поверхностях

модели задается условие непротекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательной компоненты скорости.

На основе предварительных тестовых расчетов, в которых рассматриваются несколько вариантов расчетной сетки, выбирается оптимальная степень дискретизации сетки, не оказывающая существенного влияния на точность получаемого решения. В расчете используется равномерная начальная расчетная сетка с ячейками размером  $20 \times 20 \times 24$  мм. Для детального моделирования характера течения вблизи стенок конструкции начальная сетка дополнительно измельчается (адаптируется). Адаптация первого уровня предполагает деление шестигранной ячейки на восемь равных частей [Руководство пользователя FlowVision, 2020]. Уровень адаптации начальной сетки в расчете выбирается таким образом, чтобы линейные размеры ячеек, прилегающих к поверхности конструкции, составляли около 2.5 мм. Общее количество расчетных ячеек составляет около 2.5 млн. Адаптированная расчетная сетка модели представлена на рис. 4.

Особенностью расчетной сетки в моделях, в которых присутствует подвижное тело, является ее автоматическое обновление вдоль движения тела. В FlowVision задаются начальное положение тела, закон его движения и адаптация расчетной сетки по его поверхности. Технология адаптации FlowVision сохраняет число слоев измельченных ячеек около движущегося тела, производя слияние ячеек в следе за телом, тем самым экономя вычислительные ресурсы [Руководство пользователя FlowVision, 2020].

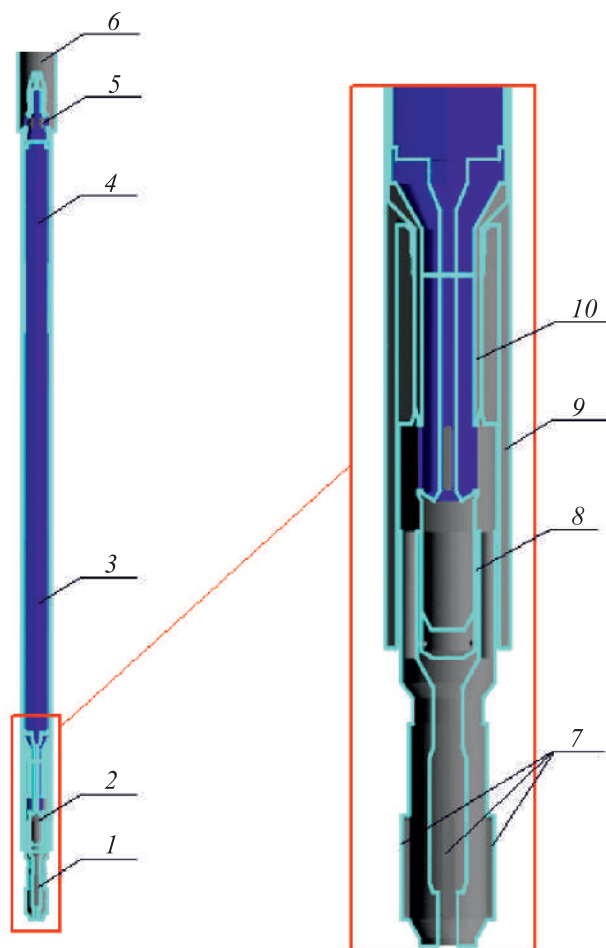


Рис. 3. Расчетная модель, созданная в ПК FlowVision: 1 — втулка напорной камеры реактора, 2 — хвостовик, 3 — участок тепловыделяющих элементов, 4 — участок поглощающих элементов, 5 — выходные окна в головке, 6 — фрагмент верхней полости реактора, 7 — входные окна во втулке напорной камеры, 8 — нижнее уплотнение хвостовика, 9 — фрагмент межпакетного пространства, 10 — верхнее уплотнение хвостовика

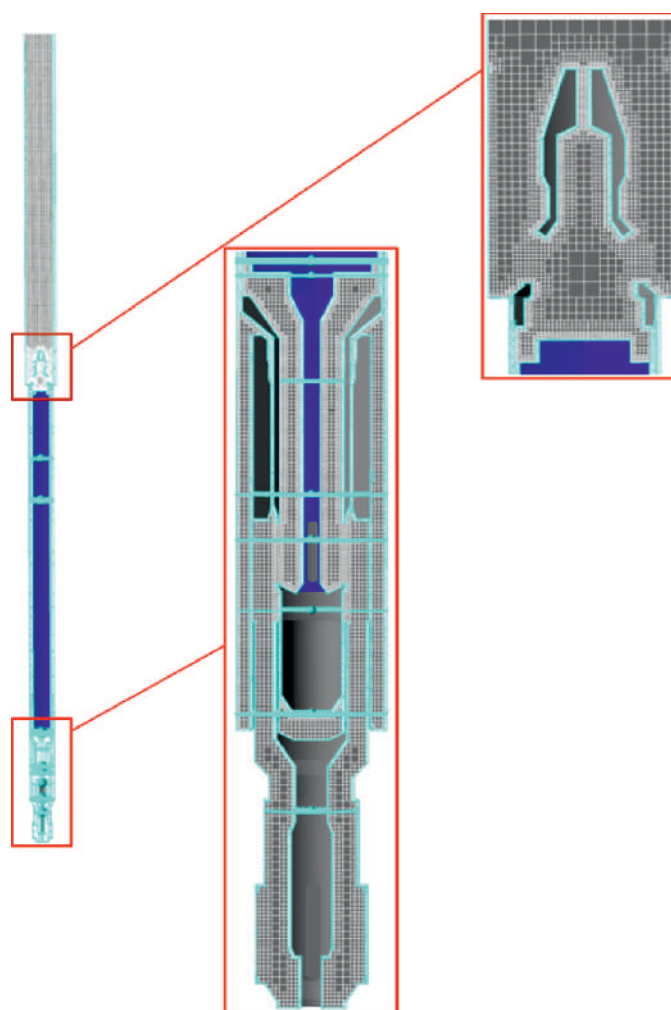


Рис. 4. Адаптированная начальная расчетная сетка модели в ПК FlowVision

### 3. Определение коэффициента запаса до всплытия ТВС и минимального расхода теплоносителя, при котором возможно перемещение ТВС

Главным количественным параметром, который обосновывает невозможность самопроизвольного перемещения сборки активной зоны реактора, является коэффициент запаса до всплытия, определяемый по формуле

$$K = \frac{m \cdot g - F_{\text{Ар}}}{F_{\text{г}}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{г}}$  — гидродинамическая сила, действующая на ТВС со стороны потока теплоносителя, определяемая в расчете с использованием FlowVision по зависимости

$$F_{\text{г}} = \int_S (P + \tau_w) dS \quad (2)$$

(где  $P$  — давление, Па;  $\tau_w$  — касательное напряжение на смоченной поверхности ТВС, Н/м<sup>2</sup>;  $dS$  — элементарная площадка смоченной поверхности ТВС, м<sup>2</sup>);  $m$  — масса ТВС, кг;  $g$  — уско-



рение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $m_o$  — масса вытесненного сборкой теплоносителя, кг;  $F_{\text{Ар}}$  — сила Архимеда, Н, определяемая по зависимости

$$F_{\text{Ар}} = \rho_{\text{Na}} \cdot g \cdot V_{\text{Na}} \quad (3)$$

(где  $\rho_{\text{Na}}$  — плотность натрия,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_{\text{Na}}$  — объем натрия, вытесненного сборкой,  $\text{м}^3$ ).

Для расчета коэффициента запаса до всплытия с помощью FlowVision определяется максимальная гидродинамическая сила, действующая на ТВС, в номинальном режиме работы реактора. Далее, с учетом этой силы, по формуле (1) определяется минимальный коэффициент запаса до всплытия сборки. По результатам расчета он равен 2.15.

Методика определения минимального расхода теплоносителя, при котором возможно перемещение ТВС, состоит в сравнении гидродинамической силы, действующей на ТВС, с весом ТВС в натрии при разных значениях расхода теплоносителя. Расход теплоносителя на входе во втулку напорной камеры, при котором ТВС начинает перемещаться из своего исходного положения, определяется из условия

$$F_r > m \cdot g - F_{\text{Ар}} = (m - m_o) \cdot g. \quad (4)$$

Для определения расхода, при котором возможно перемещение модели ТВС, на входе в расчетную область задаются несколько значений расхода теплоносителя. Для каждого значения расхода в FlowVision рассчитывается гидродинамическая сила, действующая на ТВС. Искомый расход всплытия определяется с учетом выполнения условия (4).

Зависимость гидродинамической силы  $F_r$ , действующей на ТВС со стороны потока, от расхода теплоносителя представлена на рис. 5. Значение расхода теплоносителя через расчетную модель  $G$  указано относительно значения расхода для номинального режима работы реактора  $G_{\text{ном}}$ . На рис. 5 дополнительно указано значение веса ТВС в натрии  $P_{\text{ТВС}}$ , относительно которого определяется гидродинамическая сила.

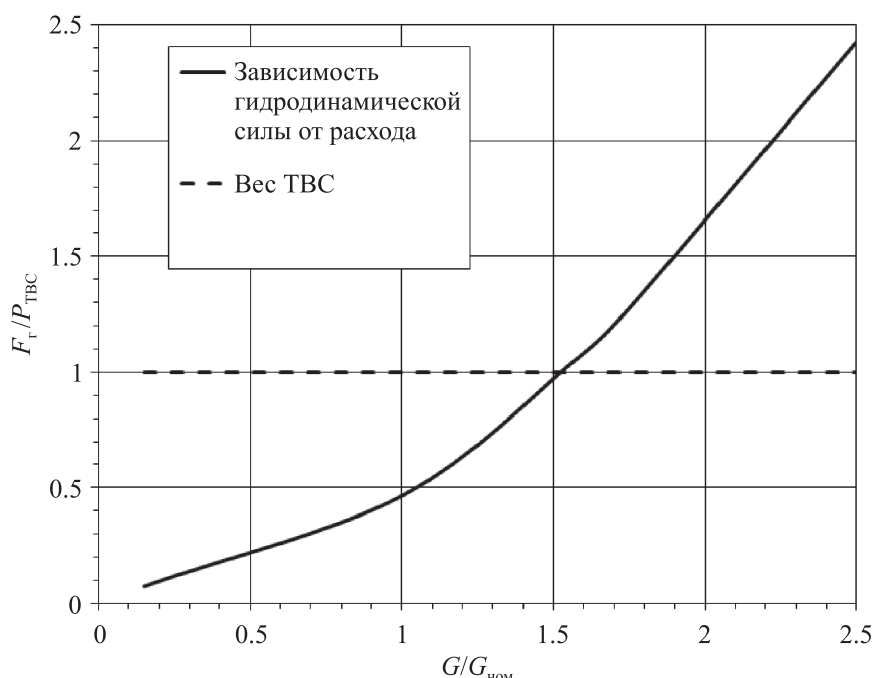


Рис. 5. Зависимость гидродинамической силы, действующей на ТВС со стороны потока теплоносителя, от расхода теплоносителя через ТВС (в относительных величинах):  $F_r/P_{\text{ТВС}}$  — отношение гидродинамической силы к весу ТВС в натрии;  $G/G_{\text{ном}}$  — отношение текущего массового расхода через ТВС к номинальному расходу



На рис. 5 точка пересечения двух линий соответствует состоянию системы, при котором гидродинамическая подъемная сила, действующая на сборку со стороны потока теплоносителя, равна весу ТВС в натрии. Таким образом, эта точка определяет минимальный расход теплоносителя, при котором начинается перемещение сборки. Значение минимального расхода в 1.55 раза больше номинального расхода через ТВС. В материалах проекта РУ БН обосновано, что при работе РУ максимальная частота вращения насоса не может превысить номинальную частоту более чем на 20 %. Таким образом, при максимально возможном увеличении расхода (до 120 % от номинального) на входе в активную зону исключена возможность перемещения ТВС.

На рис. 6 и 7 представлена картина течения в плоскости симметрии проточной части модели ТВС.

Для демонстрации возможности перемещения сборки при помощи модификатора «подвижное тело» в FlowVision проводится тестовый расчет, в котором на входе в расчетную модель задается линейное увеличение расхода теплоносителя от 150 до 162 % от номинального расхода. На рис. 8 приведена зависимость расхода от времени с соответствующим положением ТВС во втулке напорной камеры.

Из рис. 8 видно, что при превышении расхода на 50 % от номинального ТВС находится в неподвижном положении. Далее, при линейном увеличении расхода, происходит отрыв хвостовика ТВС от исходного положения в момент времени, в котором расход в 1.55 раза больше номинального, и сборка начинает всплывать с некоторым ускорением.

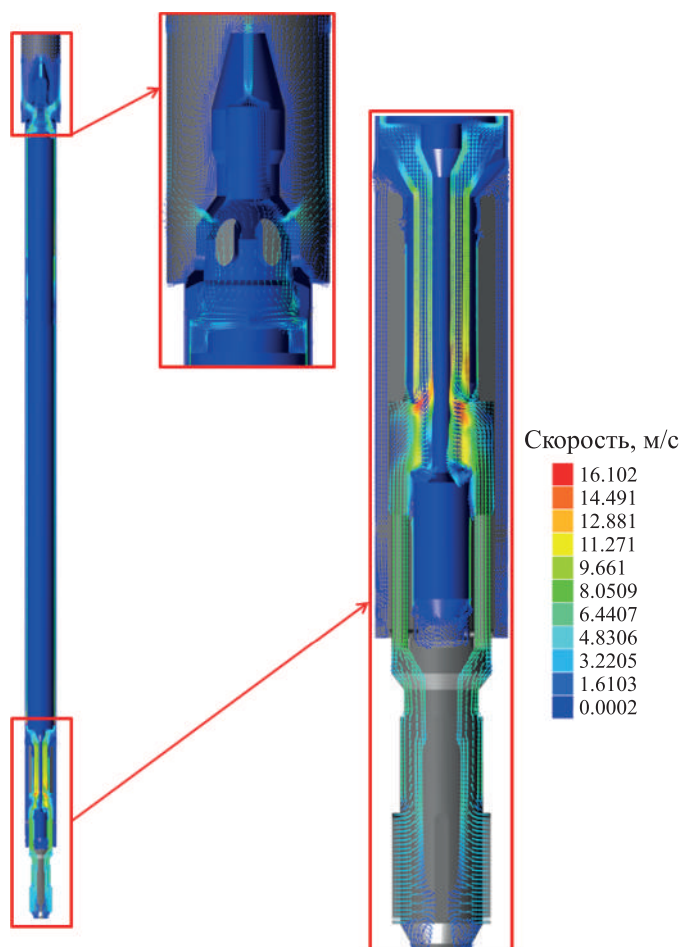


Рис. 6. Распределение скорости в плоскости симметрии проточной части расчетной модели в ПК FlowVision, полученное при стационарном расчете, выполненном для определения минимального коэффициента запаса до всплытия ТВС

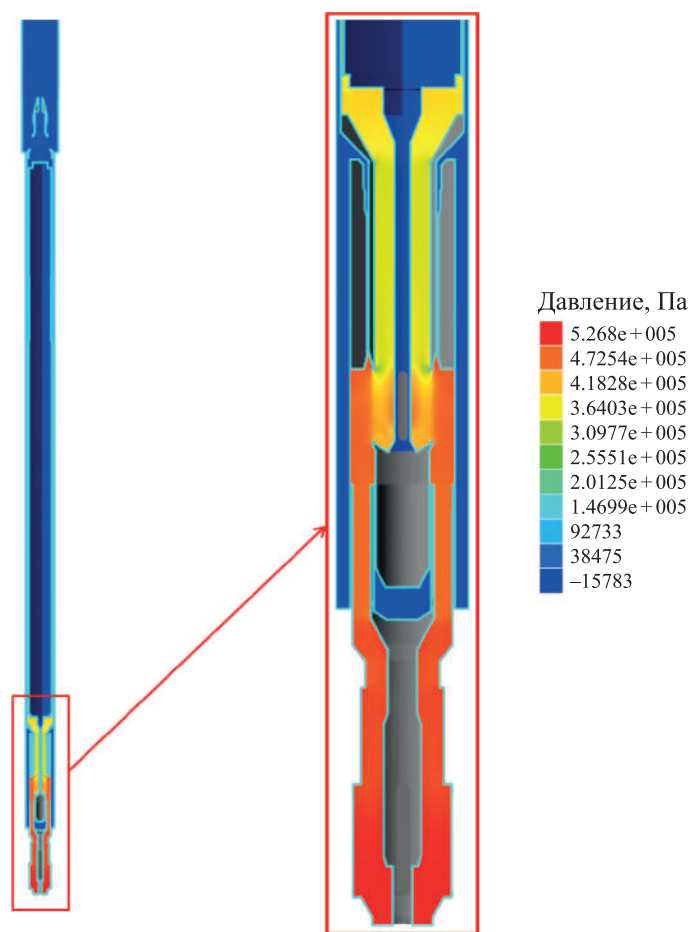


Рис. 7. Распределение давления в плоскости симметрии проточной части расчетной модели в ПК FlowVision, полученное при стационарном расчете, выполненном для определения минимального коэффициента запаса до всплытия ТВС

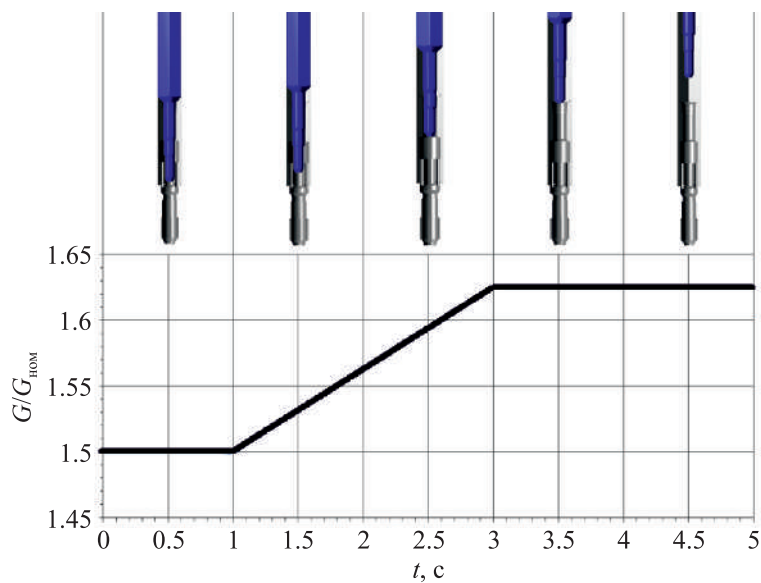


Рис. 8. Зависимость расхода теплоносителя от времени и соответствующее положение ТВС во втулке напорной камеры в процессе тестового расчета в ПК FlowVision:  $G/G_{\text{ном}}$  — отношение текущего массового расхода через ТВС к номинальному расходу,  $t$  — время, с

#### 4. Определение гидродинамических характеристик при скачкообразном изменении давления в напорной камере реактора

На данном этапе исследования проводятся расчеты динамических режимов, в которых на входе в расчетную модель задается скачкообразное изменение давления.

Изменение давления на входе в модель происходит следующим образом: в начальный момент времени давление соответствует некоторому расходу теплоносителя; далее, через промежуток времени, который необходим для установления режима течения теплоносителя, происходит скачкообразное повышение давления на величину  $\Delta P$  и продолжительностью  $\Delta t$ , после чего давление возвращается к своему первоначальному значению. В результате расчета определяются поля скорости, давления в расчетной модели и сила, действующая на ТВС.

На основании анализа материалов проекта РУ БН для выполнения тестовых расчетов принималась величина скачка давления на входе в расчетную модель  $\Delta P$ , равная 0.769 МПа. Значения продолжительности скачка давления  $\Delta t$  равны 0.1 и 0.5 с.

Также исследуется влияние шага интегрирования по времени на результаты расчета в ПК FlowVision. В таблице 1 представлены значения гидродинамических характеристик, полученные для разных продолжительностей скачка давления и явных шагов интегрирования по времени.

В таблице приняты следующие обозначения:

$\Delta P$  — амплитуда скачкообразного изменения давления, МПа;

$\Delta t$  — продолжительность скачка давления, с;

$\Delta \tau$  — явный шаг по времени в FlowVision, с;

$F_1 = F_{\text{гн}}/P_{\text{ТВС}}$  — отношение максимальной гидродинамической силы в момент начала скачка  $\Delta P$  к весу ТВС в натрии;

$F_2 = F_{\text{гн}}/P_{\text{ТВС}}$  — отношение максимальной гидродинамической силы в момент окончания скачка  $\Delta P$  к весу ТВС в натрии;

$v$  — скорость ТВС, м/с.

Таблица 1. Результаты серии гидродинамических расчетов при скачкообразном изменении давления в напорной камере реактора

№ п/п	$\Delta P$	$\Delta t$	$\Delta \tau$	$F_1/F_2$	$v$
1	0.769	0.1	0.0005	2.59/0.53	0
2		0.1	0.0001	2.76/0.47	0
3		0.5	0.0001	0.78/0.81	0

На рис. 9–11 представлены графики зависимости от времени гидродинамической силы, действующей на ТВС, давления и расхода теплоносителя на входе в модель для соответствующих вариантов расчета из таблицы 1.

Во всех вариантах расчета для гидродинамической силы и расхода видны общие закономерности. В начале скачка давления при увеличении гидродинамической силы, действующей на ТВС, наблюдается повышение расхода через сборку. Данный рост продолжается до момента прекращения скачка давления, и происходит плавное снижение расхода.

Расчеты показывают, что для исключения зависимости результатов расчета от величины шага по времени необходимо задавать безразмерный шаг по времени (CFL) в диапазоне от 1 до 5. Однако уменьшение CFL приводит к существенному увеличению времени расчета.

Из таблицы 1 и рис. 9–11 можно сделать вывод, что при заданном скачкообразном повышении давления гидродинамическая сила, действующая на ТВС, не превышает вес сборки в натрии и перемещение ТВС отсутствует. Максимальные кратковременные всплески гидродинамической силы в начале скачка давления превышают вес ТВС в натрии, но времени их действия недостаточно для начала движения сборки.

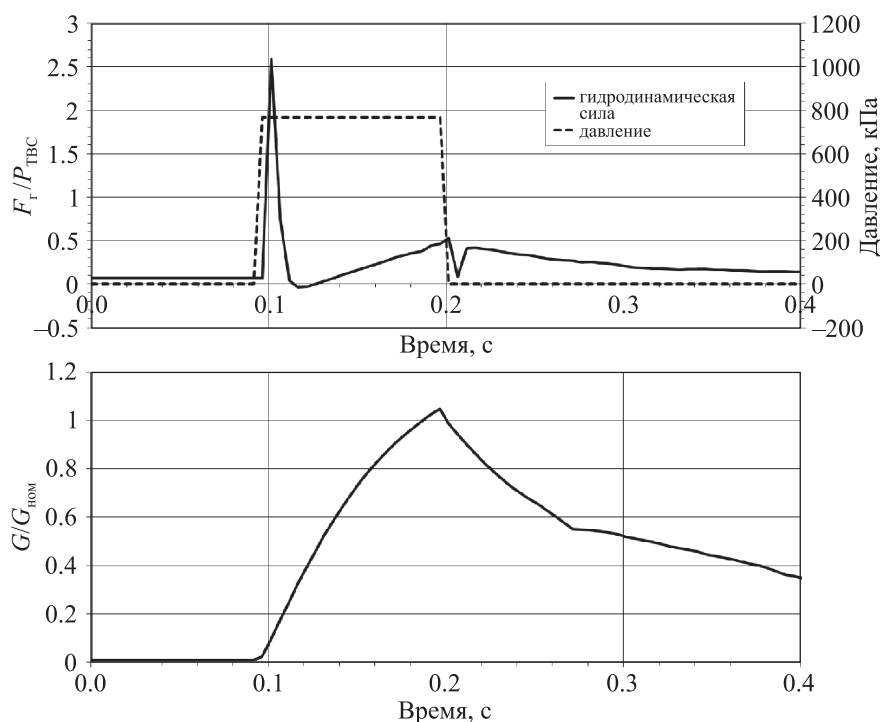


Рис. 9. Графики зависимости от времени гидродинамической силы, давления и расхода теплоносителя на входе в модель, полученные в ходе нестационарного расчета № 1 (см. табл. 1) при скачкообразном изменении давления в напорной камере реактора:  $F_r/P_{TWC}$  — отношение гидродинамической силы к весу ТВС в натрии,  $G/G_{ном}$  — отношение текущего массового расхода через ТВС к номинальному расходу

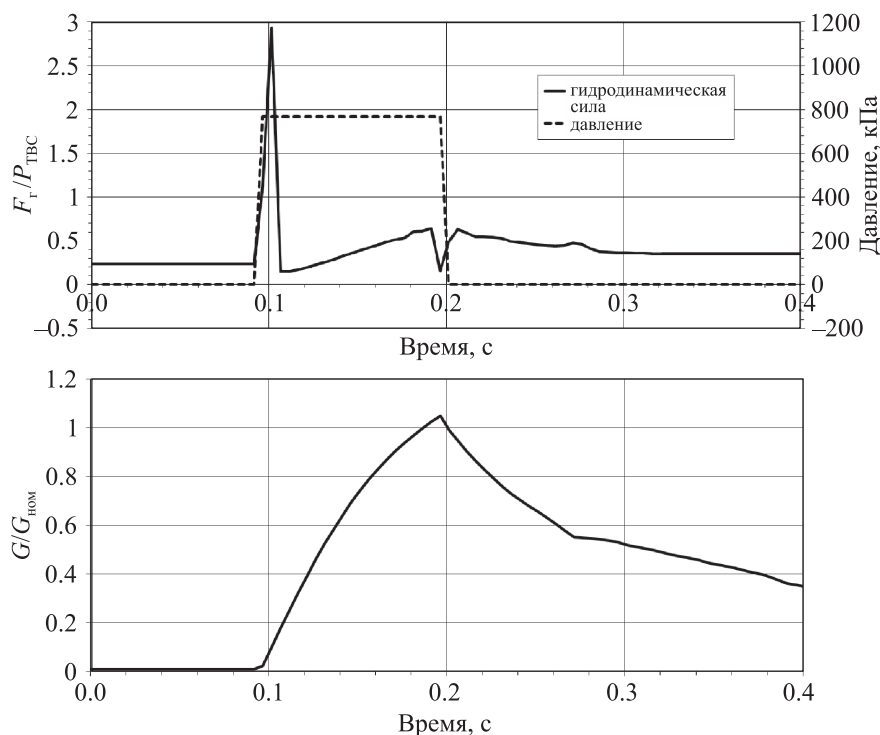


Рис. 10. Графики зависимости от времени гидродинамической силы, давления и расхода теплоносителя на входе в модель, полученные в ходе нестационарного расчета № 2 (см. табл. 1) при скачкообразном изменении давления в напорной камере реактора:  $F_r/P_{TWC}$  — отношение гидродинамической силы к весу ТВС в натрии,  $G/G_{ном}$  — отношение текущего массового расхода через ТВС к номинальному расходу

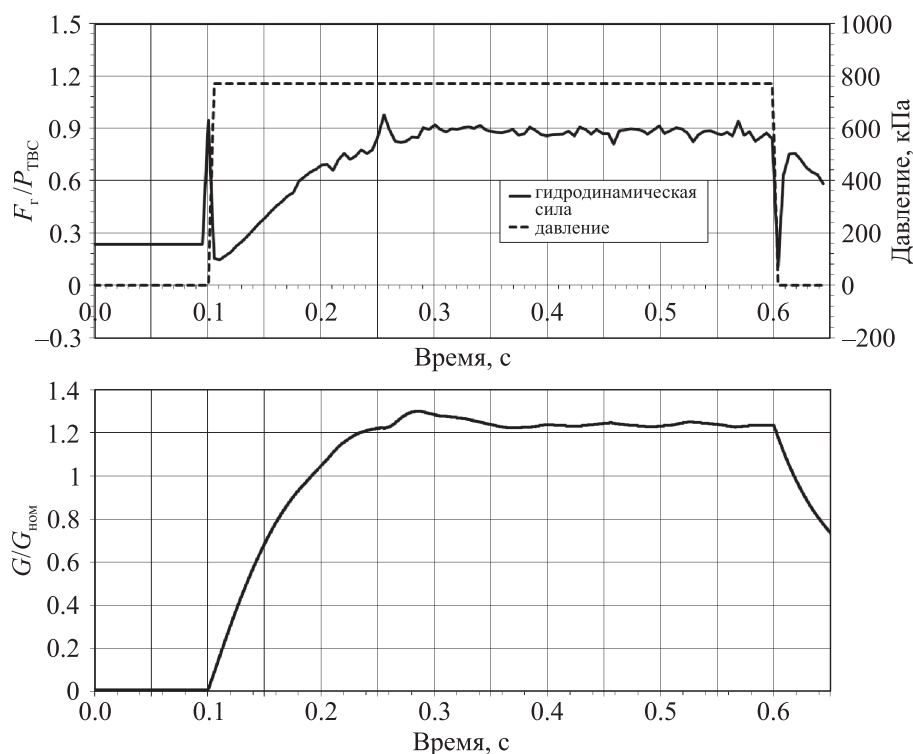


Рис. 11. Графики зависимости от времени гидродинамической силы, давления и расхода теплоносителя на входе в модель, полученные в ходе нестационарного расчета № 3 (см. табл. 1) при скачкообразном изменении давления в напорной камере реактора:  $F_T/P_{TBC}$  — отношение гидродинамической силы к весу ТВС в натрии,  $G/G_{ном}$  — отношение текущего массового расхода через ТВС к номинальному расходу

## 5. Заключение

В программном комплексе FlowVision проведено расчетное исследование с целью обоснования запаса до всплытия ТВС при скачкообразном повышении давления в напорной камере реактора. В ходе исследования разработаны методика и расчетная модель ТВС, позволяющие с обоснованными упрощениями определять минимальный коэффициент запаса до всплытия сборки и минимальный расход, при котором происходит перемещение ТВС, а также гидродинамические параметры и силы, действующие на ТВС, при скачкообразном изменении давления на входе в расчетную модель.

В результате стационарных расчетов в программном комплексе FlowVision определен минимальный коэффициент запаса до всплытия ТВС, равный 2.15. Такое значение коэффициента запаса до всплытия свидетельствует о том, что в приоритетных вопросах, касающихся безопасности перспективного реактора на быстрых нейтронах, обеспечивается достаточная степень консерватизма. Также с помощью стационарных расчетов показано, что расход, при котором происходит перемещение ТВС, в 1.55 раза больше номинального. Такое превышение расхода не достигается в процессе работы РУ БН.

По результатам серии расчетов динамических режимов можно отметить, что при исходном событии, связанном со скачкообразным повышением давления в напорной камере реактора, движения тепловыделяющей сборки не происходит.

Разработанная методика и проведенные с помощью ПК FlowVision исследования гидродинамических процессов, происходящих при движении жидкометаллического теплоносителя в ТВС, дают возможность с требуемой точностью решать задачи обоснования запаса до всплытия ТВС в различных ситуациях, которые возникают при работе РУ БН.

## Список литературы (References)

- Аксёнов А. А., Жлуктов С. В., Шмелёв В. В., Жестков М. Н., Рогожкин С. А., Пахолков В. В., Шепелёв С. Ф. Разработка методики расчетного анализа теплогидравлических процессов в реакторе на быстрых нейтронах с применением кода FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование. — 2017а. — Т. 9, № 1. — С. 87–94.
- Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Shmelev V. V., Shaporenko E. V., Shepelev S. F., Rogozhkin S. A., Krylov A. N. Razrabotka metodiki raschetnogo analiza teplogidravlicheskih processov v reaktore na bystrykh neitronah s primeneniem koda FlowVision [Development of methodology for computational analysis of thermos-hydraulic processes proceeding in fast-neutron reactor with FlowVision CFD software] // Kompjuternye Issledovaniya i Modelirovaniye [Computer Research and Modeling]. — 2017a. — Vol. 9, No. 1. — P. 87–94 (in Russian).
- Аксёнов А. А., Жлуктов С. В., Шмелёв В. В., Шапоренко Е. В., Шепелёв С. Ф., Рогожкин С. А., Крылов А. Н. Расчетные исследования процесса перемешивания неізотермических потоков натриевого теплоносителя в тройнике // Компьютерные исследования и моделирование. — 2017б. — Т. 9, № 1. — С. 95–110.
- Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Shmelev V. V., Zhestkov M. N., Rogozhkin S. A., Paholkov V. V., Shepelev S. F. Raschetnije issledovaniya processa peremeshivaniya neizotermicheskikh potokov natrievogo teplonositelya v troinike [Numerical investigation of mixing non-isothermal streams of sodium coolant in T-branch] // Kompjuternye Issledovaniya i Modelirovaniye [Computer Research and Modeling]. — 2017b. — Vol. 9, No. 1. — P. 95–110 (in Russian).
- Аттестационный паспорт программы для ЭВМ FlowVision. Регистрационный номер 492 от 19.12.2019 г.
- Attestation passport of the computer program FlowVision. Registration number 492 from 19.12.2019 (in Russian).
- Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
- Idelchik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / pod red. M. O. Shteinberga. — 3-e izd., pererab. i dop. — Moscow: Mashinostroenie, 1992. — 672 p. (in Russian).
- Лубина А. С., Субботин А. С., Седов А. А., Фролов А. А. Анализ особенностей гидродинамики и теплообмена в ТВС перспективного натриевого реактора с высоким коэффициентом воспроизводства в уран-плутониевом топливном цикле // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. — 2015. — Вып. 1. — С. 37–49.
- Lubina A. S., Subbotin A. S., Sedov A. A., Frolov A. A. Analiz osobennostey gidrodinamiki i teplotobmena v TVS perspektivnogo natrievogo reaktora s vysokim koeffitsientom vosproizvodstva v uran-plutoniyevoe toplivnoe tsikle [Analysis of Features of Hydrodynamics and Heat Transfer in the Fuel Assembly of Perspective Sodium Reactor with a High Rate of Repeoduction in the Uranium-Plutonium Fuel Cycle] // Voprosy atomnoi nauki i tehniki. Ser. Fizika yadernijh reaktorov [Problrms of Atomic Science and Technokogy]. — 2015. — Iss. 1. — P. 37–49 (in Russian).
- Рогожкин С. А., Осипов С. Л., Фадеев И. Д., Шепелев С. Ф., Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Сазонова М. Л., Шмелев В. В. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора // Атомная энергия. — 2013. — Т. 115, вып. 5. — С. 295–298.
- Rogozhkin S. A., Osipov S. L., Fadeev I. D., Shepelev S. F., Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Sazonova M. L., Shmelev V. V. Chislennoje modelirovanie teplogidravlicheskih processov v verkhney kamere bystrogo reaktora [Numerical simulation of thermos-hydraulic processes in upper chamber of fast reactor] // Atomnaja energija [Atomic energy]. — 2013. — Vol. 115, No. 5. — P. 295–298 (in Russian).
- Руководство пользователя FlowVision, версия 3.12.01. — 2020.
- User's guide FlowVision Version 3.12.01. — 2020 (in Russian).
- Усынин Г. Б., Кусмарцев Е. В. Реакторы на быстрых нейтронах: учеб. пособие для вузов / под ред. Ф. М. Митенкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 288 с.
- Usynin G. B., Kusmarcev E. V. Reaktory na bystrykh nejtronah: ucheb. posobie dlya vuzov / pod red. F. M. Mitenkova. — Moscow: Jenkrgoatomizdat, 1985. — 288 p. (in Russian).
- Jeong J., Song M., Lee K. RANS based CFD methodology for a real scale 217-pin wire-wrapped fuel assembly of KAERI PGSFR // Nuclear Engineering and Design. — 2017. — Vol. 313. — P. 470–485.

- Ozturk U., Soğancı S., Akimov V., Tutkun M., Aksenov A.* Validation of FlowVision CFD on ICCS2015 Test Case: Application of Gap Model and SGGR for Leakage Flow Prediction in a Dry Screw Compressor // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 604 012010. — DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012010
- Roelofs F., Gopala V., Jayaraju S., Shams A., Komen E.* Review of fuel assembly and pool thermal hydraulic for fast reactors // Nuclear Engineering and Design. — 2013. — Vol. 265. — P. 1205–1222.
- Sakar M., Velusamy K., Munshi P., Om Pal Singh.* Thermal hydraulic investigation of heat transfer from a completely blocked fuel subassembly of SFR // Annals of Nuclear Energy. — 2019. — Vol. 130. — P. 131–141.
- Wilcox D. C.* Turbulence modeling for CFD. — DCW Industries Inc., 1994. — 460 p.



