

## **Количественная оценка результатов верификации кода СОКРАТ-БН на эксперименте по исследованию перепада давления в натриевом теплоносителе**

*Н.И. Рыжов, Ю.Ю. Виноградова, В.Н. Семенов*

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН*

### **Введение**

Для решения актуальных задач в области обоснования безопасности АЭС с РУ БН, в том числе анализа аварий с вероятностью разрушения активной зоны реактора в ИБРАЭ РАН был разработан интегральный код СОКРАТ-БН. Для комплексного расчета тяжелой аварии в коде СОКРАТ-БН реализованы одномерная и двухмерная модели теплогидравлики, модель точечной кинетики для нейтронно-физического расчета активной зоны, модель плавления топливных сборок, модели наработки и распространения ПД в теплоносителе и реакторных помещениях, модель для расчета термомеханических напряжений в оболочках топливных стержней. Каждая модель, реализованная в коде, требует верификации, для обоснования её применимости к моделированию исследуемых явлений. Только после верификации всех заложенных моделей, расчетный код может быть подан на аттестацию в надзорный орган. Аттестованный код может использоваться для проведения расчетов для обоснования безопасности АЭС. В данной работе приведен пример использования методики, изложенной в [1], для количественной оценки результатов верификации кода СОКРАТ-БН на эксперименте по исследованию перепада давления в круглой трубе при стационарном однофазном и двухфазном течении натриевого теплоносителя [2].

### **Метод проведения расчетов**

Верификация кода на экспериментальных данных позволяет дать ответ на вопрос насколько близко, модели, заложенные в коде, описывают наблюдаемые физические явления. Наиболее простым способом сравнения расчетных и экспериментальных данных является определение разницы расчетного и экспериментального значений. При таком подходе считается, что результаты, полученные в расчете и в эксперименте, являются «точными». Однако данный подход не учитывает неопределенности сравниваемых величин. При моделировании эксперимента источником неопределенности является неполнота информации о моделируемом объекте, неадекватность математической модели и несовершенство расчетных методик [3].

Результаты экспериментальных измерений являются оценкой математического ожидания наблюдаемой величины, «истинное» значение величины остается неизвестным.

В [1] и [4] предлагается следующий способ учета указанных неопределенностей при проведении верификации. На рисунке 1 приведено схематическое расположение расчетных и экспериментальных данных относительно «истинного», но не известного, значения.

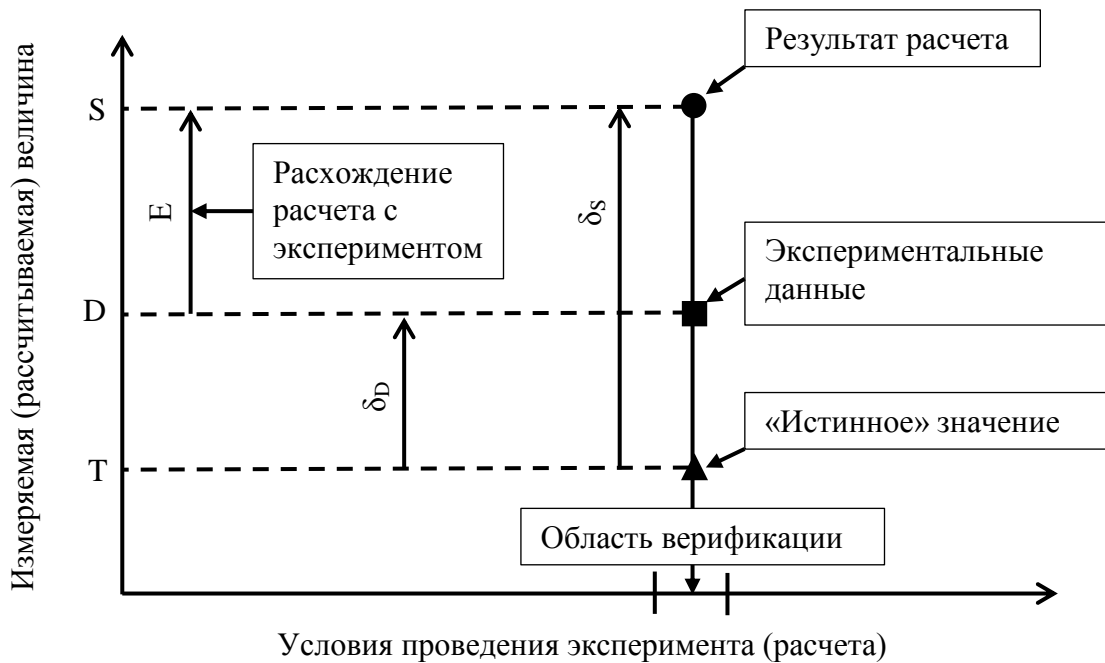


Рисунок 1 – Схематическое изображение относительного расположения расчетных и экспериментальных данных.

Расхождение расчетных и экспериментальных данных  $E$  можно выразить через расхождение результата измерения и «истинного» значения  $\delta_D$  и расхождение результатов расчета и «истинного» значения  $\delta_S$ . В формуле (1) результат расчета обозначен  $S$ , экспериментальное измеренное значение  $D$  и «истинное» значение  $T$ .

$$E = S - D = (\delta_S + T) - (\delta_D + T) = \delta_S - \delta_D \quad (1)$$

Расхождение расчётных результатов может быть связано с предположениями, сделанными в моделях физических процессов ( $\delta_{model}$ ), несоответствием условий расчета и условий проведения эксперимента ( $\delta_{input}$ ) и с линеаризацией и методом численного решения системы уравнений ( $\delta_{num}$ ).

$$\delta_S = \delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num} \quad (2)$$

Поставим в формулу (1) выражение для  $\delta_S$  из формулы (2) и выразим  $\delta_{model}$ . Итоговое выражение приведено в формуле (3).

$$\delta_{model} = E - (\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D) \quad (3)$$

Значение величин, приведенных в правой части формулы (3) в скобках не известны. В таком случае [4] предлагается построить доверительный интервал для каждой

величины. И, используя доверительные интервалы, получить диапазон, в котором лежит величина  $\delta_{model}$  с заданной вероятностью. Суммарную неопределенность величин в скобках в правой части назовём неопределенностью верификации.

$$u_{ver}^2 = u_{input}^2 + u_{num}^2 + u_D^2 \quad (4)$$

В работе [5] предлагается способ оценки неопределенности  $u_{num}$  результатов расчета с использованием только двух расчетных сеток с разным количеством ячеек. Использование большего числа расчетных сеток позволяет уменьшить данный интервал неопределенности, однако требует больших трудозатрат.

Для двух сеток размерности  $d$  с количеством ячеек  $N_1$  и  $N_2$  ( $N_1 > N_2$ ) вводится коэффициент измельчения сетки:

$$r = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{\frac{1}{d}} > 1 \quad (5)$$

Неопределенность результатов численного решения системы уравнений вычисляется с использованием результатов расчета  $f_1$  по сетке с количеством ячеек  $N_1$  и расчета на более грубой сетке  $f_2$  с меньшим количеством ячеек  $N_2$  по формуле (6). При выводе формулы используется экстраполяция Ричардсона.

$$U_{num} = \frac{F_s}{r^p - 1} \cdot |f_2 - f_1| \quad (6)$$

В формулу (6) также входят  $p$  – порядок численной схемы и  $F_s$  – коэффициент охвата. При использовании 2-х численных решений рекомендуется использовать коэффициент охвата равный 3. В таком случае с 95% вероятностью точное решение системы уравнений будет находиться в интервале  $(f_1 - U_{num}; f_1 + U_{num})$ . В формулу входят стандартные отклонения неизвестных величин. Если предположить, что  $\delta_{num}$  имеет нормальное распределение, что для того, чтобы получить  $u_{num}$ , необходимо  $U_{num}$  разделить на 2.

В зарубежной литературе эта величина называется показателем сходимости по сетке (Grid Convergence Index) [5].

Для расчета  $u_{input}^2 + u_D^2$  в [4] предлагается использовать подход, основанный на методе Монте-Карло. Сначала определяется набор разыгрываемых параметров, с которыми будут проводиться расчеты ( $I_1, \dots, I_K$ ). Оценивается функция распределения (в большинстве случаев принимается нормальное распределение) и ее параметры. Такая же процедура выполняется и для экспериментальных данных. Затем по известным функциям распределения производится выборка объемом  $N$  случайных значений параметров расчетов ( $I_{1n}, \dots, I_{Kn}$ ), по которым проводятся расчеты. Результаты  $N$  расчетов статистически обрабатываются, в результате чего вычисляется среднее  $E$  и стандартное

отклонение. Полученное таким образом стандартное отклонение содержит в себе  $u_{input}^2 + u_D^2$ . На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма.

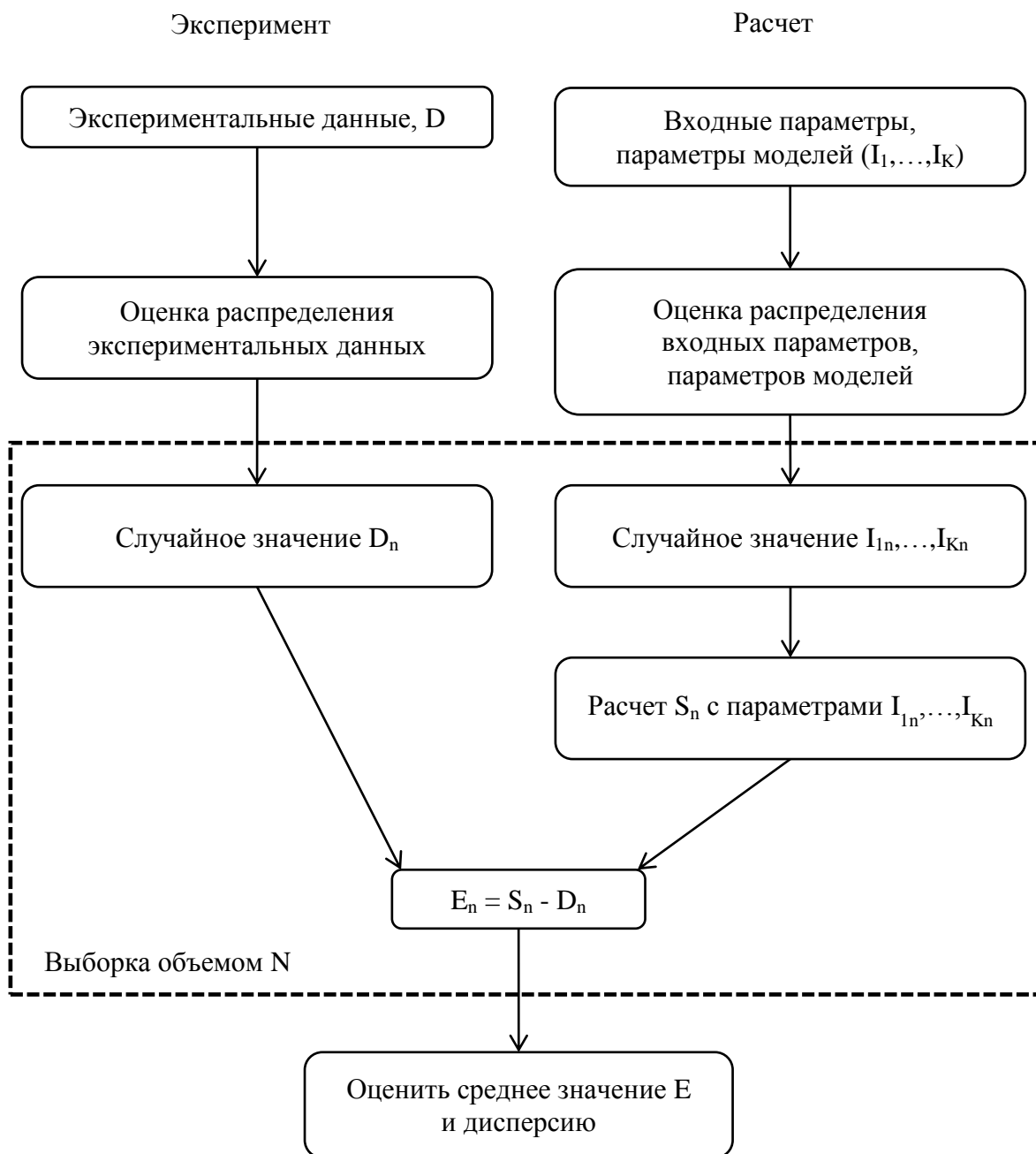


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма определения неопределенности результатов расчетов.

## Исследуемая модель

Описанный выше подход был использован для количественной оценки результатов верификации кода СОКРАТ-БН на эксперименте ML-4 (Италия). Моделирование данного эксперимента направлено на верификацию явлений, связанных с гидродинамикой одно- и двухфазного потока натриевого теплоносителя в условиях нагрева в простой геометрии

(круглая труба). Данные условия характерны для теплообменников РУ БН (АТО, ПТО) в условиях аварий типа ULOF. Цель расчета - проверка модели, учитывающей потери давления на трение в канале в условиях кипения теплоносителя. Сравниваются расчетные и экспериментальные значения падения давления по длине экспериментального канала.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутую циркуляционную натриевую петлю. На подъемном участке петли осуществлялся нагрев натрия путем подачи электрического тока на металлическую трубу. В работе [6] указано, что часть электрического тока протекала по теплоносителю, и 8% мощности выделялось непосредственно в натрии. Схема подъемного участка экспериментальной установки с геометрическими размерами приведена на рисунке 3.

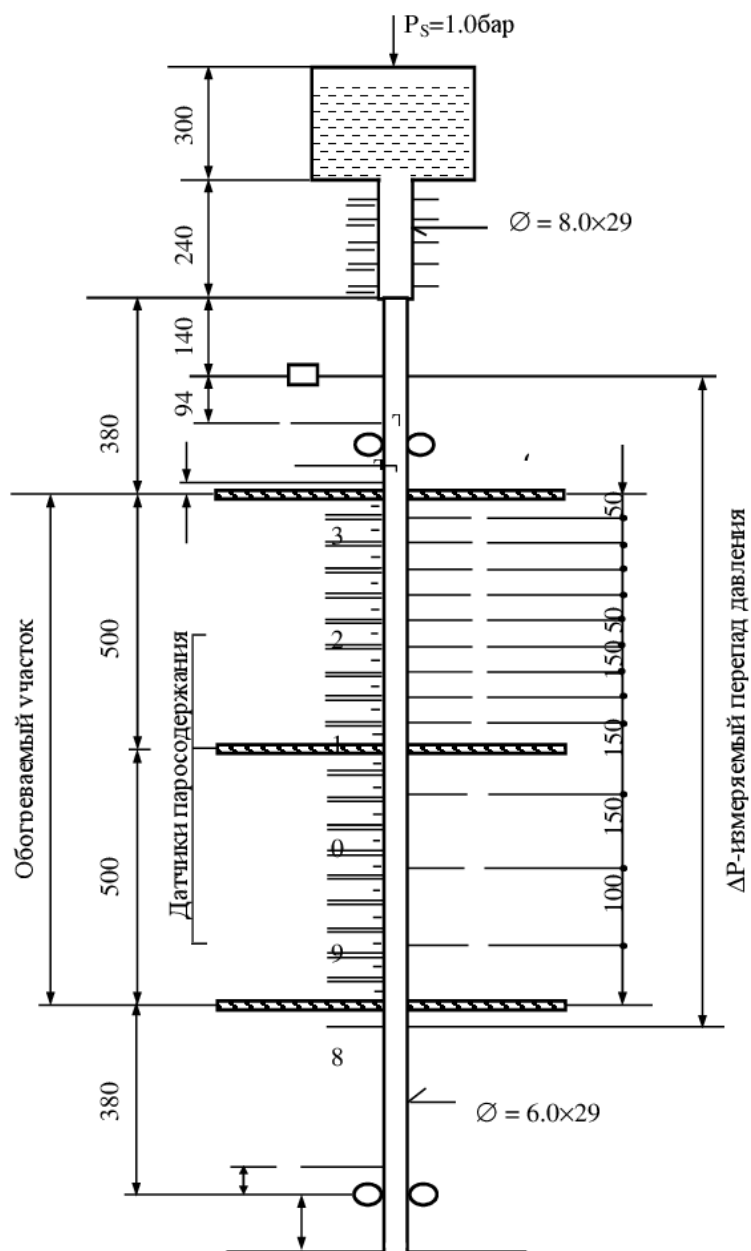


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки ML-4

На установке было выполнено несколько экспериментов с различными расходами теплоносителя и мощностями подогрева. В данной работе приводится расчет только одного выбранного эксперимента. Условия проведения эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия эксперимента

Объемный расход, $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	Давление на выходе обогреваемой части канала, $10^5 \text{ Па}$	Температура на входе, К	Удельный тепловой поток в теплоноситель в обогреваемом канале, $\text{МВт}/\text{м}^2$
30÷110	1,0	843	1,27

Для проведения расчетов по коду СОКРАТ-БН было разработано две нодализационных схемы с разным количеством ячеек. Коэффициент измельчения сетки  $r=5$ . Нодализационные схемы (рисунок 4) состоят из четырех, соединенных последовательно, каналов «ch\_1», «ch\_2», «ch\_3», «ch\_4». На нижней границе канала «ch\_1» задано граничное условие на постоянный расход «vf\_in». За необогреваемым каналом «ch\_1» следует обогреваемый канал «ch\_2». Канал «ch\_2» обменивается теплом с тепловым элементом «heat». К каналу «ch\_2» подсоединяется канал «ch\_3». Теплообмен канала «ch\_3» с тепловым элементом «h\_out\_2» учитывает потери тепла в окружающую среду. Заключительный расширительный участок экспериментальной установки моделируется каналом «ch\_4», для которого так же учитываются тепловые потери. Сверху канала «ch\_4» задано граничное условие на постоянное давление «p\_out», моделирующее расширительный бак. К первой ячейке канала «ch\_4», на сетке 1, и к первым 5 ячейкам на сетке 2, подключено граничное условие на постоянный расход «bypass», моделирующее работу байпаса. В таблице 2 указано количество ячеек в каждом канале для двух сеток.

Таблица 2 – Разбиение каналов на ячейки

Канал	Количество ячеек	
	Сетка 1	Сетка 2
ch_1	3	15
ch_2	10	50
ch_3	4	20
ch_4	2	10
Всего ячеек	19	95



сеткам, и была оценена неопределенность  $U_{num}$  результатов расчетов. Результаты приведены в графическом виде на рисунке 5. В работе [1] давление приведено в барах, поэтому на графиках расчетное давление так же приведено в барах.

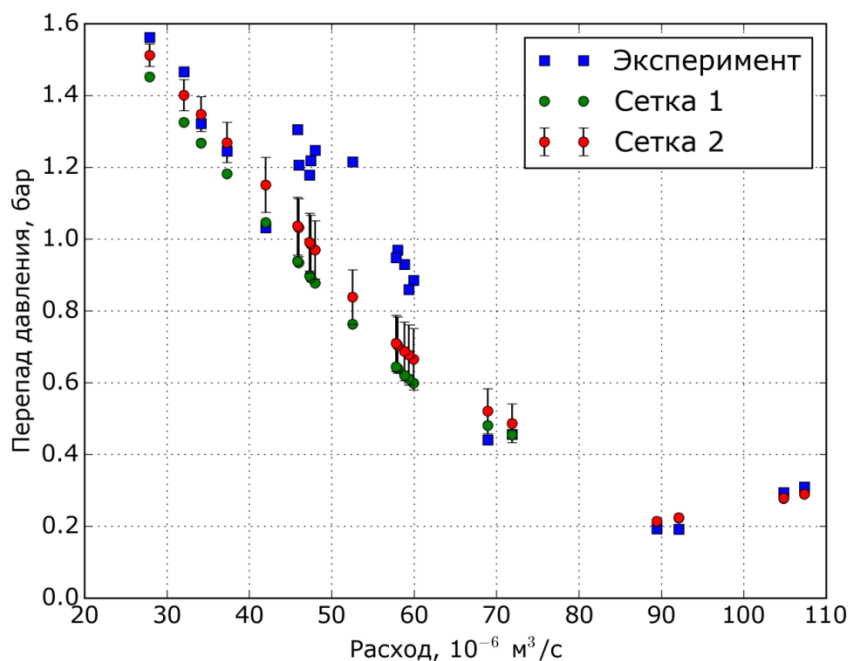


Рисунок 5 – Влияние количества расчетных ячеек на результаты расчета

Большая неопределенность в результатах расчетов перепада давления при двухфазном течении связана с тем, что в зависимости от размеров ячеек меняется положение точки закипания и размер области двухфазного течения. При использовании больших ячеек средняя температура в ячейке может не достигать температуры насыщения, и трение в ней будет вычисляться как для однофазной ячейки. При более подробном разбиении температура теплоносителя может достигнуть температуры насыщения на другой высоте.

В дальнейшем для проведения вариационных расчетов использовалась сетка 2.

В данном эксперименте исследуемым параметром, подлежащим сравнению с экспериментальными данными, является перепад давления на рабочем участке экспериментального канала. Исходными данными для расчета перепада давления являются: расход натрия, мощность подогрева, температура натрия на входе в рабочий участок, давление натрия в расширительном бачке, геометрические размеры элементов экспериментальной установки, коэффициенты теплоотдачи и трения о стенку.

Значения мощности нагрева и давления на границе, входная температура натрия даны в [1] в цифровом виде, перепад давления и расход – в виде графиков.



Неопределенности параметров, приведенных на графике, складываются из собственной неопределенности измерения и неопределенности оцифровки данных с графиков.

В работе [1] указана погрешность измерения температуры теплоносителя  $\pm 15\text{K}$ . В работе [6] указана погрешность измерения давления в экспериментальной установке и геометрических параметров схожей экспериментальной установки. Погрешности измерения значений расхода и мощности не приведены. Принятая неопределенность входных данных приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Разбиение каналов на ячейки

Параметр	Неопределенность экспериментальных данных	Неопределенность оцифровки	Общая неопределенность
Расход теплоносителя на входе, $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	5	2	5,4
Подводимая мощность, $\text{кВт}/\text{м}^2$	20,6	0	20,6
Давление на выходе, мбар от номинального значения	1	0	1
Перепад давления на измерительном участке, мбар	1	20	20
Температура теплоносителя на входе, К	15	0	15
Диаметр трубы, мм	0,05	0	0,05
Длина обогреваемого участка, мм	8	0	8
Коэффициент теплообмена, %	5	0	0
Коэффициент трения о стенку, %	5	0	0

На рисунке 6 приведены результаты вариационных расчетов по коду СОКРАТ-БН, проведенных с помощью, ранее разработанной в ИБРАЭ РАН программы VARIA [7]. Интервалы, вокруг расчетных значений показывают 95% доверительные интервалы.

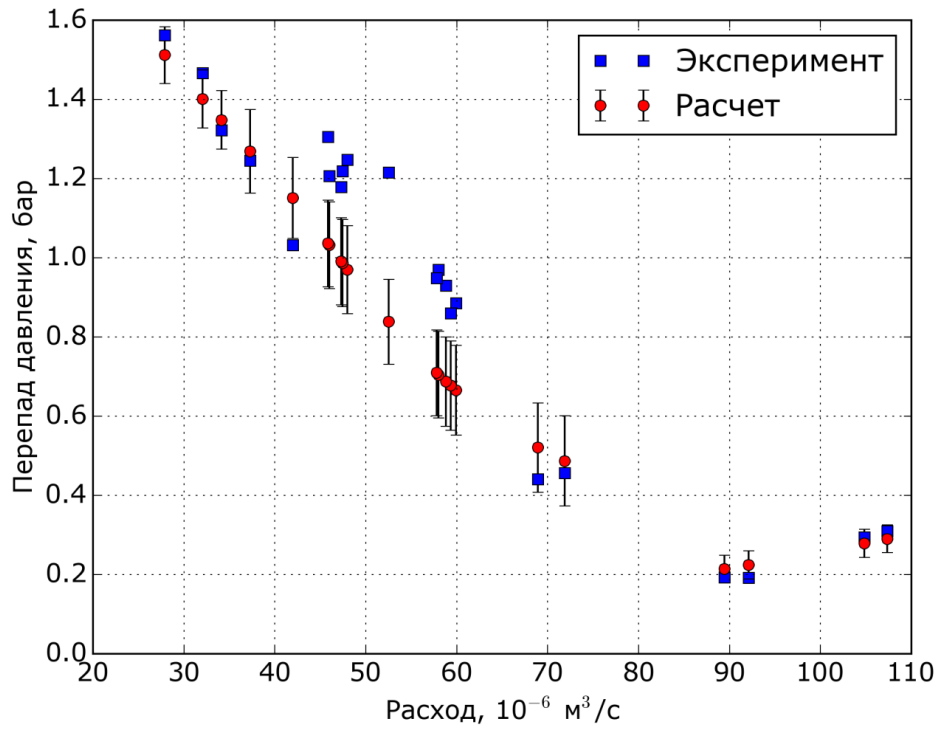


Рисунок 6 – Неопределенность результатов расчетов по отношению к входным данным

Суммарная неопределенность  $U_{ver}$  результатов расчетов приведена на рисунке 7.

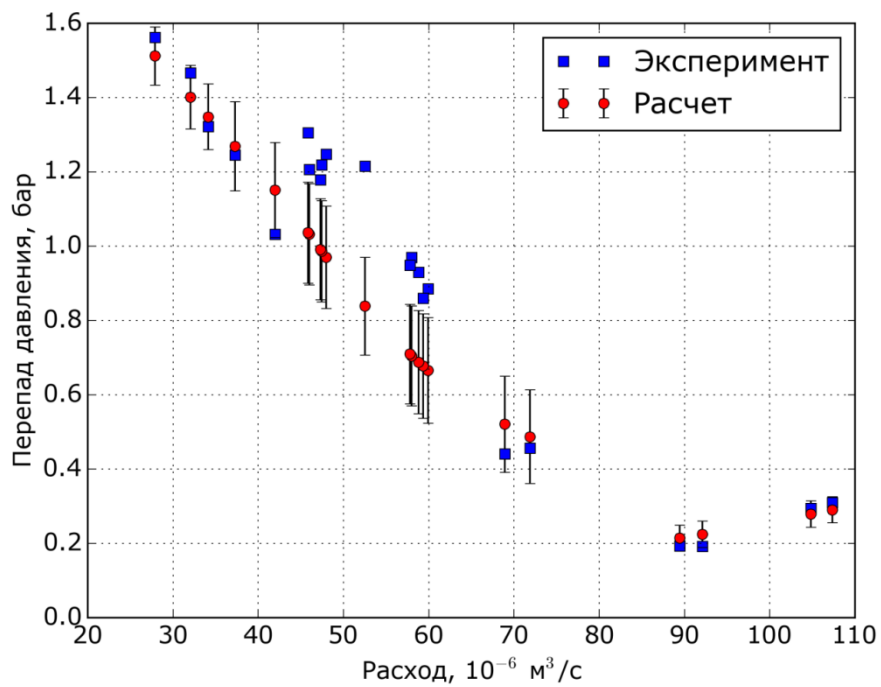


Рисунок 7 – Суммарная неопределенность результатов расчетов

Первые четыре значения расхода относятся к однофазной области течения жидкометаллического теплоносителя, остальные значения относятся к двухфазной области.

В таблице 4 приведены средние значения  $E$  и  $U_{ver}$  для однофазной и двухфазной областей исследования. Так же построены 95% доверительные интервалы для величины расхождения расчетных и экспериментальных данных, связанной с модельными предположениями  $\delta_{model}$ .

Таблица 4 – Анализ результатов расчетов

	$E$ , бар	$U_{ver}$ , бар	$(E - U_{ver}; E + U_{ver})$ , бар
Однофазное течение	0,0043	0,0353	(-0,0310; 0,0396)
Двухфазное течение	-0,1391	0,1255	(-0,2646; -0,0136)

## Заключение

В работе было представлено применение комплексного подхода к верификации, описанного в [1], на примере верификации теплогидравлического модуля кода СОКРАТ-БН. Полученные результаты показывают, что при однофазном течении разбиение расчетной сетки практически не влияет на результат расчета перепада давления. Таким образом, при моделировании однофазного течения расхождение результатов расчета с измерениями в первую очередь связано с неопределенностью входных данных. При двухфазном течении неопределенность связанная с разбиением расчетной области на ячейки и неопределенность по отношению ко входным параметрам сопоставимы по величине.

В работе [6] указано, что 92% мощности выделялось в стальной трубе и 8% выделялось непосредственно в теплоносителе. В дальнейшем планируется разработать модель, учитывающую энерговыделение непосредственно в теплоносителе при прямом электрическом обогреве и учесть данное явление в качестве неопределенности проведения эксперимента. Так же в дальнейшем планируется учесть неопределенность в свойствах материала стальной трубы и наличие возможного аксиального профиля энерговыделения.

## Литература

- 1 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. – ASME V&V20-2009 – New York: ASME, 2009 -88 p.
- 2 *Kottowski H.M. H. and Savatteri C.* Fundamentals of liquid metal boiling thermohydraulics. – Nuclear Engineering and Design – 1984 – Vol. 82 – pp. 281 – 304
- 3 *Ковалевич О.М., Строганов А.А.* Погрешности и неопределенности при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. – Атомная энергия –2009 – т.106 в.2 – С.68-75.
- 4 *Coleman H.W. and Steele W.G.* Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, Third Edition – Hoboken: John Wiley & Sons, 2009
- 5 *Oberkampf W.L., Roy C.J.* Verification and Validation in Scientific Computing – New-York: Cambridge University Press, 2010 – 767 p.
- 6 *Chenu A., Mikityuk K., Chawla R.* Pressure drop modeling and comparisons with experiments for single- and two-phase sodium flow – Nuclear Engineering and Design – 2011 – Vol. 241 – pp. 3898 – 3909
- 7 *Moiseenko E. V., Filippov A. S.* A methodology for multivariate simulation with massively parallel computing systems for NPP safety assessment: VARIA code – J. of Eng. Thermophysics – 2011 – Vol.20/3 – pp.249 – 259