

УДК 621.3

Исследование массообмена теплоносителя в модели фрагмента активной зоны реактора

Пташиц К.П.

Научный руководитель – ст. преподаватель БУРОВ А.Л.

В современных тепловыделяющих сборках для реакторов ВВЭР планируются применять перемешивающие решетки, которые позволяют улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками и турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек.

Весьма важной задачей перемешивающих устройств является выравнивание температур (энтальпий) по сечению сборок, улучшение ситуации в наиболее напряженных ячейках ТВС, повышение запасов до кризиса теплоотдачи и др [1]. Это достигается использованием в решетках лопаток, дефлекторов потока и других элементов, обеспечивающих перемешивание теплоносителя в поперечном сечении ТВС. Наличие подобных элементов может привести к заметному повышению гидравлического сопротивления самой сборки, что будет являться нежелательным фактом. Поэтому, оптимальная конструкция решетки требует поиска вариантов, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Обоснование теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что в свою очередь требует большой информативности и высокой достоверности параметров и значений локальных гидродинамических характеристик. Таким образом, надежный теплогидравлический расчет требует проведения значительного комплекса экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока.

Ввиду этого экспериментальное исследование условий и закономерностей формирования локальных и интегральных характеристик гидродинамики потока теплоносителя с получением обобщающих зависимостей является весьма важной задачей, решение которой позволило обосновать теплотехническую надежность активной зоны реактора.

Таким образом, особенности конструкции современных ТВС для реакторов ВВЭР требуют детального изучения и анализа локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя.

Учитывая сложность математического описания трехмерного течения жидкости в пучке твэлов – многосвязной области с анизотропией коэффициентов переноса, криволинейными границами и отрывами пограничного слоя, а также технические вычислительные трудности, основным методом изучения гидродинамики сборок твэлов и активных зон реакторов в целом является экспериментальное исследование масштабных и полноразмерных моделей кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах [2].

Исследование локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя в экспериментальной модели осуществлялся методом диффузии примесей (метод трассера). Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена на экспериментальном стенде заключалась в следующем:

- поперечное сечение ЭМ было разбито на ячейки каждой из которых был присвоен свой индивидуальный номер;

- газовый трассер через впускной зонд подавался в три характерные области: стандартная, уголковая и область межкассетного зазора (рисунок 1) ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью трубки Пито-Прандтля производился отбор концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за поясом ПР в характерных сечениях по длине ЭМ (рисунок 2); по полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера

по длине экспериментальной модели от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения при постановке пояса перемешивающей решетки [3].

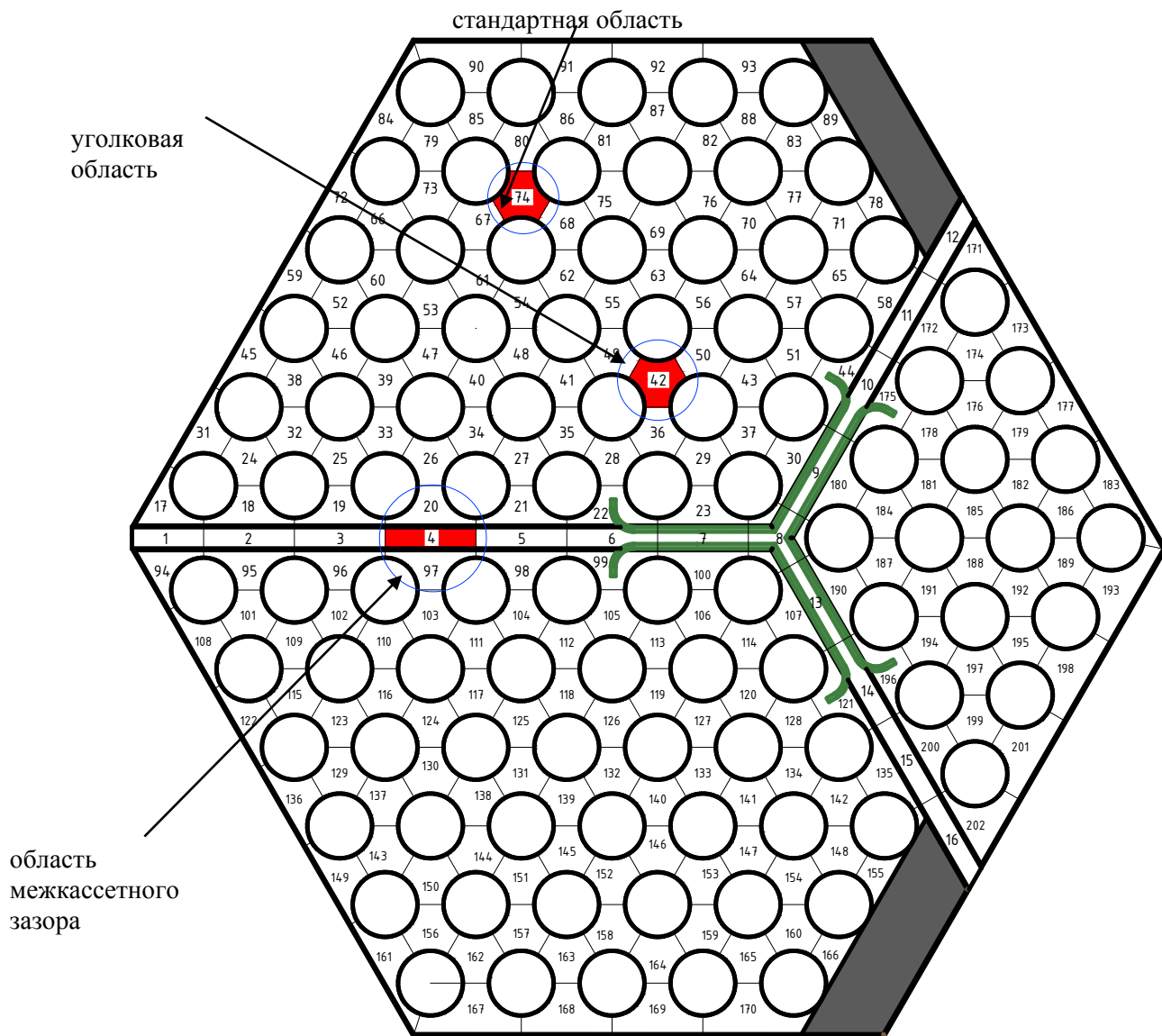


Рисунок 1 – Характерные области экспериментальной модели

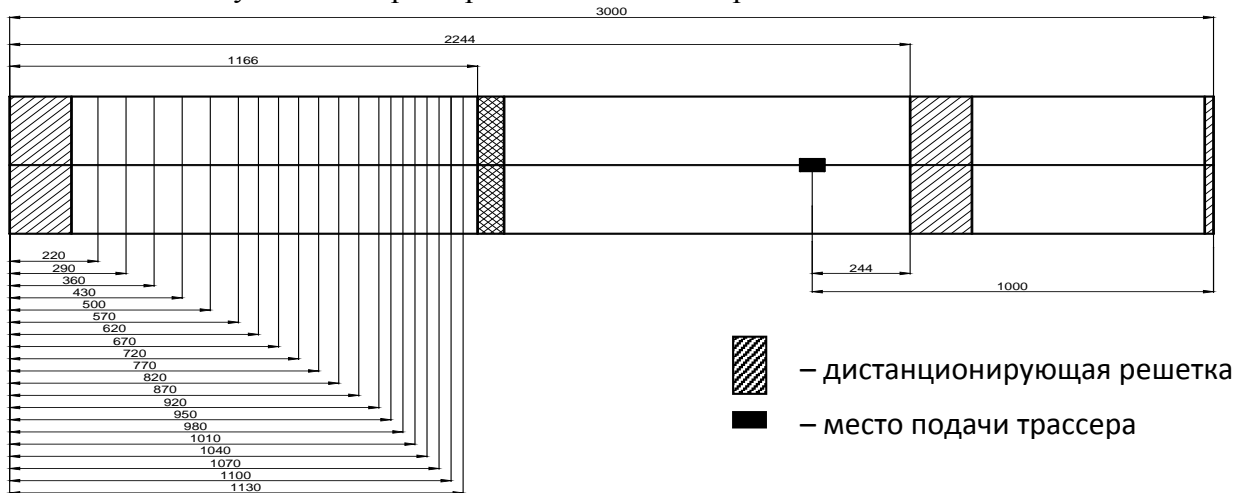


Рисунок 2 – Сечения отбора тросера по длине ЭМ

При исследовании перемешивания потока теплоносителя в ЭМ с ПР необходимо учитывать следующие процессы [3]:

- поперечное перемешивание теплоносителя в пучке твэлов за счет естественной турбулентности потока;
- образование поперечных конвективных течений, интенсивность и направление которых определяются размерами и ориентацией турбулизирующих дефлекторов, установленных на решетках.

Различие вклада этих течений в процесс поперечного переноса массы заключается в том, что через любую элементарную площадку на поверхности некоторого выделенного объема жидкости турбулентный перенос осуществляется как вдоль, так и против направления внешней нормали к элементу поверхности, в то время как конвективный перенос происходит однонаправлено.

Для анализа и последующего применения полученных экспериментальных данных были разработаны математические модели баланса массы трассера, которая позволяет оценить необходимое значение коэффициента межканального обмена, усредненного по длине модели.

Расчет перемешивающих свойств решеток в данном случае включает в себя создание некоторой ожидаемой схемы направлений поперечных течений в модели, исходя из направления турбулизирующих дефлекторов, и определении их некоторой количественной характеристики.

Горизонтальная модель разбивается по длине на определенное количество слоев. Поперечное сечение разбивается на n плоских элементарных ячеек, каждой из которых присваивается свой индивидуальный порядковый номер. Таким образом экспериментальную модель можно представить в виде n объемных элементов, в основании каждого из которых лежит элементарная ячейка. При этом часть боковой поверхности элементов ограничена имитаторами твэлов или стенками экспериментальной модели, а часть – совпадает с боковыми поверхностями соседних ячеек (элементов). Каждый элемент характеризуется определенным набором геометрических параметров: площадью ячейки, находящейся в его основании, площадью его боковых поверхностей, граничащих с соседними элементами. Также каждый элемент характеризуется типом соседних элементов, граничащих с ним.

Объемные элементы можно разделить на три типа по виду ячеек, лежащих в их основании (рисунок 3):

- угловые (в основании лежат угловые ячейки);
- периферийные (в основании лежат периферийные ячейки);
- стандартные (в основании лежат стандартные ячейки).

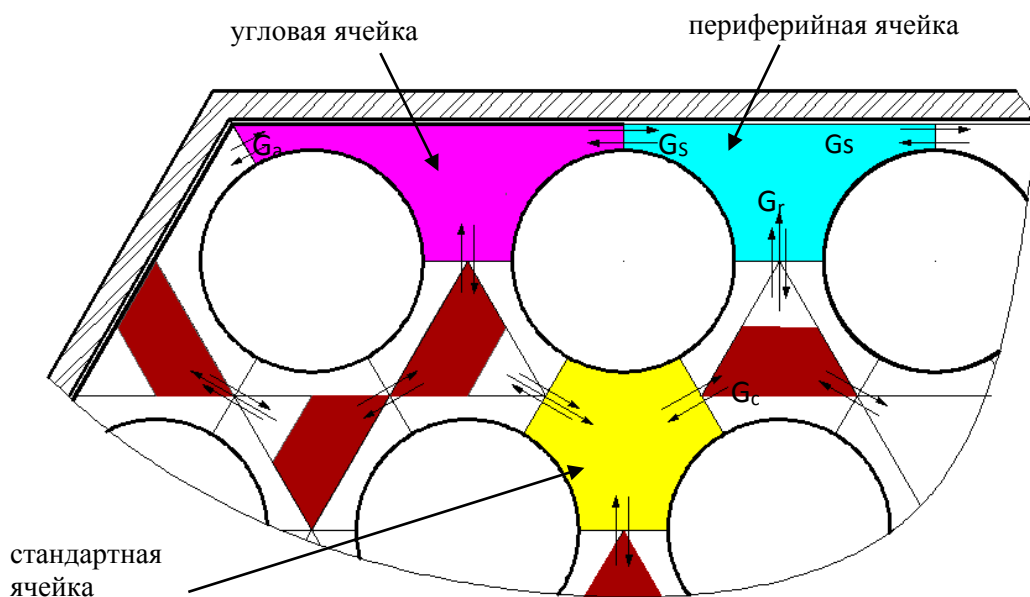


Рисунок 3 – Виды ячеек экспериментальной модели

Для определения поперечного обмена массой вводится коэффициент межканального обмена μ , m^{-1} , который определяется как отношение поперечного потока массы на единицу длины канала к полному осевому потоку теплоносителя [1].

$$\mu = \frac{G_{ij}}{G_i} \quad (1)$$

Предполагая наличие единого коэффициента для всей модели ($\mu = const$ по высоте и сечению канала) выразим значение поперечного потока теплоносителя из одного объемно элемента в другой с учетом нормирования на единицу длины модели:

$$G_{ij} = \mu \cdot G_i \cdot H \quad (2)$$

За μ принимаем величину коэффициента межканального обмена для стандартных элементов.

Для нахождения поперечного потока теплоносителя через другие типы объемных элементов (углового и периферийного), вводим поправочные коэффициенты:

$$G_a = \mu \cdot G \cdot H \cdot \frac{S_a}{S_c}, \quad (3)$$

где S_a – площадь общей боковой грани угловых ячеек

S_c – площадь боковой грани центральных ячеек.

$$G_s = \mu \cdot G \cdot H \cdot \frac{S_s}{S_c}. \quad (4)$$

где S_s – площадь общей боковой грани периферийных ячеек,

Для нахождения расчетных значений распределения концентраций трассера по сечению необходимо знать значения поперечного расхода трассера через боковую поверхность центрального элемента слоя за счет естественной турбулентности потока (G_c) и поперечного расхода, вызванного установкой дефлекторов (G_r). Однако по известному распределению концентраций трассера невозможно однозначно решить задачу определения двух независимых друг от друга параметров G_c и G_r . Но если допустить, что элементы решетки не оказывают влияние на естественную турбулизацию потока, то можно считать, что значение G_c в ЭМ с ПР равно значению поперечного расхода в ЭМ с «гладким пучком» твэлов. Вычисление поперечного расхода массы сводится к нахождению одного параметра – поперечного расхода, вызванного наличием дефлекторов. Возможное различие в величинах естественного турбулентного переноса будет компенсироваться увеличением или изменением значения G_r .

В результате расчета математической модели определяются расчетные значения концентрации трассера в характерных ячейках ЭМ и сопоставляются с экспериментальными данными. На основе полученных данных и вышеописанной методике подбирается оптимальное значение коэффициента перемешивания для ПР ТВС.

Литература

1. Дмитриев С.М. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия – 2012. Т. 113. №5. С. 252–257
2. А.С. Балыбердин, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.В. Львов, Д.Н. Солнцев В.Д. Сорокин. Экспериментальные исследования эффективности перемешивания потока теплоносителя в ТВС реактора ВВЭР при постановке системы перемешивающих решеток.// Будущее технической науки: сборник материалов X Междунар. молодеж. научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, стр. 253, Нижний Новгород, 2011г
3. Пронин А.Н. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя в ТВСА с перемешивающей решеткой типа “порядная прогонка” реактора ВВЭР-300 / А.Л. Буров [и др.] // Труды НГТУ – 2016. №3. С. 46–54