

АРХИПОВ А.П.¹, ВОЛОШИНА И.В.¹,
КОЛОЧКО В.И.², ШАРАЕВСКИЙ Г.И.³

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Министерство топлива и энергетики, НАЭК “Энергоатом”

³Национальный технический университет Украины “КПИ”

РАЗРАБОТКА И ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНТАЛЬПИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ПОТОКОВ МЕЖДУ ЯЧЕЙКАМИ ПУЧКА СТЕРЖНЕЙ

В даній роботі розроблено методику досліджень ентальпії поперечних потоків змішування між різними характерними комірками пучка в діапазоні зміни ентальпії теплоносія від такої, що відповідає течії однофазної рідини, до передкризових режимів тепловіддачі та проведено їх експериментальну перевірку.

В настоящей работе разработана методика исследований энтальпии поперечных потоков смешения между различными характерными ячейками пучка в диапазоне изменения энтальпии теплоносителя от соответствующей течению однофазной жидкости и до предкризисных режимов теплоотдачи и проведена их экспериментальная проверка.

In persisting functioning is designed methods of the enthalpy studies transverse flow of the mixture between different typical cell of the bunch within the range of change enthalpy heat carrier from corresponding to current to single-phase liquid and before precrisis's mode thermo transition and is organized their experimental approbation.

A – изокинетическое состояние;

G – расход жидкости;

i – энтальпия;

W – скорость;

ρ – плотность.

Индексы верхние:

И – изокинетическое состояние;

Н – неизокинетическое состояние.

Индексы нижние:

см – относится к потоку смешения;

ц, 1 – центральная ячейка;

i – номер ячейки.

Методика исследования энтальпии поперечных потоков между ячейками пучка стержней разработана на основе видоизменения известной методики изокинетического отбора проб из ячеек пучка профилированными пробоотборниками с острой входной кромкой. Метод изокинетического отбора проб многократно апробирован и хорошо себя зарекомендовал.

Методика проведения опытов при изокинетическом отборе проб следующая. В отсутствие разделительных перегородок или пробоотборника в контрольном сечении измеряется статический перепад давления в заданном стационарном режиме течения между исследуемой ячейкой и произвольной (желательно наиболее удаленной от неё) частью канала (рис.1). Затем с помощью перегородок либо профилированного пробоотборника поток в исследуемой ячейке отделяется от

основного течения и подаётся в специальный контур обмера проб. Регулируя расход пробы, добиваются равенства перепадов давления, замеченного при естественном разделении потока и установившегося во время отбора жидкости из ячейки. Влияние возмущений, вносимых в поток пробоотборным устройством, оценивают специальными наладочными опытами.

Для отбора проб из элементарных ячеек было решено использовать профилированные пробоотборники с острой входной кромкой. При этом основным новшеством предлагаемой методики проведения экспериментов является то, что в одном опыте при установившихся режимных параметрах проводится исследование потоков во всех характерных ячейках пучка. Такой подход обусловлен стремлением повысить точность получаемых опытных данных. Конструкция рабочих уча-

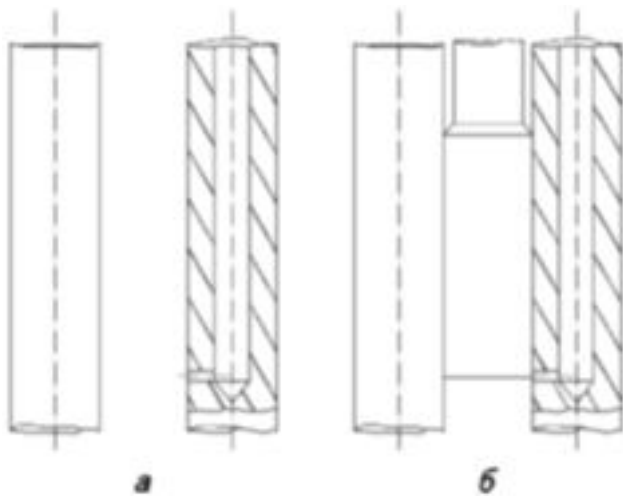


Рис. 1. Схема работы пробоотборной системы:
а – пробоотборник поднят,
б – пробоотборник опущен в рабочее положение.

стков проектировалась с учётом обеспечения возможности поднимать в течение одного опыта все пробоотборники для установления естественного разделения потока и опускать любой из них в рабочее положение для отбора пробы.

Реализация выбранного метода исследования предъявляет ряд конструктивных требований к экспериментальному участку, главные из которых можно сформулировать следующим образом:

1. устройство для разделения потока (пробоотборник) не должно существенно загромождать во время изокINETического отбора пробы сечение канала и оказывать влияние на контрольный отбор давления;

2. проходное сечение профилированной части пробоотборника по форме и геометрическим размерам должно соответствовать элементарной ячейке, а длина её – быть достаточной для того, чтобы в процессе отбора пробы возмущения от перехода в непрофилированную часть не достигли входной кромки;

3. в выведенном положении пробоотборник не должен оказывать влияние на естественное разделение потока.

Весьма важной, исходя из выбранной методики исследования, является задача обеспечения максимальной точности измерения статического давления в опытах, ибо замеренный перепад давления в экспериментах является тем эталоном,

по которому определяется наступление естественного разделения потока. Здесь уместно отметить, что систематические погрешности определения статического давления не сказываются на точности экспериментальных данных, поскольку в момент отбора пробы мы устанавливаем перепад давления между ячейками, идентичный замеренному при поднятых пробоотборниках в том же режиме течения. Абсолютное значение перепада давления при этом в расчёт не принимается.

Метод изокINETических отборов проб из ячеек пучка, хотя и позволяет качественно судить о направлениях и энтальпии поперечных потоков теплоносителя между ячейками, всё же не обеспечивает количественного определения величины энтальпии поперечного потока $i_{см.i}$. В связи с этим опыты по исследованию величины энтальпии поперечных потоков между ячейками проводились в неизокINETическом режиме течения, когда расход среды через исследуемую ячейку устанавливался отличным от такого, который соответствует естественному разделению потока. То есть метод основан на внесении искусственного возмущения в поток, вызывающий неизокINETические перетоки теплоносителя между ячейками, и распространении полученных результатов на соответствующие изокINETические режимы.

Определение локального значения энтальпии поперечного потока из или в ячейку в изокINETическом состоянии (точнее на бесконечно малом от него удалении) основано на соотношении, выведенном в работе [1]:

$$i_{см.i} = \frac{d(G_i i_i)}{dG_i}, \quad (1)$$

где $d(G_i i_i)$ и dG_i – бесконечно малые изменения произведения расхода на энтальпию и расхода теплоносителя в исследованной i -ой ячейке относительно их изокINETических значений. То есть $i_{см.i}$ определяется наклоном касательной, проведенной к кривой на графике $d(G_i i_i) = f(dG_i)$ в точке, которая соответствует изокINETическому состоянию (рис. 3). Выражение (1) приближенно записывается в виде:

$$i_{см.i} = \frac{\Delta(G_i i_i)}{\Delta G_i}. \quad (2)$$

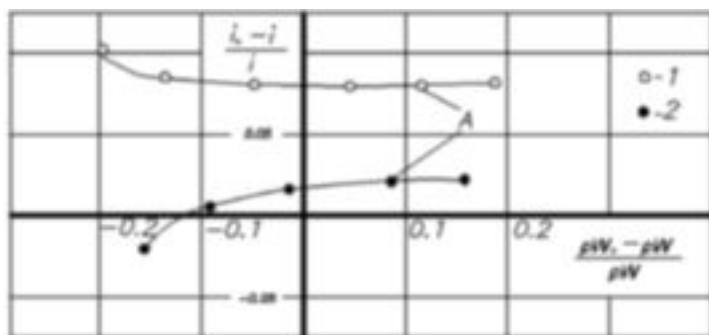


Рис. 2. Зависимость энтальпии от массовой скорости теплоносителя в центральной ячейке.

1 – режим №1, 2 – режим №2.
A – изокинетическое состояние.

Таким образом, энтальпию поперечного потока, строго говоря, можно определить по известным значениям расхода и энтальпии теплоносителя в изокинетическом режиме и в неизокинетическом, когда расход через исследуемую ячейку увеличен или уменьшен на бесконечно малую величину dG_i . В экспериментах, разумеется, не представляется возможным оперировать бесконечно малыми величинами. Анализ погрешностей экспериментов показал, что для получения надёжных опытных данных (ошибка определения энтальпии поперечных потоков до 4...5%) изменение расхода через ячейку должно достигать 10...20%.

Проведение опытов в неизокинетических условиях позволило заключить, что изменение расхода теплоносителя в любой из ячеек на $\pm 10...20\%$ относительно его значения при естественном разделении потока не нарушало практически линейности соотношения (2).

Разброс значений энтальпии поперечного потока при варьировании величины ΔG и прочих равных условиях не превышал 1...5%, что соответствует результатам расчётов ожидаемой погрешности экспериментов. То есть ошибкой определения энтальпии поперечного потока, вызываемой некоторой нелинейностью соотношения (2), в указанных пределах изменения расхода теплоносителя в ячейках можно пренебречь и впредь рассматривать лишь погрешности экспериментов. Типичные графики исследованных в неизокинетических условиях режимов показаны на рис. 2,3. Из этих рисунков видно, что пред-

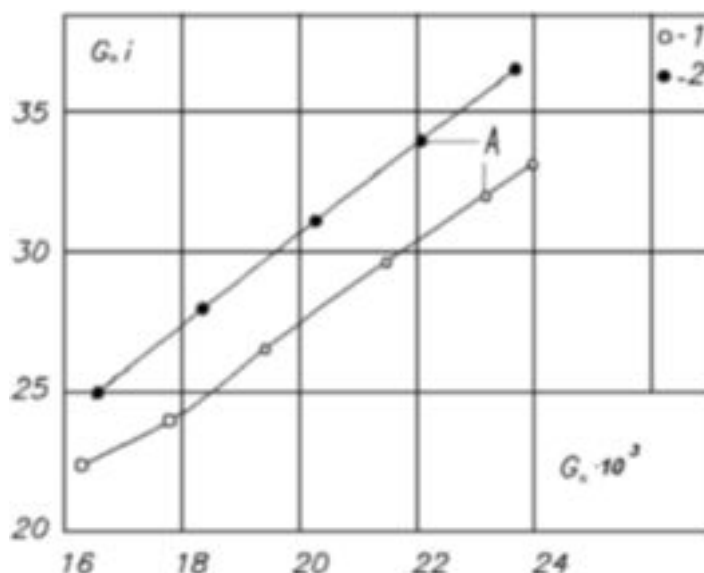


Рис. 3. Графики зависимостей $G_u i_u = f(G_u)$.

1 – режим №1; 2 – режим №2;
A – изокинетическое состояние.

ставленные на них зависимости практически линейны в пределах изменения расхода теплоносителя в ячейке на $\pm 10...20\%$ относительно его изокинетического значения.

Сказанное может служить обоснованием метода определения энтальпии потоков смешения по наклону кривых на графиках зависимости $d(G_i i_i) = f(dG_i)$ и распространения полученных результатов на соответствующие изокинетические режимы.

Порядок проведения опытов по определению $i_{см,i}$ был следующий. Первоначально в рабочем участке при поднятых отборных устройствах устанавливался заданный стационарный режим течения. В контрольном сечении пучка фиксировался изокинетический перепад давления между ячейками. Затем в исследуемую ячейку опускался в рабочее положение отборник. Регулируя расход теплоносителя через него вентилем, добивались восстановления замеченного ранее перепада давления. После выхода течения в калориметрическом холодильнике на стационарный тепловой режим определялись изокинетические параметры потока в ячейке $G_1^И$ и $i_1^И$.

Последний этап опыта проводился в неизокинетических условиях. Расход теплоносителя через ячейку уменьшался с помощью вентиля примерно на 10...20%. Глубина проникновения

возмущений против потока, судя по наладочным опытам, при этом невелика – всего несколько миллиметров. В результате расход $G_1^И$ непосредственно перед отборным устройством разветвляется. Одна часть $G_1 - \Delta G = G_1^Н$ попадает в отборник, а вторая растекается в смежные ячейки. После установления стационарного теплового режима калориметрического холодильника фиксируются неизокинетические значения расхода и энтальпии в ячейке $G_1^Н$ и $i_1^Н$. Величина энтальпии локального поперечного потока ΔG определяется по формуле (2).

Поскольку произвольно взятая ячейка в общем случае граничит не с одним определённым типом ячеек, а с различными характерными ячейками, наиболее целесообразно исследовать не поток в ячейку, а поток из неё (то есть использовать нижнюю часть кривых на графике рис. 3 вблизи изокинетического состояния). Вместе с тем из графика видно, что наклон кривых, а следовательно, и величина энтальпии потоков смешения, вблизи изокинетического состояния практически неизменны при противоположных направлениях поперечного потока в ячейку или из нее. Как указывалось выше, изменение $i_{см,i}$ не превышало при этом 1...5%. Этот, странный на первый взгляд, факт можно объяснить следующим образом. При сравнительно незначительном возмущении течения искусственно вызванный поперечный поток – скажем между центральной и боковой ячейками – “питается” средой, текущей в продольном направлении между стержнями. Энтальпия теплоносителя в межстержневом пространстве остается практически постоянной вне зависимости от того, куда

его направить: из центральной в боковую ячейку или наоборот.

Выводы

Разработанная методика исследования энтальпии поперечных потоков между ячейками пучков стержней была успешно апробирована на теплогидравлическом стенде ИТТФ НАНУ. Её дальнейшее использование позволит качественно усовершенствовать расчётные теплогидравлические программы, предназначенные для усовершенствования существующих и создания новых активных зон ядерных реакторов [2,3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахи Р.Т., Ширалкар Б.С., Радклиф Д.В. Распределение массовой скорости и энтальпии в пучке стержней для однофазного и двухфазного потоков // Тр. Американского общества инж. - механиков. – Серия С. – 1971. – Т.93, №2. – С. 64-78.
2. Шараевский И.Г., Домашев Е.Д., Архипов А.П., Колочко В.Н., Шараевская Е.И. “Методология идентификации теплогидравлических режимов в активной зоне ядерных реакторов” // Труды 10-й международной конференции по ядерным технологиям. – ICONE-10, Арлингтон, Вирджиния, США, апрель 14-18, – 2004, – ICONE – 22386.
3. Шараевский И.Г., Домашев Е.Д., Архипов А.П., Шараевская Е.И. Результаты локальной верификации теплогидравлического кода RELAP-5 // Промтеплотехника. – 2003. – Т.25, №4. – С. 260.