

УДК 536.642

АРХИПОВ А.П.<sup>1</sup>, АВРАМЕНКО А.А.<sup>1</sup>,  
ВЛАСЕНКО Н.И.<sup>2</sup> ВОЛОШИНА И.В.<sup>1</sup>, АРХИПОВА Е.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Научно-технический центр НАЭК „Энергоатом”

<sup>3</sup>Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт”

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ПОТОКОВ МЕЖДУ ЯЧЕЙКАМИ ПУЧКА СТЕРЖНЕЙ

Експериментальні дані по дослідженню ентальпії потоку змішування дозволили проаналізувати та значною мірою пояснити розподіл теплогідравлічних параметрів теплоносія в стрижневій збірці в різних режимах течії двофазного потоку. Показано, що закономірності ізотермічної течії двофазних сумішей не піддаються безумовному переносу на течію газорідних потоків у стрижневих збірках, що обігріваються. Результати досліджень можуть бути використані для перевірки та апробації розрахункових теплогідравлічних програм як існуючих, так і тих що створюються зараз.

Экспериментальные данные по исследованию энтальпии потока смешения позволили проанализировать и в значительной мере объяснить распределение теплогидравлических параметров теплоносителя в стержневой сборке в различных режимах течения двухфазного потока. Показано, что закономерности изотермического течения двухфазных смесей не поддаются безусловному переносу на течение газожидкостных потоков в обогреваемых стержневых сборках. Результаты исследований могут быть использованы для проверки и апробации расчётных теплогидравлических программ как существующих, так и вновь создаваемых.

Experimental data on the study enthalpy of a mixture stream have enabled us to analyze and to explain appreciably the distribution of thermohydraulic heat-carrier parameters in a rod assemblage under various regimes of a two-phasic flow. It is shown, that the laws of an isothermal flow of two-phasic mixtures cannot be transferred to the flow of gas-liquid mixtures in warmed rod assemblages. Results of researches can be used for check-up and verification of thermohydraulic programs both existing, and afresh created.

$i$  – энтальпия;

$P$  – давление;

$q$  – плотность теплового потока;

$W$  – скорость;

$x = \frac{i - i_j}{r}$  – относительная энтальпия;

$\rho$  – плотность;

$\Delta x$  – прирост относительной энтальпии на обогреваемой длине пучка;

**Индексы верхние:**

кр – критический.

**Индексы нижние:**

$d$  – донор;

$n$  – усреднённое по потоку значение;

см – поток смешения;

ц – центральная ячейка;

я – ячейка.

Анализ результатов исследования распределения теплогидравлических параметров теплоносителя в пучке стержней позволил выявить наличие межканальных перетоков практически во всех режимах течения пароводяного потока, обуславливающих тепло- и массообмен между ячейками. Как известно из литературы, уточнение такого важного в теплогидравлических расчётах параметра, как энтальпия поперечных потоков в пучках стержней, может существенно способствовать усовершенствованию расчётных программ. К настоя-

щему времени выполнен целый ряд работ по экспериментальному исследованию энтальпии (расходного паро- и газосодержания) потоков смешения между смежными ячейками. Однако ни в одной из известных нам работ энтальпия потоков смешения не определялась во всём диапазоне изменения энтальпии среды от начала кипения и до кризиса теплоотдачи при кипении. В частности, исследованию не подвергались режимы поверхностного кипения недогретой жидкости и предкризисные режимы течения двухфазной смеси.

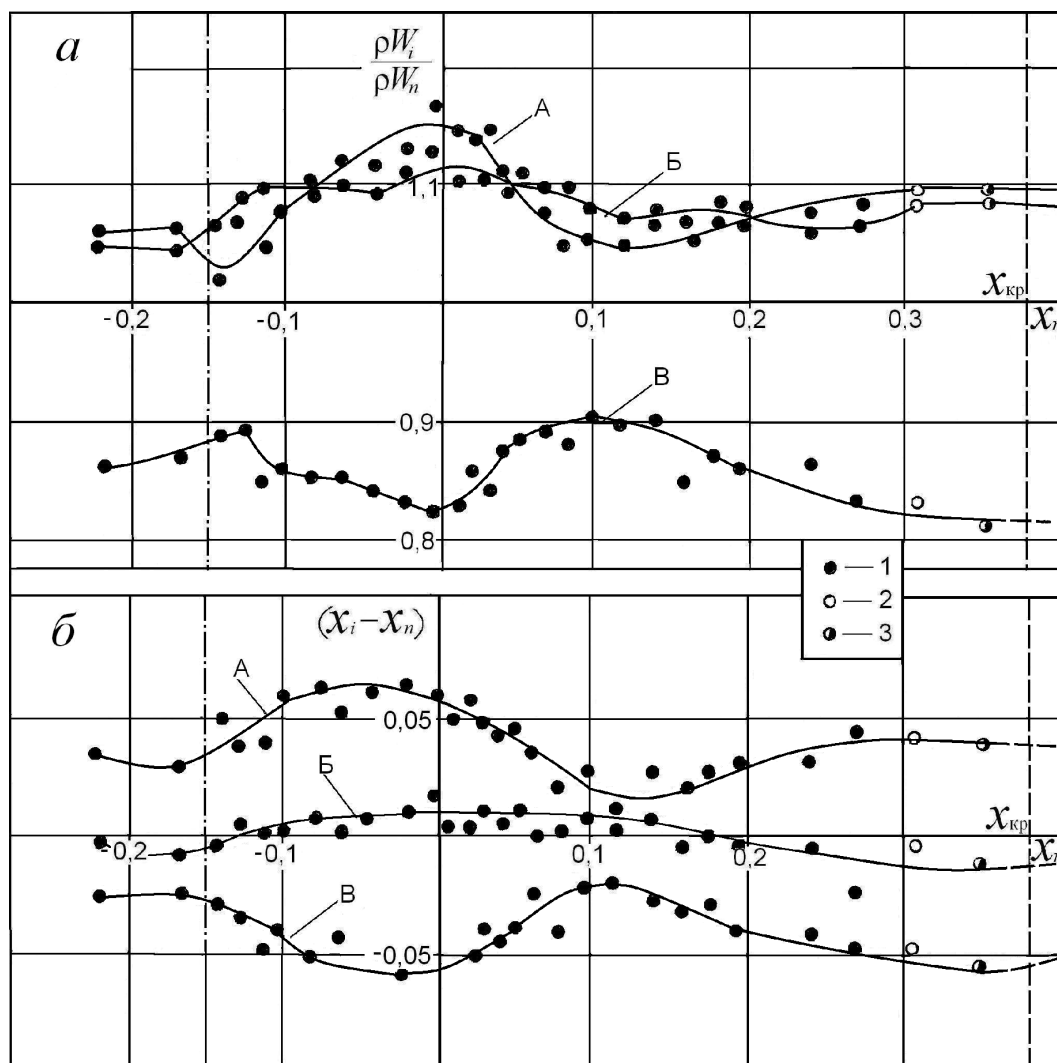


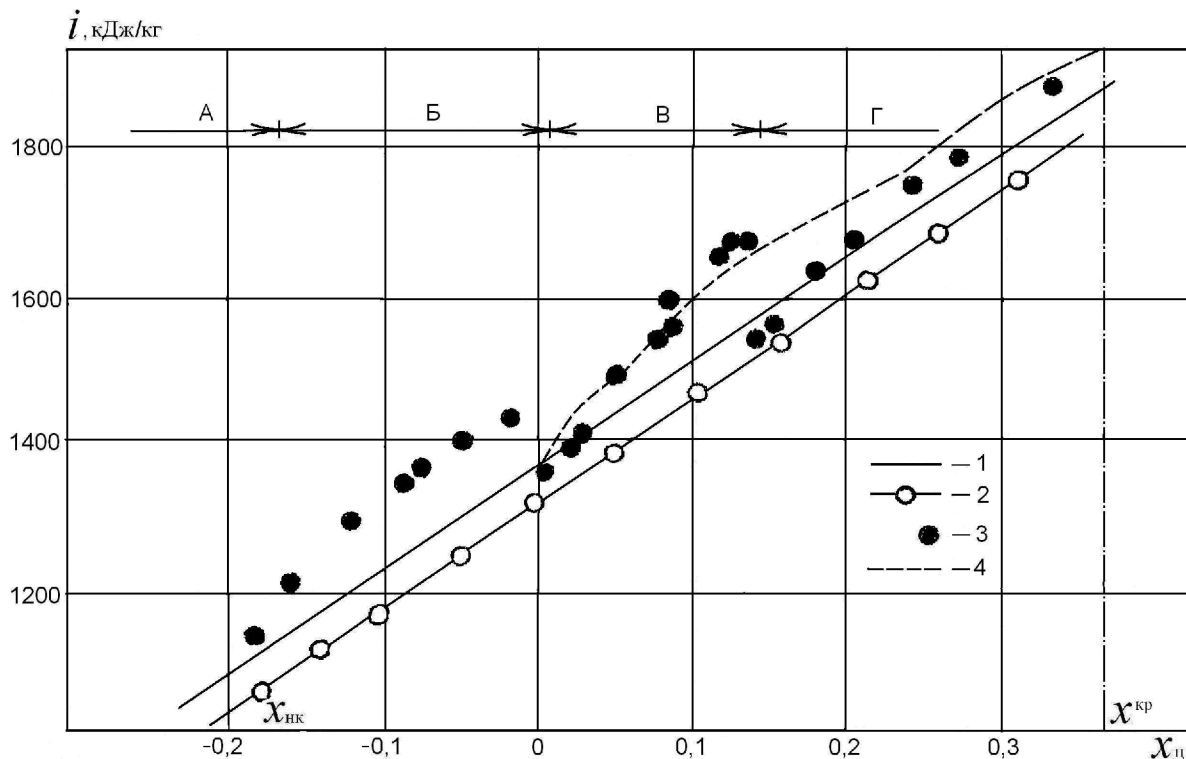
Рис. 1. Изменение относительной массовой скорости (а) и относительной энтальпии (б) теплоносителя в ячейках пучка:  $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $P = 6,0 \text{ МПа}$ ,  $1 - q = 1,5 \text{ МВт/м}^2$ ,  $2 - 1,75$ ,  $3 - 2,0$ . Ячейки: А – центральная, Б – боковая, В – угловая.

Методика проведения 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 рассмотрена в работе [1].

Исследование распределения теплогидравлических параметров пароводяного потока проведено на пучке из семи стержней в треугольной упаковке, размещенном в шестигранном вытеснителе. Диаметр стержней составлял 6 мм, шаг – 8 мм, обогреваемая длина – 1 м. В качестве теплоносителя использовалась химически обессоленная вода.

Диапазон изменения основных режимных параметров: давление  $P = 6,0 \dots 14,0 \text{ МПа}$ ; массовая скорость  $\rho W_n = 300 \dots 2500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ; плотность теплового потока  $q = 0,3 \dots 2,0 \text{ МВт/м}^2$ ; массовое паросодержание на выходе –  $0,9 \dots (0,3 \dots 0,6)$ . Параметры эксперимента варьировались в следующих пределах: массовая скорость  $\rho W_n = 1500 \dots 2500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , давление  $P = 6,0 \dots 14 \text{ МПа}$ , плотность теплового потока  $q = 1,5 \dots 2,0 \text{ МВт/м}^2$ , относительная энтальпия потока в ячейке-доноре  $x_n = -1,0 \dots +0,4$ .

Изменение относительной массовой скорости и относительной энтальпии теплоносителя по ячейкам пучка показано на рис.1, а, б. А изменение энтальпии поперечного потока из ячейки в



**Рис. 2. Изменение энтальпии потока смешения. Центральная ячейка-донор:  $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $P = 6 \text{ МПа}$ ,  $q = 1,5 \text{ МВт/м}^2$ . Энтальпия потока в ячейках: 1 – в центральной, 2 – в боковой. Энтальпия потока смешения: 3 – опытная, 4 – расчётная [8]. Режимы течения: А – однофазный, Б – пузырьковый, В – снарядный, Г – кольцевой.**

зависимости от энтальпии потока в ней показано для типичных режимов на рис. 2 – 5.

Рассмотрим сначала изменение энтальпии поперечного потока из центральной ячейки (рис.1, б). Из графиков видно, что в режиме течения однофазной жидкости энтальпия поперечного потока несколько выше, чем энтальпия теплоносителя в ячейке-доноре. Указанная разница энтальпий для исследованного диапазона режимных параметров составляла 10...20 кДж/кг. Начиная с момента начала кипения и примерно до значений  $x_{ц} \approx 0$ , наблюдается относительный рост энтальпии потока смешения по сравнению с энтальпией среды в ячейке-доноре.

Преобладание паровой фазы в межканальном взаимодействии в этой области по сравнению с паросодержанием теплоносителя в ячейках согласуется с динамикой изменения массовой скорости и энтальпии теплоносителя по ячейкам пучка (см. рис.1, а, б).

При значениях относительной энтальпии потока в центральной ячейке  $x_{ц} \approx 1...3\%$  фиксирова-

лось резкое уменьшение энтальпии до уровня энтальпии теплоносителя в ячейке-доноре и ниже его. Это можно объяснить выбросами жидкости в межстержневые зазоры при переходе течения в центральных ячейках к снарядному (пенисто-снарядному) режиму [2]. Резкое уменьшение энтальпии потока смешения соответствует максимуму неравномерности поля энтальпии в канале и прекращению роста энтальпии потока в центральных ячейках пучка (см. рис. 2 – 4).

В литературе отсутствуют сведения о величине энтальпии (расходного паросодержания) поперечных потоков при течении недогретой жидкости. При малых положительных значениях  $x_d = 0,1...3\%$  такие данные были получены целым рядом авторов [3 – 5]. Результаты этих исследований хорошо согласуются с опытными данными настоящей работы, а именно: при малых положительных значениях  $x_d$  энтальпия или расходное газосодержание потока смешения примерно равны или даже ниже их значений в ячейке-доноре. Указанная закономерность распространя-

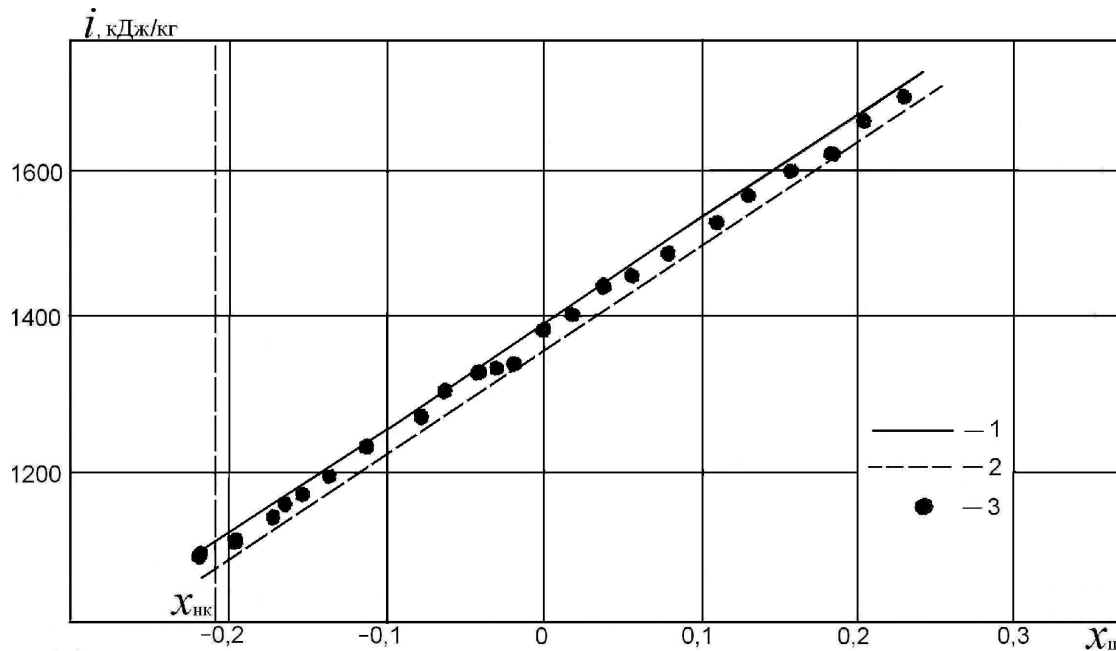


Рис. 3. Изменение энтальпии потока смешения. Угловая ячейка-донор:  $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $P = 6 \text{ МПа}$ ,  $q = 1,5 \text{ МВт/м}^2$ . Энтальпия потока в ячейках: 1 – в боковой, 2 – в угловой, 3 – энтальпия потока смешения.

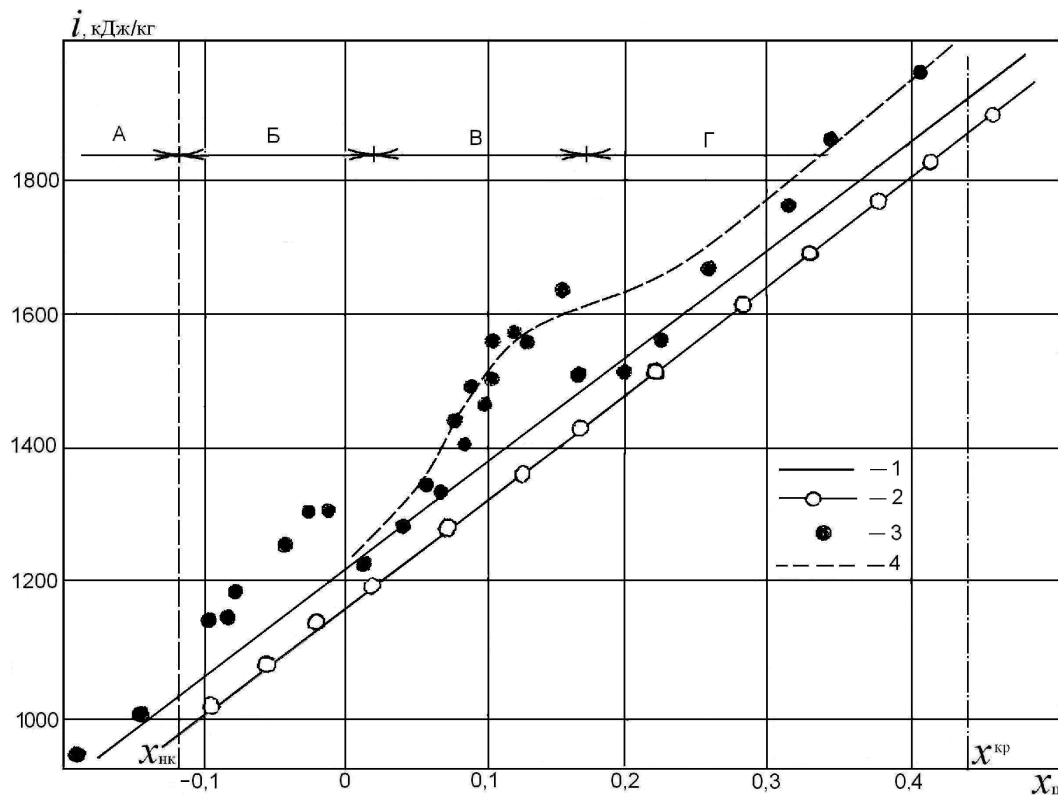
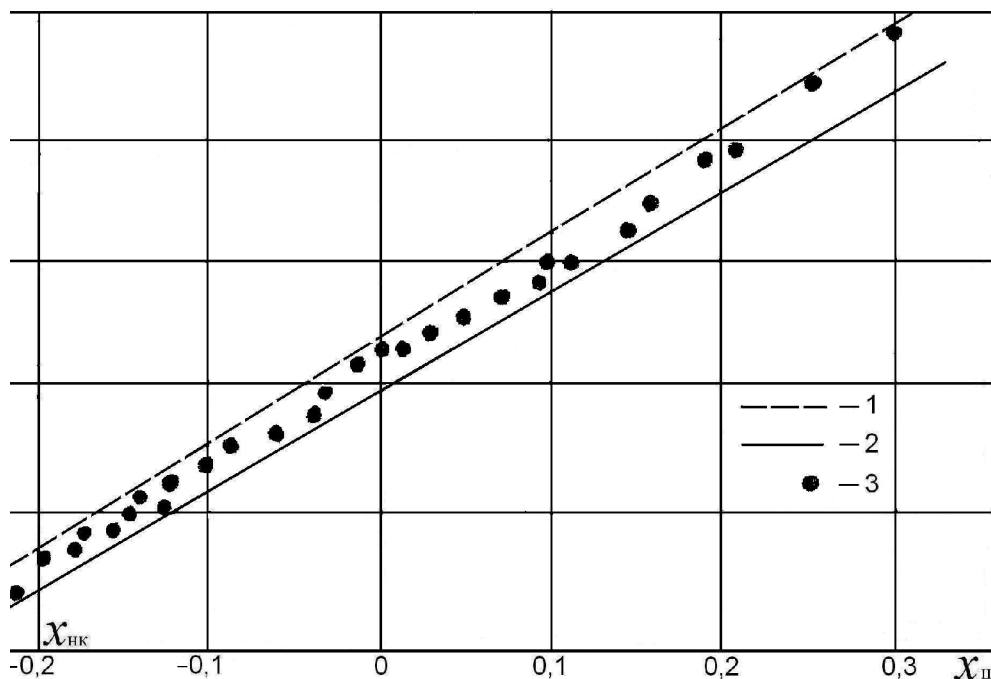


Рис. 4. Изменение энтальпии потока смешения. Центральная ячейка-донор:  $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $P = 9 \text{ МПа}$ ,  $q = 1,5 \text{ МВт/м}^2$ . Энтальпия потока в ячейках: 1 – в центральной, 2 – в боковой. Энтальпия потока смешения: 3 – опытная, 4 – расчётная [8]. Режимы течения: А – однофазный, Б – пузырьковый, В – снарядный, Г – кольцевой.



**Рис.5.** Изменение энтальпии потока смешения. Угловая ячейка-донор:  $\rho W_n = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $P = 9 \text{ МПа}$ ,  $q = 1,5 \text{ МВт/м}^2$ . Энтальпия потока в ячейках: 1 – боковой, 2 – угловой, 3 – энтальпия потока смешения.

ется, судя по данным приведенных работ, на область изотермического течения двухфазных смесей и на широкий диапазон геометрических характеристик каналов.

При дальнейшем росте  $x_{ц}$  энтальпия потока смешения вновь начинает возрастать относительно энтальпии теплоносителя в ячейке-доноре и при  $x_{ц} \approx 3...5\%$  уже превышает последнюю. То есть при небольших положительных значениях  $x_n \approx 1...10\%$  в зазоре между стержнями уже движется среда с относительной энтальпией, превышающей  $x_{ц}$ . Вследствие этого перетечки среды из центральных ячеек в периферийные в рассматриваемом диапазоне  $x_n$  вызывают понижение энтальпии в центре потока (см. рис. 2 – 4).

При паросодержании  $x_{ц} = 10...15\%$  вновь наблюдается резкое снижение  $i_{см}$ . На этот раз оно соответствует переходу от снарядного (пенисто-снарядного) к дисперсно-кольцевому режиму течения [2,6] и наибольшему выравниванию полей массовой скорости и энтальпии в канале. По-видимому, такой переход сопровождается оттеснением жидкости из центральной зоны ячеек к их границам, в том числе и в зазоры между стержнями.

Дальнейшее увеличение  $x_{ц}$  вплоть до кризиса теплоотдачи характеризуется монотонным увеличением энтальпии потока смешения, которая достигает значений энтальпии среды в ячейке-доноре и в дальнейшем превышает её. Рост  $i_{см}$  в последнем случае может быть вызван постепенным уменьшением толщины жидкостной плёнки на обогреваемых стержнях и увеличением соответственно эффективной ширины зазора для обмена пара.

Полученный характер изменения энтальпии потока смешения хорошо согласуется с данными работ [3 – 5], проведенных при неизотермическом течении двухфазных потоков в пучках стержней в квадратной упаковке.

Относительный рост энтальпии потока смешения в области пузырькового и снарядного режимов течения хорошо согласуется с данными авторов [7,8], которые исследовали интенсивность перемешивания пароводяного потока для каждой из фаз в двух смежных ячейках семистержневого пучка в диапазоне режимных параметров: давление  $P = 3...10 \text{ МПа}$ , массовая скорость  $\rho W_n = 1500...4000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , паросодержание  $x_n = 0...1,0$ .



Сопоставление опытных значений энтальпии поперечного потока с результатами расчётов по методике ВТИ [8] показало удовлетворительное согласование опытных и расчётных величин (рис. 2 – 4). Лишь в небольшом диапазоне  $x_d = 0,14...0,18$  в области перехода от снарядного к кольцевому режиму течения различие между опытными и расчётными значениями  $i_{см}$  достигает 5...9%.

Д.С.Роу и С.В.Энгл, которые провели, по-видимому, первое экспериментальное исследование интенсивности межканального взаимодействия при течении 2-х фазного потока [9], сделали вывод, что энтальпия потока смешения равна средней энтальпии потока в смежных подканалах. Это не согласуется с данными настоящей работы. По мнению авторов [10], изменение энтальпии потока смешения Д.С.Роу и С.В.Энгл выявить не могли, поскольку не использовали отдельные индикаторы для воды и пара (в их опытах измерялось либо смешение воды – по концентрациям лития, либо общее смешение воды и пара – по концентрациям дейтерия и трития).

Определение расходного воздуходождения потока смешения между подканалами при изотермическом течении воздуховодяного потока проведено в работах [10,11]. В диапазоне  $0 < x_d \leq 0,2$  % воздуходождение потока смешения аналогично результатам настоящей работы получено ниже воздуходождения потока в ячейках. Авторы [10] объяснили это следующим образом. В режиме пузырькового течения отдельные пузыри текли в центральных частях подканалов. Однако присутствие воздуха интенсифицировало смешение воды, движущейся в области зазора между подканалами. При снарядном течении воздуховодяной смеси  $0,002 < x_d < 0,1$  наблюдалось усиленное перемешивание газа. Объёмное воздуходождение при этом изменялось от 35% до 85%. Такое изменение потока смешения вызвано тем, что вода, протекающая вдоль стенок вытеснителя вдали от зазора между стержнями, частично исключалась из процесса турбулентного смешения. Доля газа в межканальном обмене возрастала.

В дисперсном кольцевом режиме течения ( $0,15 < x_d$ ), согласно данным работ, проведенных в изотермических условиях [10,11], снова преобладало смешение воды в межканальном обмене.

Это может быть следствием частичного закупоривания соединительного зазора между подканалами жидкостной плёнкой, текущей по стенкам, и уменьшения эффективной площади зазора для смешения газа [10].

В настоящем исследовании так же, как и в работах [3–5], выполненных на обогреваемых пучках стержней, в области дисперсно-кольцевого режима течения получен противоположный результат. При дисперсно-кольцевом режиме течения двухфазной смеси паросодержание потока смешения превышает паросодержание среды в ячейке-доноре.

Такое разногласие можно объяснить, предположив, что при кольцевом режиме течения в обогреваемых пучках стержней, в отличие от необогреваемых смежных каналов, уменьшается толщина жидкой плёнки в зазорах между стержнями за счёт её увеличения на необогреваемой обечайке. Жидкость в этом случае частично исключается из межканального обмена, а перемешивание пара осуществляется на большей площади зазоров, менее загромождённых плёнкой.

Таким образом, закономерности изотермического течения двухфазных смесей не поддаются, по-видимому, безусловному переносу на течение парожидкостных потоков в обогреваемых стержневых сборках.

Исследование энтальпии потока смешения для угловой ячейки-донора показало, что, в отличие от опытов для центральной ячейки, значение  $i_{см}$  всегда располагается между значениями энтальпии потоков в смежных – угловой и боковой ячейках (рис. 3,5). По-видимому, определяющим фактором при этом являлось то, что близость необогреваемого вытеснителя и наличие на нём довольно толстой плёнки жидкости неизбежно увеличивали эффективную площадь для обмена жидкости на границе между боковой и угловой ячейками и понижали величину  $i_{см}$ .

## Выводы

Таким образом, данные по исследованию энтальпии потока смешения позволили наиболее полно проанализировать и в значительной мере объяснить распределение теплогидравлических параметров теплоносителя в стержневой сборке в

различных режимах течения двухфазного потока. Результаты исследований могут быть использованы для проверки и апробации расчётных гидродинамических программ как существующих, так и вновь создаваемых.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов А.П., Волошина И.В., Колочко В.Н., Шараевский Г.И.* Разработка и проверка методики исследований энтальпии поперечных потоков между ячейками пучка стержней // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №7. – С.75–78.
2. *Экспериментальное исследование режимов течения пароводяной смеси в трубе при высоких давлениях и весовых скоростях / Отчёт инв. № Б336997, ВТИ, М.: 1973. – 65 с.*
3. *Лахи Р.Т., Ширалкар Б.С., Радклиф Д.В.* Распределение массовой скорости и энтальпии в пучке стержней для однофазного и двухфазного потоков // Тр. амер. о-ва инж. механиков, серия С. – 1971. – Т.93, №2. – С.64–78.
4. *Lahey R.t., Shiraricar B.S., Radcliff D.W., Polomic E.E.* Out-of-pile subchannel measurements in a nine-rod bundle for water at 1000 psia. – Progr. heat and mass. transfer. Proc. int. Symp. two-phase syst. halfa, – 1971. Oxford E.A. – 1972. – P.172–177.
5. *Rscque R., Charlot R.* Determination des distributions de debit massique et d'enthalpie entre les sous-canaux d'une grappe chauffante. –Grenoble.:

Colloque franco-sovietique sur la thermohydraulique des reacteurs a EAU, 1978. – P.1–25.

6. *Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н.* Кольцевые двухфазные течения. М.: Энергия, 1974. – 407с.
7. *Слуцкер В.П., Болонов Е.П., Тарасова Е.П.* Экспериментальное исследование перемешивания при течении однофазного и двухфазного теплоносителя / Семинар ТФ-78. Теплофизические исследования для обеспечения надёжности и безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа. Том 2. Будапешт: 1978. – С.823–836.
8. *Исследование вопросов гидродинамики и теплофизики реакторов и контуров АЭС включая переходные и аварийные режимы. Метод расчёта поперечного перемешивания при течении одно- и двухфазных потоков в стержневых тепловыделяющих сборках / Отчёт 27.610 От. Инв. № 270-027-744, предприятие п/я А-7291, М.: 1980. – 57 с.*
9. *Rowe D.S., Angle C.W.* Experimental study of mixing between rod-bundle fuel-element flow channels during boiling // Trans. Amer. Nucl. Soc. – V.10, №2. – P.655.
10. *Rudzinski K.F. Singh Kuldip, St. Pierre C.C.* Turbulent mixing for aie water flows in simulated rod bundle geometries // Canadian J. chem. eng. – 1972. – V.50, №2. – P.297–299.
11. *Singh Kuldip, St. Pierre C.C.* Two-phase mixing for annular flow in simulated rod bundle geometries // Nucl. Science and Engineering – 1973. – V.50, №4. – P.382–387.

Получено 03.10.2008 г.