

# ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВУХФАЗНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПОТОКОВ. ОБОБЩЕНИЕ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ И ТВС

**Ю.Н. Корниенко**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск*



Полученные в предыдущих работах [1, 2] зависимости для параметров распределений  $C_{ks}$  двухфазных неравновесных потоков обобщены для течений в каналах кольцевой формы и сборках стержней. При этом использованы метод суперпозиции и допущение о справедливости степенных аппроксимаций профилей локальных параметров фаз. Получены предельные формы параметров распределений для симметричных субканалов в ТВС с тесной упаковкой твэлов, а также зависимости для оценки параметров распределений с учетом азимутальных изменений переменных.

## ВВЕДЕНИЕ

Кольцевые каналы, являясь примером более сложной геометрии по сравнению с плоскими щелями и круглыми трубами, представляют интерес как сами по себе (в энергетике это трубки Фильда, кольцевые твэлы и проточные части), так и в качестве идеализированной модели тепловыделяющей сборки (ТВС). Определение теплогидравлических характеристик на основе метода кольцевых каналов является следующим, более содержательным физико-математическим описанием после модели «эквивалентной трубы» [3].

Параметры распределений (ПР) двухфазного потока  $C_{ksn}$ , впервые сформулированные для субканальных методик в [4], были представлены там лишь как необходимый элемент такого подхода без каких-либо конкретных рекомендаций по их функциональным зависимостям или оценкам. Вместе с тем, широкий диапазон изменения ПР, показанный в [1,2] для каналов простой геометрии, и требования совершенствования субканальных методик обуславливают необходимость разработки и анализа ПР для сложной геометрии ячеек ТВС.

Очевидно, что параметры распределений  $C_{ksn}$  в субканальных анализах должны быть связаны с геометрией ячеек и упаковкой твэлов в ТВС. Однако наложение принципиальных трудностей, связанных как с описанием турбулентного течения двухфазной неравновесной среды, так и с процессом интегрирования по сечению канала сложной формы, является причиной отсутствия до сих пор строгих и надежных рекомендаций для  $C_{ksn}$ . Поэтому в большинстве работ эти корреляцион-

ные коэффициенты принимают равными единице, что автоматически означает использование допущения плоских профилей параметров. Те немногочисленные субканальные методики, которые используют ПР (как правило, лишь  $C_0$  [5]), ограничиваются корреляциями, взятыми из работ для каналов простой формы, или эмпирическими зависимостями, полученными из интегральных экспериментов для сборки в целом.

В настоящей работе развивается методология, предложенная в [1, 2, 6-8], и проводится обобщение аналитических зависимостей параметров распределений для течений двухфазных потоков в кольцевых каналах, а также в сборках стержней гексагональной и квадратной упаковки. Как и для каналов простой геометрии [1,2], ПР для каналов сложной формы призваны обеспечить более корректное описание распределенной по рассматриваемому контрольному объему массы, импульса и энергии двухфазного неравновесного потока, что весьма существенно для целей анализа и тестирования субканальных методик. Основная идея предлагаемого подхода заключается в последовательном применении метода суперпозиции для искомых переменных в рассматриваемых фрагментах кольцевых каналов и ячеек (субканалов) в ТВС. Список основных обозначений приведен в [1], остальные представлены по тексту работы.

## 1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛОВ

Представим, что движение в осесимметричном кольцевом (ап) канале происходит по двум кольцевым зонам: внутренней «1» и внешней «2», толщиной  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответственно (см. рис. 1). Заметим здесь, что в более общем случае  $\delta_1 \neq \delta_2$ , т.е. линия раздела зон не проходит на половине ширины кольцевого канала, а определяется на основе рассмотрения гидродинамических или тепловых задач. В частности, в зависимости от граничных условий на стенках это может быть линия экстремума значений вязкого напряжения или плотности теплового потока, или профиля скорости, или температуры.

После элементарных преобразований связь относительных площадей зон с их толщиной принимает вид

$$\tilde{A}_1 = \frac{A_1}{A} = \frac{\tilde{\delta}_1(1 - \tilde{\delta}_1)}{\tilde{\delta}_1(1 - \tilde{\delta}_1) + \tilde{\delta}_2(1 + \tilde{\delta}_2)}, \quad (1a)$$

$$\tilde{A}_2 = \frac{A_2}{A} = \frac{\tilde{\delta}_2(1 + \tilde{\delta}_2)}{\tilde{\delta}_1(1 - \tilde{\delta}_1) + \tilde{\delta}_2(1 + \tilde{\delta}_2)}, \quad (1b)$$

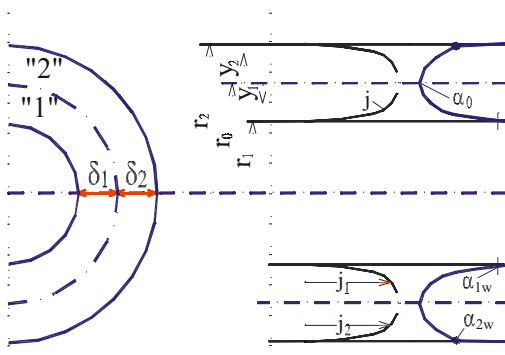


Рис. 1. Геометрические параметры и профили переменных в кольцевом канале

где  $\tilde{\delta}_1 = \delta_1 / 2r_0$  и  $\tilde{\delta}_2 = \delta_2 / 2r_0$ .

Общее выражение для ПР в кольцевых каналах (рис. 1) непосредственно следует из двухзонной модели [2] и для параметра распределения паро(ваго)-содержания имеет вид

$$C_{k0}^{an} = \sum_{a=1}^2 C_{k0a} \langle \tilde{\alpha}_k \rangle_a \langle \tilde{j} \rangle_a \tilde{A}_a, \quad (2)$$

где  $\langle j \rangle_a \equiv \langle j \rangle_a / \langle j \rangle$  и

$\langle \tilde{\alpha}_k \rangle_a \equiv \langle \alpha_k \rangle_a / \langle \alpha_k \rangle$ ; верхний индекс  $an$  означает общий двухзонный для кольце-

вого (annular) канала параметр распределения (в данном случае фазосодержания).

Здесь следует подчеркнуть, что любой из параметров распределений  $C_{ks}^{an}$  двухзонной модели кольцевого канала (1) имеет форму соотношения (2). Нетрудно получить параметры распределений в виде

$$C_{ks}^{an} = C_{ks1} \langle \tilde{\alpha}_k \rangle_1 \tilde{A}_1 \langle \tilde{\varphi}_{ks} \rangle_1 + C_{ks2} \langle \tilde{\alpha}_k \rangle_2 (1 - \tilde{A}_1 \langle \tilde{\varphi}_{ks} \rangle_1), \quad (3)$$

$$C_{ks}^{an} = C_{ks1} \langle \tilde{\alpha}_k \rangle_1 (1 - \tilde{A}_2 \langle \tilde{\varphi}_{ks} \rangle_2) + C_{ks2} \langle \tilde{\alpha}_k \rangle_2 \tilde{A}_2 \langle \tilde{\varphi}_{ks} \rangle_2. \quad (4)$$

В этих соотношениях параметр распределения для кольцевого канала в целом  $C_{ks}^{an}$  связан через параметры распределений по зонам с их относительными площадями, фазосодержаниями и расходами. Предпочтение какой-либо из форм (3) или (4) может диктоваться условиями эксперимента или возможностью принятия дополнительных допущений в анализе.

Параметры распределений (например, для паросодержания) по зонам «1» и «2» кольцевого канала в обозначениях рис. 1 удобней всего представить в виде

$$C_{g0a} = \frac{(1 \mp \tilde{\delta}_a) \int_0^1 \alpha_a j_a (1 \mp 2\tilde{\delta}_a Y_a) dY}{\int_0^1 \alpha_a (1 \mp 2\tilde{\delta}_a Y_a) dY \int_0^1 j_a (1 \mp 2\tilde{\delta}_a Y_a) dY}, \quad (5)$$

где  $Y_a = y_a / \delta_a$  и  $\tilde{\delta}_a = \delta_a / 2r_0$ ; здесь индекс  $a$  означает номер зоны 1 или 2, причем имеет место следующее правило знаков: для зоны 1 знак “-”, для зоны 2 знак “+”.

Используя символическую  $\langle \rangle$  форму записи интегралов (5), имеем

$$\begin{aligned} C_{g0a} &= \frac{(1 \mp \tilde{\delta}_a) (\langle \alpha j \rangle_{a\delta} \mp \tilde{\delta}_a \langle \alpha j \rangle_{ap})}{(\langle \alpha \rangle_{a\delta} \mp \tilde{\delta}_a \langle \alpha \rangle_{ap}) (\langle j \rangle_{a\delta} \mp \tilde{\delta}_a \langle j \rangle_{ap})} = \\ &= \frac{(1 \mp \tilde{\delta}_a) (C_{0a\delta} \langle \alpha \rangle_{a\delta} \langle j \rangle_{a\delta} \mp \tilde{\delta}_a C_{0ap} \langle \alpha \rangle_{ap} \langle j \rangle_{ap})}{(\langle \alpha \rangle_{a\delta} \mp \tilde{\delta}_a \langle \alpha \rangle_{ap}) (\langle j \rangle_{a\delta} \mp \tilde{\delta}_a \langle j \rangle_{ap})}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда для каждой из зон с учетом ее размера  $\delta_1, \delta_2$  и осредненных параметров соотношения (6) можно представить в обобщенном виде для любой зоны “ $a$ ” кольца

$$C_{ksa} = C_{ksa\delta} \frac{(1 \mp \tilde{\delta}_a \left( 1 \mp \tilde{\delta}_a \frac{C_{ksap} \langle \alpha_k \rangle_{ap} \langle \varphi_{ks} \rangle_{ap}}{C_{ksa\delta} \langle \alpha_k \rangle_{a\delta} \langle \varphi_{ks} \rangle_{a\delta}} \right))}{\left( 1 \mp \tilde{\delta}_a \frac{\langle \alpha_k \rangle_{ap}}{\langle \alpha_k \rangle_{a\delta}} \right) \left( 1 \mp \tilde{\delta}_a \frac{\langle \varphi_{ks} \rangle_{ap}}{\langle \varphi_{ks} \rangle_{a\delta}} \right)}. \quad (7)$$

Здесь индексы “ $\delta$ ” и “ $p$ ” означают плоскую щель и круглую трубу соответственно. Обобщенные параметры распределений  $C_{ksa\gamma} = f(m_a, n_a, \gamma, \varphi_{ksaw}, \langle \varphi_s \rangle_{a\gamma})$  для плоских каналов и труб подробно проанализированы и проиллюстрированы в [1]. Заметим только, что в обозначениях переменных кольцевого канала наиболее общая форма выражения параметра распределения, например, для фазосодержания, имеет вид

$$C_{k0a\gamma} = 1 + \frac{\gamma}{m_a + n_a + \gamma} \left( 1 - \frac{\alpha_{kaw}}{\langle \alpha_k \rangle_{a\gamma}} \right), \quad (8)$$

где  $\gamma=1$  – плоская щель;  $\gamma=2$  – круглая труба;  $a$  – индекс зоны.

Таким образом, общий параметр распределения для кольцевого канала  $C_{ks}^{an}$  (2) представлен в виде взвешенной суммы параметров распределений по зонам  $C_{ksa}$  (7), каждый из которых, в свою очередь, является комбинацией элементарных параметров распределений для каналов простой геометрии: плоской щели и круглой трубы, связанных между собой геометрическими размерами, относительными фазосодержаниями и расходами по зонам.

К сожалению, в литературе отсутствуют опытные данные, содержащие замеры всех необходимых локальных профилей переменных по сечениям кольцевых каналов, что затрудняет осуществление опытной проверки принятых допущений и полученных зависимостей.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ ЯЧЕЕК (СУБКАНАЛОВ-<sub>N</sub>) $C_{ksN}$

С точки зрения термогидравлики, сборки тепловыделяющих стержней являются многосвязанными системами индивидуальных ячеек (субканалов), определенных на основе какого-либо способа разбиения поперечного сечения. Чаще всего в качестве границ ячеек принимают линии симметрии, проходящие через центры твэлов. Вследствие симметрии другие способы разбиения ТВС на субканалы могут быть сведены к данному геометрическими преобразованиями. При этом предполагается, что поперечные (трансверсальные, радиальные и азимутальные) потоки субстанций (импульса, тепла и массы) через воображаемые границы между ячейками должны способствовать уменьшению локальных неоднородностей в теплонапряженности и увеличению запаса до кризиса теплообмена.

В субканальной термогидравлике <sup>\*)</sup> кроме традиционных процессов, сопровождающих течения в односвязанных геометриях, выделяют три дополнительных механизма взаимообмена субстанциями [4,7,8] на поверхности раздела между ячейками сборки. К ним относят процессы переноса вследствие турбулентного взаимообмена субстанциями, конвективного вынужденного течения в трансверсальном направлении (за счет разности давлений в разных ячейках) и диффузию легкой паровой фазы в более высокоскоростные области (ячейки) сборки. Именно этими механизмами обусловлен азимутальный перенос субстанций и вызываемые им азимутальные изменения в температуре, паро(газо)содержании и аксиальных переменных, прежде всего, скорости. Указанные механизмы с помощью эмпирических замыкающих соотношений вводятся как источниковые члены в правые части уравнений законов сохранения квазиодномерной субканальной модели. Таким образом, к радиальным распределениям параметров (типичным для осесимметричных односвязанных геометрий – плоской щели и круглой трубы) азимутальные переносы субстанций в ТВС добавляют азимутальные изменения переменных, что, естественно, должно найти свое отражение в соответствующих параметрах распределений для субканалов.

Хотя все процессы переноса субстанций в субканальной геометрии нелинейны, взаимосвязанны и взаимообусловлены, но применение основного допущения о возможности разделения переменных позволяет использовать принцип суперпозиции, иллюстрацией которого являются аналитические соотношения, полученные в предыдущих работах [1,2]. Ниже приведен вывод аналитических соот-

<sup>\*) Замечание.</sup> Влияние дистанционирующих решеток и элементов, описываемое в настоящее время лишь чисто эмпирически, вообще говоря, можно учесть, используя модели источниковых и стоковых функций, отражающие механизмы локального возмущающего воздействия как дополнительные факторы для рассматриваемых эффектов.

ношений для параметров распределений при течении теплоносителя в ТВС с треугольной и квадратной упаковкой твэлов.

Исходным при выводе параметров распределений в поперечном сечении  $A_n$  ячейки- $n$  является основное соотношение в виде

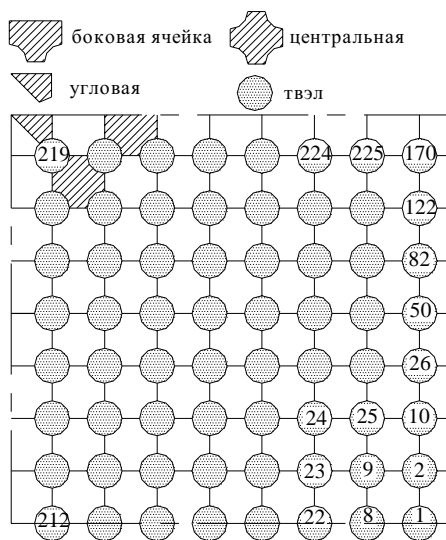
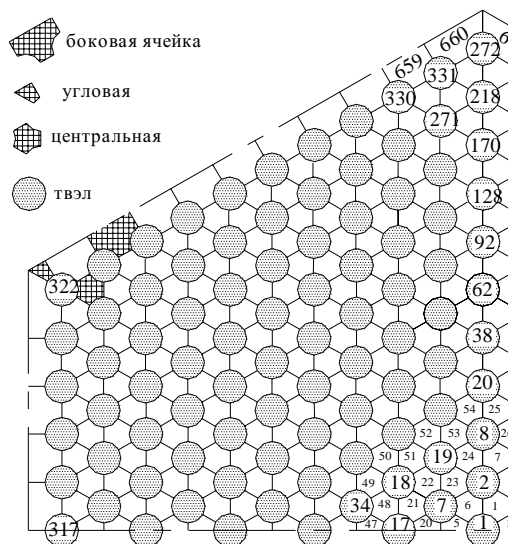
$$C_{ksn} = \frac{\langle \alpha_k \phi_{ks} \rangle_n}{\langle \alpha_k \rangle_n \cdot \langle \phi_{ks} \rangle_n} = \frac{A_n \int_{A_n} \alpha_k \phi_{ks} dA}{\int_{A_n} \alpha_k dA \cdot \int_{A_n} \phi_{ks} dA}. \quad (9)$$

Заметим здесь, что для выделения локальных задач с осреднением по малому углу  $\Delta$  (в том числе и для субканала) в обозначениях интегральных осреднений мы используем символ криволинейных скобок  $\langle \rangle$  (или  $\wedge$ ) в отличие от глобальных осреднений по периоду симметрии или по всей окружности твэла  $\langle \rangle$ .

С точки зрения упрощения математических описаний и получения аналитических решений множество ячеек в ТВС и геометрическая симметрия являются мощными средствами упрощения исходных моделей субканалов, обеспечивающими преемственность со свойствами «элементарных» ПР [1], а также строгость и последовательность при выводе и анализе замыкающих аналитических соотношений для параметров распределений.

## 2.1. Параметры распределений для ТВС с симметричными (однородными) ячейками

Огромное число ячеек в современных ТВС (см. рис. 2а, б) «обезличивает» и «симметризует» каждую из них, позволяя сделать допущение о том, что геометрическая симметрия отдельной ячейки и ее пространственная повторяемость (регулярность) приводят к симметрии и азимутальной периодичности граничных условий и распределений искомых переменных в поле течения. Однородность, точнее одинаковость пространственного характера структуры потока позволяет ввести понятия симметричных, «бесконечно» повторяющихся однородных ячеек. Это не различимые (в идеале) между собой ячейки (в количестве  $n_c$ ) центральной зоны ТВС с большим числом твэлов. Ясно, что параметры распределений  $C_{ksn}^\infty$  для них одинаковы.



И если их общее количество велико по сравнению с ячейками другого рода, например периферийными, то общий параметр распределения  $^{(T)}$  для сборки ТВС (при  $n_c \rightarrow \infty$ ) станет

$$C_{ks}^T = C_{ksn}^\infty, \quad (10)$$

т.е. для однородной сборки общие для нее параметры распределения равны ПР симметричной ячейки. Очевидно также, что если имеются субканалы двух типов, например, центральные (симметричные) и периферийные (несимметричные), то суммарные параметры распределений такой ТВС и их компоненты можно представить в виде полученных ранее соотношений двухзонной модели (2) – (4). Количественную меру такой однородности, или границу разбиения ячеек на зоны, в качестве первого приближения можно связать с эмпирическим инженерным 5-процентным критерием как количественной границей между параметрами распределений для разнородных ячеек, например, центральных и периферийных или иных.

Простейший способ описания собственно параметров  $C_{ksn}^\infty$  распределений бесконечной, регулярной, однородной ячейки можно представить также в виде двухзонной модели (рис. 3б и 3в), состоящей из пристенных  $A_1$  кольцевых слоев и центральной  $A_2$  зоны сложной формы в виде регулярных криволинейных треугольников или квадратов. Параметры распределений такой двухзонной модели могут быть описаны на основе приведенного выше подхода для кольцевых каналов. При этом в качестве рекомендаций для пристенной зоны вполне приемлемы соотношения, полученные для первой зоны кольцевого канала. Вторая, центральная зона симметричной ячейки в ТВС хотя и обладает сложной геометрической формой, но изменения переменных в ней весьма незначительны, и с приемлемой для наших целей точностью профили переменных в ней можно считать неизменными. Косвенным подтверждением этого являются прецизионные экспериментальные профили скорости, измеренные в однофазных опытах [9], а также расчетные профили, полученные с помощью многомерных расчетных программ [10] (см. рис. 3а). Прямых измерений необходимых локальных переменных для двухфазных потоков в сборках стержней, прежде всего, из-за отсутствия микродатчиков достаточной чувствительности и трудностей, связанных со сложностью геометрии сборок ТВС, в настоящее время в литературе не имеется.

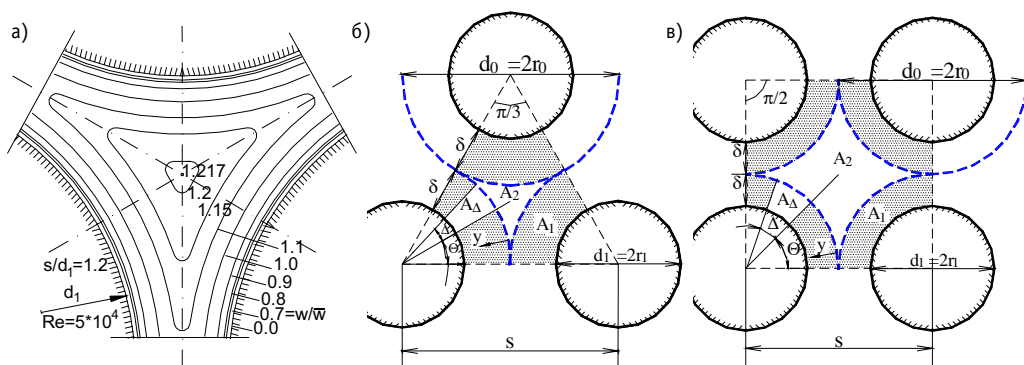


Рис. 3. Параметры и топография ячеек: а) - изотехи [10]; геометрия симметричных ячеек: б) - треугольной ( $n=3$ ) и в) - квадратной ( $n=4$ ) упаковок твэлов для двухзонной модели, со следующими

геометрическими характеристиками:  $\tilde{A}_1 = \frac{\tilde{\delta}(2-\tilde{\delta})}{E_n \tilde{s}^2 - (1-\tilde{\delta})^2}$ ;  $\tilde{\delta} = \frac{d_0 - d_1}{2d_0}$ ;

$E_n = \begin{cases} (2\sqrt{3}-\pi)/4\pi, & n=3 \dots; \\ (4-\pi)/4\pi, & n=4 \dots; \end{cases}$ ;  $\tilde{A}_2 = 1 - \tilde{A}_1$ , здесь  $d_0$  совпадает с шагом решетки  $s$

Итак, двухзонное (пристенная и центральная зоны) представление параметров распределений симметричной ячейки (см. рис. 3б и 3в) на основе соотношений (3) (4) примет вид

$$C_{k0n}^{\infty} = C_{k01}^{\wedge} \prec \tilde{\alpha}_k \succ_1 \tilde{A}_1 \prec \tilde{j} \succ_1 + C_{k02}^{\wedge} \prec \tilde{\alpha}_k \succ_2 (1 - \tilde{A}_1 \prec \tilde{j} \succ_1) \quad (11)$$

или

$$C_{k0n}^{\infty} = C_{k01}^{\wedge} \prec \tilde{\alpha}_k \succ_1 (1 - \tilde{A}_2 \prec \tilde{j} \succ_2) + C_{k02}^{\wedge} \prec \tilde{\alpha}_k \succ_2 \tilde{A}_2 \prec \tilde{j} \succ_2 \quad (12)$$

с геометрическими характеристиками ячеек, приведенными в подписи к рис. 3.

Конкретизация пределов интегрирования определяется условиями рассматриваемой задачи. Следует иметь в виду, что в уравнениях (11) и (12) еще не указаны пределы интегрирования по азимутальной переменной, поэтому они остаются справедливыми для любых пределов: как для осреднения по локальному углу  $\Delta$  или по соответствующему периоду для треугольной - с углом  $(\pi/6)$ , или квадратной -  $(\pi/4)$  упаковки, так и по всему периметру окружности твэла. Необходимые локальные аппроксимации переменных, например, степенного вида для радиального направления, принимаются подобно [2]. При этом возможна дальнейшая детализация характеристик рассматриваемой ячейки, в частности в пристенных зонах, принадлежащих к конкретному стержню ТВС.

Общий вид параметра распределения, например, газосодержания  $g$ , для пристенной кольцевой зоны на основании определения (9) (в обозначениях рис. 3 для сборок твэлов треугольной и квадратной упаковки) удобнее всего представить как

$$C_{g01}^{\wedge} = \frac{\Delta \cdot (1 - \tilde{\delta}) \cdot \int_{\theta}^{\theta+\Delta} \int_0^1 \alpha_1 j_1 (1 - 2\tilde{\delta} Y_1) dY d\theta}{\int_{\theta}^{\theta+\Delta} \int_0^1 \alpha_1 (1 - 2\tilde{\delta} Y_1) dY d\theta \int_{\theta}^{\theta+\Delta} \int_0^1 j_1 (1 - 2\tilde{\delta} Y_1) dY d\theta}, \quad (13)$$

где  $Y_1 = y_1/\delta$ . Для переменных в пристенной зоне используем индекс  $(1)$ . Изменения параметров потока в центральной зоне можно в большинстве случаев считать незначительными, а значит, параметры распределений для нее весьма близки к единице, и поэтому основной вклад внесет пристенная зона. Описание параметров распределений для нее дается соотношениями типа (7), записанными для рассматриваемого кольцевого сектора:

$$C_{ks1}^{\wedge} = C_{ks1\delta}^{\wedge} \frac{(1 - \tilde{\delta}) \left( 1 - \tilde{\delta} \frac{C_{ks1p}^{\wedge} \prec \alpha_k \succ_{1p} \prec \Phi_{ks} \succ_{1p}}{C_{ks1\delta}^{\wedge} \prec \alpha_k \succ_{1\delta} \prec \Phi_{ks} \succ_{1\delta}} \right)}{\left( 1 - \tilde{\delta} \frac{\prec \alpha_k \succ_{1p}}{\prec \alpha_k \succ_{1\delta}} \right) \left( 1 - \tilde{\delta} \frac{\prec \Phi_{ks} \succ_{1p}}{\prec \Phi_{ks} \succ_{1\delta}} \right)}, \quad (14)$$

где в общем виде «элементарный» параметр распределения для кольцевого сектора зоны "1" записывается подобно (8) и для фазосодержания первой зоны имеет вид

$$C_{k01\gamma}^{\wedge} = 1 + \frac{\gamma}{m_1 + n_1 + \gamma} \left( 1 - \frac{\Delta \cdot \alpha_{k1w}^{\wedge}}{\prec \alpha_k \succ_{1\gamma}} \right). \quad (15)$$

Соотношения (14) и (15) определяют наиболее общую форму параметра распределения фазосодержания для рассматриваемого сектора пристенной зоны ячейки (субканала) через его компоненты по 1-ой зоне.

Таким образом, общий параметр распределения для симметричной однородной ячейки, использующий представления кольцевого  $C_{ks}^{an}(2)$  или сложного (моделирующего сборку твэлов) канала по соотношениям  $C_{ksn}^{\infty}(11)$  и (12), представлен в виде комбинации элементарных параметров распределений для каналов простой геометрии (плоской щели  $(\delta)$  и круглой трубы  $(p) - C_{ksn1\gamma}^{\infty}$ ), связанных между собой геометрическими характеристиками, относительными фазосодержаниями и расходами по зонам ячейки (субканала).

## 2.2. Предельные формы параметров распределений для ТВС с симметричными ячейками

Без учета изменения переменных и граничных условий в азимутальном направлении предельные формы параметров распределений для однородной ячейки сборки ТВС по модели кольцевых каналов (7) при условиях  $m_1 \gg 1$ ,  $n_1 \gg 1$ ,  $\tilde{\delta} \ll 1$  принимают вид

$C_{ks1}^{\wedge} \equiv C_{ks1\delta}^{\wedge}(1-\tilde{\delta})(1-\tilde{\delta}\tilde{C}_{ks1}^{\wedge})(1+\tilde{\delta}\alpha_{p\delta}^{\wedge})(1+\tilde{\delta}\varphi_{p\delta}^{\wedge}) \approx C_{ks1\delta}^{\wedge}(1-\tilde{\delta}^2)^{\gamma} \approx C_{ks1\delta}^{\wedge}(1-4\tilde{\delta})$ , (16)  
где символ  $\wedge$  означает осредненные для рассматриваемого азимутального угла переменные.

Это указывает на возможность моделирования характеристик однородной ячейки сборки ТВС на основе плоской щели при условиях справедливости принятых допущений, т.е. при средних и высоких массовых скоростях теплоносителя. Используя соотношения (11)-(12) при допущениях  $m_1 \gg 1$ ,  $n_1 \gg 1$  и  $\tilde{\delta} \ll 1$ , получим следующую оценку:

$$C_{ksn}^{\wedge} = C_{ks1\delta}^{\wedge}(1-4\tilde{\delta}) \left( \frac{\tilde{\delta}}{E_n + \tilde{\delta}} \right)^2 < \tilde{\alpha}_k >_1 + < \tilde{\alpha}_k >_2 \left( \frac{E_n}{E_n + \tilde{\delta}} \right)^2. \quad (17)$$

Это при  $\tilde{\delta} \gg E_n$  и  $< \tilde{\alpha}_k >_1 \rightarrow 1$  приводит к заключению, что  $C_{ksn}^{\wedge} = C_{ks1\delta}^{\wedge}$ , т.е. при относительно тесных шагах решетки твэлов параметры распределений такихборок близки к параметрам распределений щелевых каналов.

Рассмотрим крайние случаи по распределениям паросодержаний. Если в центральной зоне ячейки паросодержание отсутствует, например, при кипении с недогревом, то

$$C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks1\delta}^{\wedge}(1-4\tilde{\delta}) < \tilde{\alpha}_k >_1 \left( \frac{\tilde{\delta}}{E_n + \tilde{\delta}} \right)^2. \quad (18)$$

И, наоборот, если в пристенной зоне паросодержание ничтожно мало, например, в кольцевом режиме течения, то

$$C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks2\delta}^{\wedge} < \tilde{\alpha}_k >_2 \left( \frac{E_n}{E_n + \tilde{\delta}} \right)^2. \quad (19)$$

В последних двух случаях (18) и (19) параметры распределений сборки во многом зависят от геометрических соотношений между зонами 1 и 2, т.е. от шага решетки, тогда для решеток при  $\tilde{\delta} \gg E_n$  имеем

$$C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks1\delta}^{\wedge}(1-4\tilde{\delta}) < \tilde{\alpha}_k >_1 \approx C_{ks1\delta}^{\wedge}, \quad (20)$$

а для решеток при  $\tilde{\delta} \ll E_n$  получим, что  $C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks2\delta}^{\wedge} < \tilde{\alpha}_k >_2 \approx C_{ks2\delta}^{\wedge}$ .

Таким образом, эти соотношения демонстрируют преобладание той или иной зоны в зависимости от геометрии и условий течения в ячейке и доказывают при-



нимавшееся ранее без обоснований допущение о возможности описания термогидравлики в сборке твэлов тесной упаковки моделью плоской щели.

### 2.3. Влияние несимметричности на параметры распределений (боковая и угловая ячейки)

При получении аналитических решений для параметров распределений в задачах субканального анализа, даже оставаясь в рамках двухзонной модели, возможно принятие различного уровня приближений относительно влияния азимутальных неоднородностей.

1. В ТВС правильной геометрии с большим («бесконечным») числом твэлов, азимутальные эффекты можно считать либо незначительными, либо умеренно периодическими по азимутальной координате без заметного влияния притока субстанций через боковую грань (поверхность) ячеек.

2. В ТВС с неоднородной геометрией ячеек (в том числе периферийных), а также с малым числом твэлов необходимо учитывать азимутальное влияние переносимых субстанций. При этом для целей анализа можно выделить две крайних модели:

а) азимутальные изменения большой амплитуды (например, теплового потока) внутри ячейки с малыми эффектами взаимообмена между смежными ячейками и, наоборот,

б) преобладание эффектов переноса на боковых гранях ячеек (моделируемых соответствующими членами правых частей уравнений законов сохранения массы, импульса и тепла) при незначительных периодических азимутальных зависимостях внутри субканала.

3. Общий случай соизмеримых эффектов 2а) и 2б), т.е. наложение азимутальных процессов внутри ячейки и поперечных перетоков через боковые грани характерен в частности для двухъячейковой геометрии. Исследование и оценка моделей переноса в двух смежных ячейках представляется важным с точки зрения разработки как методик экспериментальных измерений локальных параметров, так и аналитических и численных моделей, что требует отдельной работы.

Для периферийных ячеек ТВС, изображенных на рис. 4, в первом приближении можно также использовать примененное выше двухзонное описание

$$C_{ksnb} = C_{ks1b} \prec \tilde{\alpha}_k \succ_{1b} \tilde{A}_{1b} \prec \tilde{\varphi}_{ks} \succ_{1b} + C_{ks2b} \prec \tilde{\alpha}_k \succ_{2b} \tilde{A}_{2b} \prec \tilde{\varphi}_{ks} \succ_{2b}, \quad (21)$$

где индекс  $b$  принимает значения  $\ell$  и  $c$  для боковой и угловой ячеек соответственно.

При этом геометрические характеристики этих периферийных ячеек в двухзонном представлении описываются соотношениями, приведенными в подписи к рис. 4.

Ясно, что в зависимости от конструкций ТВС возможны различные сочетания между шагом решетки  $s=d_0$  и расстоянием до стенки  $b$ , поэтому рассмотрение предельных форм таких соотношений, по крайней мере, в четыре раза превысит их количество по сравнению с симметричными ячейками и, при необходимости, может быть сделано отдельно.

При оценке влияния несимметричности азимутальных эффектов на параметры распределений основной вклад, естественно, принадлежит пристенной (первой) зоне ячейки как для ее центрального, так и бокового или углового расположения в ТВС. На рис. 5 изображено возможное поведение профилей переменных в пристенной зоне.

В рассматриваемых приложениях азимутальные распределения переменных и граничных условий в пристенной зоне имеют периодический характер. Исполь-

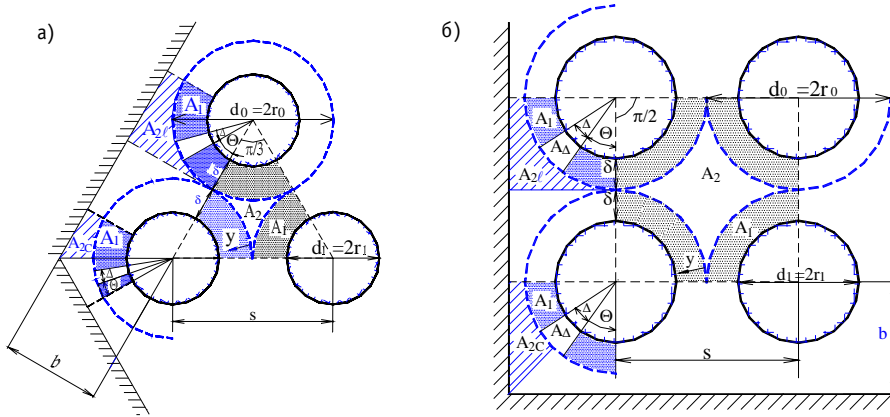


Рис. 4. Геометрические параметры поперечных сечений боковой ( $\ell$ ) и угловой ( $c$ ) ячеек: а) - треугольной ( $n=3$ ) и б) - квадратной ( $n=4$ ) упаковок твэлов для двухзонной модели, со

следующими геометрическими характеристиками боковой и угловой ячеек:  $\tilde{A}_{1\ell} = \frac{4\tilde{\delta}(1-\tilde{\delta})}{E_{n\ell}\tilde{b} - (1-2\tilde{\delta})^2}$ ;

$$\tilde{A}_{2\ell} = 1 - \tilde{A}_{1\ell}; \quad \tilde{\delta} = \frac{d_0 - d_1}{2d_0}; \quad E_{n\ell} = 8/\pi; \quad \tilde{A}_{1c} = \frac{4\tilde{\delta}(1-\tilde{\delta})}{E_{nc}\tilde{b}^2 - (1-2\tilde{\delta})^2}; \quad \tilde{A}_{2c} = 1 - \tilde{A}_{1c};$$

$$\tilde{b} = \frac{b}{d_0}; \quad E_{nc} = \begin{cases} 24/(\sqrt{3}\pi), & n=3 \\ 16/\pi, & n=4 \end{cases}$$

зуя аппроксимационные зависимости степенного вида [2], можно записать

$$\alpha = \alpha_w^{\wedge} f_{\alpha w}(\theta) - (1 - R^n) (\alpha_w^{\wedge} f_{\alpha w}(\theta) - \alpha_c^{\wedge} f_{\alpha c}(\theta)), \quad (22)$$

$$h = h_w^{\wedge} f_{hw}(\theta) - (1 - R^{\ell}) (h_w^{\wedge} f_{hw}(\theta) - h_c^{\wedge} f_{hc}(\theta)), \quad (23)$$

$$j = (1 - R^m) j_c^{\wedge} f_{jc}(\theta), \quad (24)$$

где  $0 \leq R \leq 1$ , здесь  $R = y/\delta$ . Знаком  $\wedge$  обозначен некий средний уровень отсчета для азимутального изменения для любой из рассматриваемых функций  $f_{\varphi w}(\theta)$  или  $f_{\varphi c}(\theta)$ . По-прежнему, индекс  $\varphi \equiv (\alpha, \text{ или } h, \text{ или } j)$  означает субстанцию.

Представление переменных в виде (22)-(24) означает принятие допущения о разделении переменных по радиальной и азимутальной координатам.

В общем случае функции  $f_{\varphi w}(\theta)$  и  $f_{\varphi c}(\theta)$  могут быть сдвинуты относительно друг друга, что приведет к неэквидистантному изменению переменной по азимуту, что можно интерпретировать как процесс азимутального переноса субстанции. Однако в первом приближении ими можно пренебречь и считать  $f_{\varphi w}(\theta) = f_{\varphi c}(\theta) = f_{\varphi}(\theta)$ .

Поскольку азимутальные изменения на границах зон для сборок ТВС являются сложными периодическими функциями, то аппроксимация их на основе рядов Фурье [11, 12] представляется наиболее целесообразной. Если при этом для определенности принять, что экстремальные значения скорости (плотности объемного потока), температур и паросодержаний соответствуют линиям (граням), разделяющим смежные ячейки, то, учитывая четность аппроксимируемых функций, можно использовать для рассматриваемой переменной простое косинусоидальное разложение с соответствующей амплитудой, периодом и фазой и методы гармонического анализа [12] для ее наилучшего приближения, т.е.

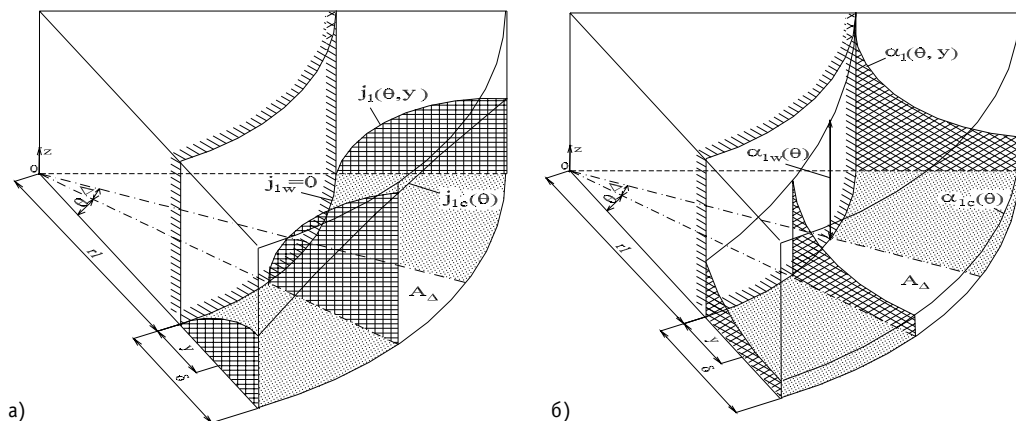


Рис. 5. Иллюстрации азимутальных распределений локальных профилей плотности объемного потока (а) и паросодержания (б), а также граничных условий для пристенной зоны несимметричной ячейки

$$f_{\varphi}(\theta) = 1 + \sum_{i=i_0}^{i_1} a_{i\varphi} \cos(i\theta_{\varphi}), \quad (25)$$

и если аппроксимируемая рядом Фурье функция имеет период  $2\eta$ , то на интервале  $(-\eta, \eta)$  коэффициенты вычисляются как

$$a_{i\varphi} = \frac{1}{\eta} \int_{-\eta}^{\eta} f_{\varphi}(\theta) \cos \frac{i\pi\theta_{\varphi}}{\eta} d\theta \quad (i=0, 1, 2, \dots). \quad (26)$$

Основными гармониками являются  $i_0=6$  - для треугольной и  $i_0=4$  - для квадратной решеток, а  $i_0=1$  - для эксцентрических кольцевых каналов и периферийных твэлов. Значения коэффициентов, а также формулы для частных сумм ряда Фурье  $a_{i\varphi}$ , могут быть получены и оценены аналитически на основе лемм Римана-Лебега [12]; пример обработки опытных данных для пристенного трения приведен в [12].

В общем случае осреднение по углу граничных условий (25) не представляет принципиальных трудностей и подчиняется правилам почленного интегрирования рядов Фурье. После подстановки зависимостей (22)-(25) в определения осредненных по кольцевому сектору переменных и параметров распределений получим их аналитические соотношения с учетом влияния азимутальных изменений. Например, аналитическое соотношение параметра распределения фазосодержания для первой (пристенной) зоны имеет вид

$$C_{k01\gamma}^{\wedge} = 1 + \frac{\gamma}{f_{jc}^{\wedge} m_1 + f_{\alpha w}^{\wedge} n_1 + \gamma} \left( 1 - \frac{\Delta \cdot \alpha_{k1w}^{\wedge}}{\alpha_k \gamma_{1\gamma}} \right), \quad (27)$$

где коэффициенты  $f_{jc}^{\wedge}$  и  $f_{\alpha w}^{\wedge}$  порядка единицы, представляющие вклад азимутальной неравномерности граничных условий, аппроксимированных частной суммой ряда Фурье по плотности объемного потока и фазосодержанию на границе зон. Аналогичную форму имеет каждый из рассматриваемых в данной работе параметров распределений для ячейки с неоднородным профилем граничных условий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обобщение аналитических зависимостей параметров распределений, предложенных в [1, 2, 7, 8] для течений двухфазных потоков в каналах простой геометрии и с немонотонным профилем переменных, используется в кольцевых ка-

налах, а также в сборках стержней гексагональной и квадратной упаковок. Основная идея предлагаемого подхода заключается в последовательном применении метода суперпозиции для искомых переменных в рассматриваемых фрагментах кольцевых каналов и ячеек (субканалов) в ТВС.

2. На основе двухзонной модели получены аналитические зависимости параметров распределений, их предельные формы и соотношения дополнительности для кольцевых каналов, а также для ячеек (субканалов) в сборках стержней. Приведено описание методики оценки влияния азимутальных неоднородностей для боковой и угловой ячеек, использующее аппроксимации на основе рядов Фурье.

3. Предложенные подходы позволяют проводить как систематический анализ пределов применимости одномерной теории, так и количественную оценку погрешностей одномерной модели для областей с неоднородным изменением радиальных и азимутальных параметров. В целом, применение двух- или  $N$ -зонных квазиодномерных приближенных методов моделирования уточняет направления совершенствования одномерных кодов субканального анализа.

## Литература

1. Корниенко Ю.Н. Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Обобщение для течений в каналах простой геометрии // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - № 4. - С. 54-65.
2. Корниенко Ю.Н. Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Обобщение для течений с немонокотным профилем параметров // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. - № 4. - С. 66-78.
3. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. - М.: Атомиздат, 1975. – 405 с.
4. Chawla T.C., Ishii M. Equations of Motion for Two-Phase Flow in a Pin Bundle of a Nuclear Reactor // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1978. - V. 21. - P. 1057-1068.
5. Khan H.J., Yi H.C. Subchannel Analysis in BWR Fuel Bundles // Ann. Nucl. Energy. – 1985. - V. 12. - № 10. - P. 559-572.
6. Kornienko Yu.N., Kuzevanov V.S., Sorokin A.P. The technique of calculation of non-equilibrium two-phase flow in pin bundles using quasi-2D approaches and sub-channel approximation. Proc. Int. Symp. on gas-liquid two-phase flows. ASME, 1990, FED. - V.99. - P. 321-330.
7. Kornienko Y. Subchannel analytical formulation of the closure relationships for single and two phase flow wall friction heat and mass transfer: Proc. of the 4-th Int. Seminar on Subchannel Analysis ISCA-4 (Tokyo, Japan, April 25-26, 1997). - P. 175-187.
8. Kornienko Y., Ninokata H. Influences of the transversal non-homogeneous parameter distribution on wall friction, heat and mass transfers in single- and two-phase flows in vertical – annular and subchannel geometries: Proc of the 7-th Int. Conf. on Nuclear Engineering (Tokyo, Japan, April 19-23, 1999). Paper-7391, CD-Room, Trac7.
9. Meyer L. Measurements of turbulent velocity and temperature in axial flow through a heated rod bundle: Proc. of Conf. NURETH 5, 1992. Vol. V. - P. 1434-1441.
10. Pfann J. Heat Transfer in Turbulent Longitudinal Flow Through Unbaffled Assemblies of Fuel Rods. Nucl. Engineering & Design, 1973. V. 25. - P. 217-247.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1978. – 832 с.
12. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. / Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л. и др. РТМ 1604.008-88, ГК ИАЭ ФЭИ, 1988. - 436 с.

Поступила в редакцию 14.11.2002

ing). - Obninsk, 2002. - 13 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References, 12 titles.

The generalized hierarchically closed analytical relationships are derived for distribution parameters  $C_{ks}$  of the quasi-one-dimensional (drift flux model) form of continuity, energy and momentum equations for two-phase non-equilibrium flow with non-uniform profiles. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. The complementarity and mirror symmetry properties are presented for parameter distributions for flows with non-uniform parameter profiles.

#### **УДК 621.039.534**

*Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization for Annular Channel and Rod Bundle Flows* \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 12 pages, 5 illustrations. - References, 12 titles.

The derived in the previous articles [1,2] relationships for two-phase non-equilibrium flow distribution parameters  $C_{ks}$  are generalized for an annulus and pin bundle geometry. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. There are derived the limiting analytical forms for  $C_{ks}$  relationships for symmetrical subchannel in the tight packet pin bundle and also with taking into account the azimuthal profiles of the variables.

#### **УДК 621.039.534**

*Heat Transfer and Temperature Fields in the Core of Fast BREST Reactor with Lead Cooling* \ J.A. Kuzina, A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, A.I. Filin, V.P. Smirnov, V.N. Leonov, A.G. Sila-Novitsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 8 illustrations. - References, 10 titles.

The results of thermohydraulic research for the experimental demonstration lead-cooled fast reactor BREST-OD-300 are considered.

#### **УДК 621.039.534**

*Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Boiling Water Coolant* \ V.I. Melnikov, A.V. Dunzev, A.B. Vjugin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 7 illustrations. - References, 7 titles.

The developed acoustic probe system for analysis of a level and amount of liquid phase on the data of a vapor space distribution in control boiling water volume has been investigated. The acoustic probe system allows to determine the state of phase into 8 local volume by probes placed along the height of vessel, and to study dispersing properties of the vapor-liquid water mixture.

The construction of the acoustic device, computer program, laboratory and testing unit experiments are described.