

М358461

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
Высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СТРЕБНЕВ Николай Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК,
ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ШАРОВЫХ
ЗАСЫПКАХ

(01.04.14 - Теплофизика)

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1980

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доцент, кандидат технических наук
Костиков Л.Е.

Официальные оппоненты - профессор, доктор технических наук
Белов С.В.
кандидат технических наук
Богоявленский Р.Г.

Ведущее предприятие - ордена Ленина институт атомной энергии
им.И.В.Курчатова

Защита состоится 21 сентября 1980 г. в 15 час. на
заседании специализированного совета К053.15.08 при Москов-
ском высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана, 107005,
Москва, 2-ая Бауманская ул., 5.

С
библиот

Ав

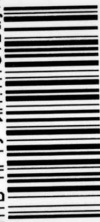
Уч
пр

технической

онин В.И.

М 358461

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1358461

Стребнев Н.А. Исследование

Научная новизна. Выявлены геометрические характеристики, совокупность которых однозначно определяет структуру шарового монодисперсного слоя.

Получены зависимости для расчета определяющих геометрических характеристик, как регулярных шаровых слоев, так и в любой точке объема нерегулярного шарового слоя.

Проведено экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и теплоотдачи в базисных регулярных укладках шаровых элементов.

Разработана модель внутреннего отрывного течения в шаровом слое. В рамках этой модели получены корреляционные зависимости, позволяющие рассчитывать гидравлическое сопротивление и теплоотдачу в шаровых слоях любой структуры по их определяющим геометрическим характеристикам.

Получены новые данные о распределении коэффициентов давления и теплоотдачи по поверхности шарового элемента, находящегося в базисных регулярных укладках.

Практическая ценность. Результаты исследования геометрических характеристик нерегулярного шарового слоя и зависимости для расчета гидравлического сопротивления и теплоотдачи шаровых слоев использованы при проведении нейтронно-физического и теплофизического расчетов активной зоны реактора со свободной засыпкой шаровых твэл и бланкетной системы гибридных термоядерных реакторов установок Т-20, ОПЯЭС, ИНТОР.

Автор защищает

1. Результаты расчета геометрических характеристик регулярных упаковок шаровых элементов.

2. Методику и результаты экспериментального исследования определяющих геометрических характеристик нерегулярного шарового слоя.

3. Модель внутреннего отрывного течения в шаровом монодисперсном слое.

4. Методику и результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления, средней теплоотдачи, распределений давления и теплоотдачи по элементу базисных регулярных упаковок шаров одного диаметра.

Объем работы. Диссертация состоит из "Введения", четырех

глав, "Заключения" и изложена на 206 с., включая 67 рис., 18 табл. и библиографию из 103 наименований.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в работах /1+4/, а также докладывались на Всесоюзном совещании по теплофизике ВТГР (Москва, МВТУ им.Н.Э.Баумана, 15-16 июня 1978 г.) и на Всесоюзном семинаре по высокотемпературной ядерной энергетике (Москва, ИАЭ им.И.В.Курчатова, 28-30 марта 1979 г.).

Содержание работы

В первой главе проведен анализ литературы и поставлены цель и задачи диссертационной работы.

Геометрические характеристики регулярных шаровых упаковок могут быть определены при рассмотрении элементарной ячейки шарового слоя. Углы в гранях, примыкающих к одной из вершин ячейки, определяют структуру шарового слоя и через эти углы могут быть выражены его геометрические характеристики. Слехтер, приняв эти углы равными друг другу, получил для пористости

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \alpha) \sqrt{1 + 2 \cos \alpha}} \quad (1)$$

и для минимального проходного сечения

$$\gamma_{min} = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \alpha} \quad (2)$$

Возможность раздельного изменения углов в гранях элементарной ячейки, примыкающих к одной из ее вершин, учитывается формулой Боришанского:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6 \sin \alpha_1 \sin \theta} \quad (3)$$

где: α_1 - угол в основании элементарной ячейки;
 θ - угол между боковым ребром ячейки и плоскостью ее основания.

Подавляющее большинство работ по исследованию структуры шарового слоя посвящены лишь определению его пористости ε и координационного числа N_k . В работе Струхара и Главачки выявлена связь между этими характеристиками, справедливая как

для регулярных укладок, так и для нерегулярного шарового слоя:

$$\varepsilon = 1,072 - 0,1193 \bar{N}_k + 0,0043 \bar{N}_k^2. \quad (4)$$

Отсутствуют исчерпывающие данные о взаимосвязи остальных геометрических характеристик в регулярных укладках и нет таких данных для нерегулярного шарового слоя.

Нерегулярный шаровой слой считается однородным по своему объему, за исключением пристеночной области ($3+4 d_w$). Такое положение не очевидно и результаты работы Вадсворта, показывающие образование плотной укладки шаров (типа ромбоэдрической) у дна контейнера, ставят его под сомнение.

Как показали термоанемометрические исследования потока воздуха в ячейке кубической укладки шаров (Мерк, Шварц), течение в слое является отрывным и характеризуется высокой степенью турбулентности (до 40 %).

В связи с тем, что отсутствует аналитическое решение уравнений движения и энергии, учет влияния структуры шаровых слоев на их теплогидравлические характеристики производится в рамках различных моделей, наиболее распространенными из которых являются капиллярная и струйного течения. Однако имеющиеся модели течения в шаровом слое не обобщают экспериментальные данные по гидродинамике и теплообмену во всех существующих структурах. Такое положение обуславливается двумя факторами: физической предпосылкой модели, не в полной мере отражающей основные явления при реальном течении в слое, и отсутствием данных об определяющих геометрических характеристиках и их взаимосвязи в шаровых монодисперсных слоях различной структуры.

Наилучшее приближение к реальному обтеканию элементов слоя, по своим физическим предпосылкам, дает модель струйного течения, т.к. она учитывает отрывной характер течения. Однако использование элементарной ячейки Сликтера существенно ограничивает число структур, в которых эта модель работает.

Наиболее полно изучены теплогидравлические характеристики неуплотненного нерегулярного слоя в широком диапазоне числа Рейнольдса. Недостаточно исследованы регулярные структуры: в диапазоне чисел Рейнольдса, характерном для ядерной энергетики ($Re_w = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$), теплогидравлические характеристики исследовались лишь для ромбоэдрической, кубической и тетрагональной-I структур. Причем, данные различных авторов не согласуются друг

с другим, что обуславливается, скорее всего, разными способами имитации бесконечного слоя и различными высотами шарового слоя в их экспериментах.

Исследование распределения теплоотдачи по поверхности шарового элемента слоя в наиболее полной мере было проведено лишь для ромбоэдрической укладки с блокированными просветами (Вадсворт); частичные исследования проведены для кубической (Забродский и Житкевич) и орторомбической-П (Аэров) упаковок.

Отсутствуют данные о коэффициенте сопротивления шарового элемента в слое.

Во второй главе проведено аналитическое исследование геометрических характеристик регулярных упаковок шаров одного диаметра; выявлены определяющие геометрические характеристики; разработана методика и приведены результаты экспериментального исследования определяющих геометрических характеристик нерегулярного шарового слоя.

Геометрические характеристики регулярных монодисперсных шаровых слоев

Структура слоя характеризуется углами в гранях при одной из вершин элементарной ячейки: α_1 - в плоскости основания ячейки, α_2 и α_3 - в боковых гранях. В общем случае для пористости слоя

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6 \sqrt{1 - \sum_1^3 \cos^2 \alpha_i + 2 \prod_1^3 \cos \alpha_i}} \quad (5)$$

для высоты элементарной ячейки (расстояние между рядами элементов по высоте слоя)

$$h_m = \sin \theta = \frac{1}{\sin \alpha_1} \sqrt{1 - \sum_1^3 \cos^2 \alpha_i + 2 \prod_1^3 \cos \alpha_i} \quad (6)$$

и для изменения проходного сечения по высоте элементарной ячейки

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{\sin \alpha_1} \left(\frac{1}{4} - h^2 \right) \quad 0 \leq h \leq h_m - \frac{1}{2} \quad (7)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{\sin d_1} \left(\frac{1}{2} h_m^2 + 2h_m h - 2h^2 \right) \quad h_m - \frac{1}{2} \leq h \leq \frac{1}{2}$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{\sin d_1} \left[\frac{1}{4} - (h_m - h)^2 \right] \quad \frac{1}{2} \leq h \leq h_m,$$

где $h = z/d_w$ — относительная координата по высоте.

Минимальное проходное сечение

$$\psi_{\min} = 1 - \frac{\pi}{4 \sin d_1} \quad (8)$$

имеет место при $h = 0$ и $h = h_m$, а максимальное

$$\psi_{\max} = 1 - \frac{\pi}{\sin d_1} h_m (1 - h_m) \quad (9)$$

при $h = h_m - 1/2$ и $h = 1/2$.

Из системы уравнений (5), (6) и (8) следует, что пористость (ε), минимальное проходное сечение ($\psi_{\min}$) и высота элементарной ячейки (h_m) являются определяющими геометрическими характеристиками слоя.

Для регулярных упаковок эти характеристики взаимосвязаны:

$$\varepsilon = 1 - \frac{2}{3} \frac{1 - \psi_{\min}}{h_m}, \quad (10)$$

$$\psi_{\min} = 1 - \frac{3}{2} h_m (1 - \varepsilon), \quad (11)$$

$$h_m = \frac{2}{3} \frac{1 - \psi_{\min}}{1 - \varepsilon} \quad (12)$$

и сочетание любых двух характеристик из числа определяющих однозначно представляет регулярные структуры.

Анализ известных регулярных упаковок шаровых элементов позволяет выбрать шесть основных (базисных) типов регулярных монодисперсных структур. Геометрические характеристики базисных структур представлены в таблице I. Остальные регулярные укладки можно получить комбинируя между собой базисные элементарные ячейки.

Вместе с тем, структура шарового монодисперсного слоя характеризуется количеством точек контакта его элемента (координационным числом) и расположением точек контакта на поверхности элемента. Координационное число N_k шарового элемента слоя представляет собой сумму точек контакта, лежащих в плоскостях

ти миделевого сечения $N_{кр}$ (число контактов в плане) и точек контакта вне этого сечения $N_{ка}$ (число контактов вне плана).

Таблица I

Геометрические характеристики засыпок шаров одного диаметра

№	Обозначение	углы, град				ε	h_m	ψ_{max}	ψ_{min}	$\bar{F}$
		α_1	α_2	α_3	θ					
I	кубическая	90	90	90	90	0,476	I	I	0,215	4,66
П	орторомбическая-I	90	90	60	60	0,395	0,866	0,636	0,215	2,96
П	тетрагональная-I	90	60	60	45	0,26	0,707	0,35	0,215	1,63
ПУ	орторомбическая-II	60	90	90	90	0,395	I	I	0,093	10,7
У	тетрагональная-II	60	60	75,5	60	0,302	0,866	0,579	0,093	6,18
УI	решетчатая	60	60	60	54,5	0,26	0,816	0,457	0,093	4,85
	нерегулярный слой	-	-	-	-	0,39	0,79	0,57	0,36	1,58

Таблица 2

Числа контактов базисных регулярных упаковок

№ структ.	N_k	$N_{кр}$	$N_{ко}$
I	6	4	2
П	8	4	4
Ш	12	4	8
ПУ	8	6	2
У	10	6	4
УI	12	6	6

Сопоставление координационного числа, чисел контактов в плане и вне плана (таблица 2) регулярных базисных структур соответственно с пористостью, минимальным проходным сечением и высотой элементарной ячейки и учет предельных условий

$$\begin{aligned} \varepsilon &\rightarrow 1 & \text{при} & N_k \rightarrow 0, \\ \psi_{min} &\rightarrow 1 & \text{при} & N_{кр} \rightarrow 0, \\ h_m &\rightarrow \infty & \text{при} & N_{ко} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

приводят к зависимостям:

$$\varepsilon = 1 - 0,11N_k + 0,00404N_k^2, \quad (13)$$

$$\varphi_{min} = \exp(-0,474 N_{кр}^{0,8}), \quad (14)$$

$$h_m = 0,667 + 0,666 / N_{кр}. \quad (15)$$

Зависимость (13) хорошо согласуется с корреляционной формулой (4), обобщающей экспериментальные и теоретические результаты различных авторов.

Геометрические характеристики нерегулярного шарового слоя

Экспериментальное исследование структуры проводилось для нерегулярного слоя, образованного засыпкой стальных подшипниковых шаров диаметром $7,16$ дюйма в контейнер с квадратным поперечным сечением. В процессе эксперимента определялись: количество шаров, находящихся в слое, координаты их центров, среднее число рядов элементов по высоте слоя.

В таблице 3 представлены размеры исследованных слоев, а также значения средних по объему слоя пористости и расстояния между рядами элементов по высоте.

Максимальное отклонение результатов определения средней по объему контейнера пористости от кривой Кармана не превышает $2,5\%$.

Для определения локальных геометрических характеристик и их распределения по объему нерегулярного слоя массивы координат шаровых элементов обрабатывались на ЭВМ ЕС-1020. Сущность алгоритма обработки заключается в определении координационного числа, чисел контактов в плане и вне плана для каждого шарового элемента слоя. Из составленных затем осредненных (по числу экспериментов) распределений количества шаров по соответствующему числу контактов, как для всего объема, так и для слоев, рядов и т.д., определялись соответствующие средние числа контактов. Локальные геометрические характеристики, т.е. характеристики, приходящиеся на один шаровой элемент слоя, определялись по зависимостям (13)+(15).

Максимальная относительная погрешность определения локальных геометрических характеристик нерегулярного слоя не превышала $\pm 10\%$.

Сопоставление пористости и относительного расстояния между рядами для всего объема в целом, полученных в результате машинной обработки координат (таблица 4) с результатами непосредственного их определения (таблица 3) подтверждает справедливость выбранной методики.

Таблица 3

Средние по объему нерегулярного слоя геометрические характеристики

№ экспериментального контейнера	Поперечное сечение $a \times a$, мм	Высота шарового слоя $H_{сл}$, мм	Кол-во рядов по высоте слоя $n_{сл}$	Относ. расстояния между рядами h_{mv}	Количество шаров в слое n	Пористость ε_v	Среднее значение пористости ε_{vcp}
I	310×310	100	11	0,818	7956 7959 7965	0,405 0,405 0,404	0,405
II	$200,75 \times 200,75$	196,5	22	0,804	6573 6596 6609	0,404 0,402 0,401	0,402
III		150	17	0,794	5078 5084 5128	0,396 0,396 0,39	0,394
IV		105	12	0,788	3504 3514 3557 3588 3606	0,405 0,403 0,396 0,391 0,388	0,397

Таблица 4

Средние по объему слоя геометрические характеристики (обработка координат шаров на ЭВМ)

№ конт.	N_k	ε	N_{kp}	γ_{min}	N_{ko}	h_m
I	7,8	0,38	2,55	0,338	5,25	0,79
II	7,5	0,402	2,5	0,356	5,0	0,8
III	7,7	0,382	2,5	0,356	5,2	0,79
IV	7,8	0,38	2,6	0,335	5,2	0,79

Результаты экспериментального исследования (рис. I и рис. 2) показывают, что нерегулярный шаровой слой состоит из ядра, в котором геометрические характеристики остаются постоянными по поперечному сечению слоя и пристеночной области. Причем влияние боковой стенки распространяется на большую глубину в случае более плотного ядра. По высоте структура нерегулярного шарового слоя также претерпевает изменение. Стабилизированная структура ядра имеет место лишь в диапазоне $0,45 H_{сл} \leq z \leq H_{сл} 0,9$ и характеризу-

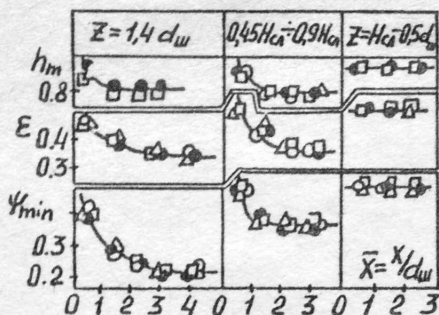


Рис. 1. Зависимость геометрических характеристик нерегулярного слоя от расстояния до боковой стенки:

- - $H_{сл} = 100$ мм (I);
- - $H_{сл} = 196,6$ мм (II);
- △ - $H_{сл} = 150$ мм (III);
- - $H_{сл} = 105$ мм (IV).

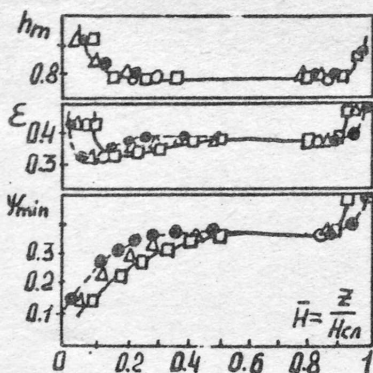


Рис. 2. Зависимость геометрических характеристик ядра нерегулярного слоя от расстояния до дна (обозначения см. рис. 1)

ются значениями геометрических характеристик:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,385 \quad (N_k = 7,65); & \psi_{min} &= 0,37 \quad (N_{kp} = 2,3); \\ h_m &= 0,79 \quad (N_{kd} = 5,3). \end{aligned}$$

Любую область объема нерегулярного слоя можно представить эквивалентной "квазирегулярной" структурой. В таблице I приведены геометрические характеристики квазирегулярной структуры, эквивалентной всему объему нерегулярного слоя в целом.

Сопоставление геометрических характеристик различных зон нерегулярного слоя с их пористостью приводит к зависимостям

$$0,315 \leq \varepsilon \leq 0,4 \quad \begin{cases} \psi_{min} = 2,23\varepsilon - 0,488 \\ h_m = 0,79 \end{cases} \quad (16) \quad (17)$$

$$0,4 \leq \varepsilon \leq 0,51 \quad \begin{cases} \psi_{min} = \varepsilon - 0,01 \\ h_m = 0,555\varepsilon + 0,587 \end{cases} \quad (18) \quad (19)$$

В третьей главе разработана модель внутреннего отрывного течения; описаны методика и экспериментальная установка и проведен анализ погрешностей; приведены результаты тарировки датчика теплового потока и отработки методики и техники измерений на одиночно обтекаемой сфере.

Суть модели внутреннего отрывного течения заключается в замене реального порового пространства шарового слоя системой каналов с круглым, периодически изменяющимся по высоте, поперечным сечением. Для таких каналов определяющими параметрами являются: скорость в узком сечении $u_0 = u / \psi_{min}$; диаметр узкого сечения $d_0 = d_w \sqrt{\psi_{min} / \pi}$ и степень расширения проходного сечения:

$$\bar{F} = \frac{\psi_{max}}{\psi_{min}} = \frac{1}{\psi_{min}} - 4(t - \psi_{min})(t - h_m) \frac{h_m}{\psi_{min}} \quad (20)$$

Гидравлическое сопротивление и теплоотдача в шаровых слоях по параметрам модели внутреннего отрывного течения определяются следующими выражениями:

$$\frac{\Delta p}{H_{cn}} = \zeta_0 B(\bar{F}) \frac{1}{\psi_{min}^2 h_m d_w} S \frac{u^2}{2} \quad ; \quad (21)$$

$$Nu_0 = A(\bar{F}) Re_0^n \quad (22)$$

Здесь: u – скорость фильтрации (объемный расход, отнесенный по всему сечению шарового слоя);

$$Re_0 = \frac{u_0 d_0}{\nu} = \frac{u d_w}{\nu \sqrt{\pi \psi_{min}}} = \frac{Re_w}{\sqrt{\pi \psi_{min}}} \quad ; \quad (23)$$

$$Nu_0 = \frac{\alpha d_0}{\lambda} = \sqrt{\frac{\psi_{min}}{\pi}} \frac{\alpha d_w}{\lambda} = \sqrt{\frac{\psi_{min}}{\pi}} Nu_w \quad ; \quad (24)$$

$A(\bar{F})$ и $B(\bar{F})$ – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние степени расширения проходного сечения на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление шарового слоя.

Экспериментальное исследование гидродинамики и теплоотдачи в шаровом слое проводилось на семи регулярных базисных структурах (см. таблицу I; ромбоэдрическая укладка исследовалась как с блокированными, так и с открытыми просветами), что выявило влияние определяющих геометрических характеристик (во всем диапазоне их изменения) на теплогидравлические параметры. Эксперименты проводились на разомкнутом воздушном контуре, в котором были осуществлены специальные меры для получения равномерного профиля скорости на входе в слой.

Бесконечный слой моделировался выбором соответствующей формы поперечного сечения канала (для первых трех структур таблицы I - квадрат, L стороны/ $d_w = 5$; для остальных - равносторонний шестиугольник, ϕ описанный/ $d_w \approx 5$; $d_w = 44,5$ мм) и размещением соответствующих долей шара у стенок и в углах канала. Число рядов по высоте слоя для всех структур равнялось девяти.

В процессе эксперимента определялись:

- перепад давления на экспериментальном канале;
- распределение давления по поверхности шарового элемента на стабилизированном участке;
- средний коэффициент теплоотдачи шарового элемента;
- распределение теплоотдачи по поверхности шарового элемента на стабилизированном участке.

Исследования гидродинамических характеристик проводились в изотермических условиях, а теплоотдачи - при локальном тепловом моделировании. Диапазон изменения Re_w , в указанных исследованиях, $5 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^4$.

Теплообмен излучением не учитывался, так как температура поверхности шарового элемента не превышала 150°C .

Основной частью экспериментальной установки является медная измерительная сфера, состоящая из двух, тщательно притертых между собой, половин, в которых размещен электрический нагреватель ($N_{\max} = 300$ Вт). Температура поверхности измерялась двумя хромель-алюмелиевыми термопарами.

В подвижной половине измерительной сферы располагаются приемник давления и датчик теплового потока с радиальной растечкой тепла, представляющий собой плоскую медь-константановую дифференциальную термопару (ϕ датчика = $0,7$ мм; толщина константанового электрода $0,1$ мм). Основные достоинства этого датчика заключаются в высокой степени локализации измерений (угловой размер датчика $\approx 1,8^\circ$) и линейной зависимости его сигнала от измеряемого теплового потока.

Все температурные измерения производились при скомпенсированной тепловой утечке по державке измерительной сферы. Для предотвращения утечек тепла по точкам контакта измерительная сфера обкладывалась фторопластовыми шарами.

Отработка методики и техники измерений теплогидравлических характеристик и тарировка датчика теплового потока производились на одиночной сфере при нестесненном обтекании. Сравнение полученных результатов (коэффициенты сопротивления и средней теплоотдачи, распределение коэффициента давления и теплоотдачи по поверхности

сферы) с известными данными показывает, что принятая методика и техника измерений позволяют получать достоверные данные.

Максимальные относительные погрешности составляют для:

- гидравлического сопротивления - $\pm 7,5$ %;
- коэффициента сопротивления шарового элемента в слое - ± 13 %;
- среднего коэффициента теплоотдачи - $\pm 9,3$ %;
- локального коэффициента теплоотдачи - ± 15 %.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования тепловых и гидродинамических характеристик регулярных базисных укладок шаров; произведена обработка экспериментальных данных по параметрам модели внутреннего отрывного течения в шаровом слое и получены корреляционные критериальные зависимости для расчета гидравлического сопротивления и средней теплоотдачи шаровых слоев любой структуры; проведен количественный анализ распределения теплоотдачи по поверхности шарового элемента в слоях различной структуры.

При экспериментальном исследовании течения в шаровых засыпках прежде всего были выявлены участки гидродинамической и тепловой стабилизации. Число рядов в участках стабилизации для разных структур различно и увеличивается с ростом числа Рейнольдса, но в любом случае не превышает пяти.

Обработка по параметрам модели внутреннего отрывного течения наших экспериментальных данных, а также данных других исследователей (Аэров, Богоявленский, Боришанский, Вадсворт, Дентон, Забродский и Житкевич и др.) и эмпирический учет влияния степени расширения проходного сечения приводят к единым, для всех возможных укладок шаровых элементов, зависимостям, справедливым в диапазоне $Re_0 = 2 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^4$:

$$\frac{\Delta P}{N_{сш}} = \xi_0 \left(1 + \frac{33}{(\bar{F})^4}\right) \frac{1}{\psi_{min}^2 h_m d_w} \rho \frac{U^2}{2} \quad (25)$$

Корреляционная зависимость для коэффициента гидравлического сопротивления, определяемого по параметрам модели отрывного течения

$$\xi_0 = 0,276 \left(\frac{33}{Re_0^{0,6}} - 10^{-9} Re_0^{1,6} + 1 \right), \quad (26)$$

охватывает все имеющиеся укладки шаровых элементов с точностью ± 12 %, а корреляция для среднего коэффициента теплоотдачи

$$Nu_0 = 0,076 \left(1 + \frac{5}{(\bar{F})^2}\right) Re_0^{0,69} \quad (27)$$

с точностью ± 10 %.

Коэффициент сопротивления шарового элемента в слое может быть определен как

$$C_x = \frac{2 \Delta p_{ш}}{\rho u^2} = \frac{2}{n_{сл}} \frac{\Delta p}{\rho u^2}.$$

Здесь: $n_{сл}$ - число рядов шаровых элементов по высоте слоя.
Учитывая, что

$$n_{сл} = d_{ш}[(n_{сл} - 1)h_m + 1]$$

и используя выражение (25), получаем для стабилизированного участка течения ($n_{сл} \gg 1$):

$$C_x = \xi_a (1 + 33/(\bar{F})^4) / \psi_{min}^2. \quad (28)$$

Отклонения результатов расчета коэффициента сопротивления по формуле (28) от результатов численного двойного интегрирования экспериментальных данных о распределении давления по поверхности шарового элемента в базисных регулярных укладках не превышает $\pm 20\%$.

Для одиночного шара $\psi_{min} = 1$ и $h_m = \infty$. В этом случае $\bar{F} = -\infty$ и формула (28) преобразуется к равенству

$$C_{xs} = \xi_a. \quad (29)$$

Сопоставление коэффициента гидравлического сопротивления шарового слоя, определяемого в рамках модели отрывного течения, с кривой Рэлея в виде функции от $Re = Re_{ш} / \sqrt{\pi}$, подтверждает этот вывод.

Анализ результатов экспериментального исследования локальной теплоотдачи, представленных в виде линий равного числа Нуссельта для шести базисных укладок, позволяет выделить общие черты распределения теплоотдачи по шаровому элементу слоя:

1. Максимум теплоотдачи находится на фронтальной половине элемента перед миделевой точкой контакта.

2. Минимумы теплоотдачи соответствуют точкам контакта.

3. Наиболее резкие изменения теплоотдачи претерпевает в меридианальных сечениях, содержащих три точки контакта.

4. Наибольший градиент теплоотдачи наблюдается перед миделевой точкой контакта.

5. Распределение теплоотдачи по меридианальному сечению, не содержащему точек контакта, аналогично распределению теплоотдачи по одиночно обтекаемой сфере с большой степенью стесненности потока.

6. Неравномерность распределения теплоотдачи по шаровому элементу падает с ростом числа Рейнольдса в исследованном диапазоне.

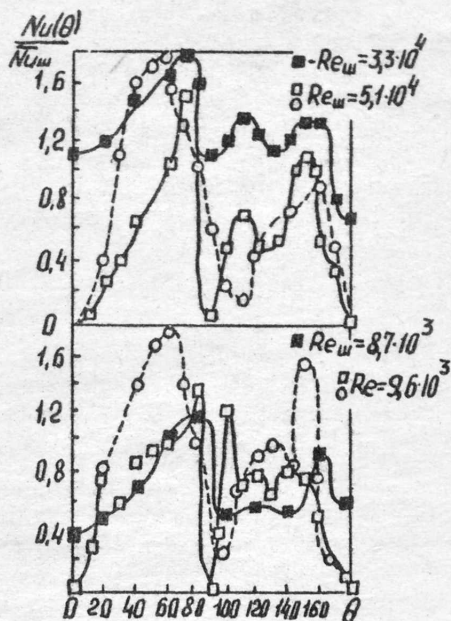


Рис.3. Распределение теплоотдачи по меридианальным сечениям шарового элемента кубической укладки:

■, □ - сечение, проходящее через три точки контакта;
 ○ - сечение без точек контакта;
 ○, □ - наши данные;
 ■ - Забродский и Житкевич

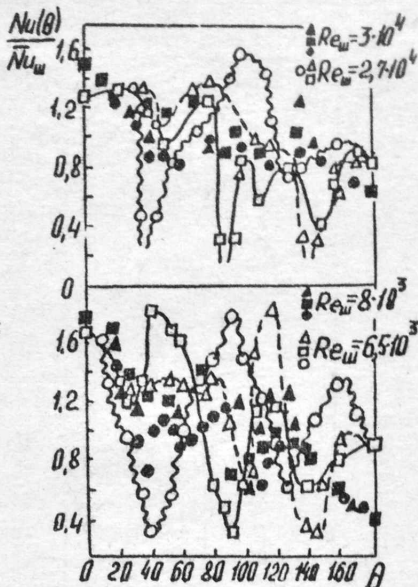


Рис.4. Распределение теплоотдачи по меридианальным сечениям шарового элемента ромбоэдрической укладки с блокированными просветами:

все сечения с одной точкой контакта (○, ● - $\theta_{\text{тк}} = 37,5^\circ$; □, ■ - $\theta_{\text{тк}} = 90^\circ$; △, ▲ - $\theta_{\text{тк}} = 142,5^\circ$); ○, □, △ - наши данные; ●, ■, ▲ - Вадеворт

Сопоставление наших данных с имеющимися, проведенное для меридианальных сечений шарового элемента кубической (рис.3) и ромбоэдрической с блокированными просветами (рис.4) упаковок, показывает качественное соответствие результатов и демонстрирует преимущества использованного датчика теплового потока.

Проведен количественный анализ распределения теплоотдачи в характерных меридианальных сечениях элемента регулярных упаковок. Максимальные и минимальные значения теплоотдачи представлены в виде зависимости от числа Рейнольдса с коэффициентом и показателем степени, являющимися функциями степени расширения проходного сечения:

$$(Nu(\theta)/\bar{Nu})_{\text{экстр.}} = D(\bar{F}) Re_a^{n(\bar{F})} \quad (30)$$

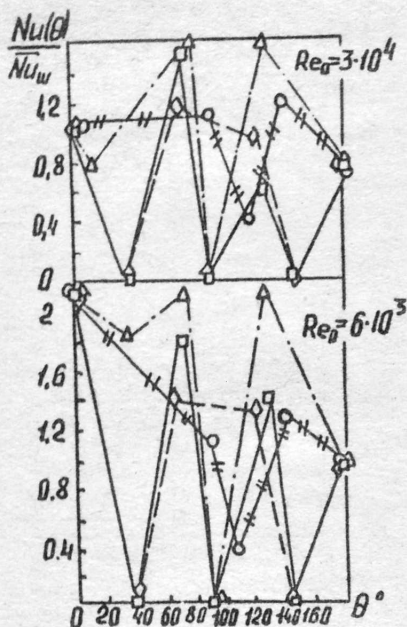


Рис. 5. Распределение теплоотдачи (расчет) по меридианальным сечениям шарового элемента нерегулярного слоя ($\varepsilon = 0,37$; $N_{кв} = 8$; $N_{кр} = 2$; $N_{ка} = 6$):

□ - сечение с тремя точками контакта ($\theta = 37,50$; $\theta = 900$; $\theta = 142,50$); ♦ - сечение с двумя точками контакта ($\theta = 37,50$; $\theta = 142,50$); Δ - сечение с одной точкой контакта на миделе ($\theta = 900$); ○ - сечение без точек контакта

Выявленные зависимости определяющих геометрических характеристик от пористости для нерегулярного слоя, отличающиеся от принятых, как в капиллярной, так и в струйной моделях течения, позволяют рассчитывать структуру в любой точке объема слоя.

3. Показано, что нерегулярный шаровой монодисперсный слой неоднороден по своему объему и состоит из ядра слоя, где геометрические характеристики остаются постоянными по его поперечному сечению и пристеночной области, где происходит изменение геометрических характеристик слоя. По высоте ядра структура нерегулярного

Результатом такого анализа является расчет схематичной картины распределения теплоотдачи по возможным характерным меридианальным сечениям шарового элемента нерегулярного слоя (рис.5).

Основные выводы

1. Выявлены определяющие геометрические характеристики монодисперсного шарового слоя для $D_{ан}/d_w > 10$. Ими являются: пористость, минимальное проходное сечение и высота элементарной ячейки. Получены зависимости для расчета этих характеристик и выявлена их взаимосвязь, как для регулярных упадок, так и для любой области объема нерегулярного слоя.

2. Совокупность любых двух характеристик из выше перечисленных однозначно определяет структуру регулярных шаровых слоев. Структура нерегулярного шарового слоя характеризуется пористостью, которая однозначно определяет остальные геометрические характеристики. Выявлен-

слоя также претерпевает изменения. Стабилизированная структура ядра нерегулярного слоя имеет место лишь при $0,45 N_{сл} \leq \varepsilon \leq 0,9 N_{сл}$ и характеризуется постоянными значениями определяющих геометрических параметров:

$$\varepsilon = 0,385; \quad \psi_{min} = 0,37; \quad h_m = 0,79$$

У дна образуются наиболее плотные структуры с минимальными значениями пористости ($\varepsilon = 0,315$) и минимального проходного сечения ($\psi_{min} = 0,13$). Минимальные значения геометрических характеристик и их положение не зависят от абсолютной высоты нерегулярного слоя.

В среднем по его объему нерегулярный шаровой слой может быть охарактеризован эквивалентной квазирегулярной структурой с определяющими параметрами:

$$\varepsilon = 0,39 (N_k \approx 8); \quad \psi_{min} = 0,36 (N_{kp} \approx 3); \quad h_m = 0,8 (N_{kd} \approx 5).$$

4. Получены экспериментальные данные при течении воздуха через регулярные базисные укладки шаровых элементов по:

- а) гидравлическому сопротивлению;
- б) средней теплоотдаче от элемента слоя;
- в) распределению давления и теплоотдачи по поверхности шарового элемента.

Диапазон чисел Рейнольдса в проведенных исследованиях - $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$.

5. Предложена модель для отрывного течения в шаровом слое, имеющего место при скоростях, характерных для активных зон ВТГР. Отрывной характер течения обусловлен прежде всего отрывным обтеканием одиночного шара в инерционном режиме. Наличие соседних элементов и точек контакта с ними приводит к появлению областей отрывного обтекания и на фронтальной половине шарового элемента слоя.

6. Учет отрывного характера течения в шаровом монодисперсном слое и влияния геометрических характеристик позволили, в рамках предложенной модели течения, обобщить экспериментальные данные настоящей работы и других исследователей по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче единичными зависимостями для шаровых засыпок различной структуры в диапазоне $Re_d = 2 \cdot 10^2 - 8 \cdot 10^4$.

7. Проведенные исследования показали большую неравномерность распределения теплоотдачи по поверхности шарового элемен-

М. В. Т. У.
Н. Э. Бахман
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

та регулярных укладок, чем это считалось ранее. Неравномерность теплоотдачи уменьшается с ростом скорости течения в исследованном диапазоне изменения числа Рейнольдса ($5 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^4$). Максимум теплоотдачи находится на фронтальной половине шарового элемента слоя перед миделевой точкой контакта. Минимумы - в местах точек контакта.

8. Проведенный анализ влияния геометрических характеристик на распределение теплоотдачи по поверхности элемента регулярных шаровых укладок позволяет представить возможное распределение теплоотдачи по характерным меридианальным сечениям шарового элемента нерегулярного слоя.

Литература

1. Костиков Л.Е., Лозовецкий В.В., Стребнев Н.А. Структура активных зон высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов с шаровыми твэлами. - Атомная техника за рубежом, 1979, № 2, с.3-10.
2. Стребнев Н.А., Структура шаровых монодисперсных слоев. - М., 1979. - 26с. - рукоп. предст. Моск. высш.техн.училищем им. Н.Э.Баумана. Деп. в ВИНТИ 25.5.1979, № 1849.
3. Стребнев Н.А. Гидродинамика и теплообмен в шаровых монодисперсных слоях. - М., 1979.-23с. - рукоп. предст. Моск.высш.техн. училищем им. Н.Э.Баумана. Деп. в ВИНТИ 25.5.1979, № 1848.
4. Пелагейченко К.И., Сегаль М.Д., Стребнев Н.А. Исследование флуктуаций пористости в активной зоне ВТТР шарового типа. - М., 1979 - 8с. (Препринт/ ИАЗ 3190).

Подписано к печати 4/II-80 г.
Л. -66048 Заказ 187 Объем 1,1 п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5