

имеющего запас тепла $I_g < \bar{I}_0$ и переносящего пассивную примесь. Другими словами, приближение пассивной примеси справедливо, если ее суммарный вес не выше 40 % от действующей на газ силы плавучести. При большей загрузке в процессе подъема запыленного термика проявляются особенности, связанные с весом частиц (деформация облака, затягивание начальной стадии, осаждение части примеси на поверхность) и их тепловыми свойствами (изменение эффективной теплоемкости среды, более медленное остывание термика).

ЛИТЕРАТУРА

1. The effect on the atmosphere of a major nuclear exchange.— Washington: Nat. Acad. Press, 1985.
2. Андрущенко В. А., Кестенбойм Х. С., Чудов Л. А. Движение газа, вызванное точечным взрывом в неоднородной атмосфере // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1981.— № 6.
3. Гостинцев Ю. А., Солодовник А. Ф., Лазарев В. В., Шацких Ю. В. Турбулентный термик в стратифицированной атмосфере.— Черногоровка, 1985.— (Препр./АН СССР, Ин-т хим. физики).
4. Гостинцев Ю. А., Солодовник А. Ф. Мощный турбулентный термик в устойчиво стратифицированной атмосфере. Численное исследование // ПМТФ.— 1987.— № 1.
5. Гостинцев Ю. А., Матвеев Ю. С., Небогатов В. Е., Солодовник А. Ф. К вопросу о физическом моделировании турбулентных термиков // ПМТФ.— 1986.— № 6.
6. Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И., Якуш С. Е. Турбулентный осесимметричный термик в неоднородной сжимаемой атмосфере. Численное исследование.— М., 1987.— (Препр./АН СССР, Ин-т прикл. математики; № 303).
7. Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И., Якуш С. Е. О численном моделировании подъема турбулентного термика в неоднородной сжимаемой атмосфере // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1989.— № 1.
8. Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И., Якуш С. Е. Подъем турбулентного осесимметричного термика в неоднородной сжимаемой атмосфере // ПМТФ.— 1989.— № 1.
9. Гостинцев Ю. А., Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И. Вынос аэрозольных частиц в стратосферу горячим термиком // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1987.— № 6.
10. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
11. Махвиладзе Г. М., Щербак С. Б. Разностная схема для численного исследования нестационарных двумерных движений сжимаемого газа.— М., 1978.— (Препр./АН СССР, Ин-т прикл. математики; № 113).
12. Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И. О движении и осаждении облака нагретых частиц // ДАН СССР.— 1982.— Т. 267, № 4.

г. Москва

Поступила 14/XII 1988 г.

УДК 621.565

С. Л. Деменок, В. В. Медведев, С. М. Сивуха,
Н. Н. Сунцов

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ШАРОВЫХ УКЛАДОК

Засыпки из сферических элементов широко используются в компактных высоконапряженных теплообменных аппаратах. Энергетическая эффективность их применения в значительной степени зависит от гидравлического сопротивления, которое определяется структурой шарового заполнения. Исследованию гидравлического сопротивления случайных (неупорядоченных) шаровых засыпок посвящено много работ (подробный обзор см. в [1]). В некоторых работах исследовано гидравлическое сопротивление регулярных (упорядоченных) укладок шаров, их анализ приведен в [2]. Насколько можно судить по литературе, не существует методики расчета гидравлического сопротивления шарового заполнения, учитывающего влияние числа рядов шаров, сужения канала, а также наличия перфорированных пластин, удерживающих укладку.

Анализ структуры шаровых укладок содержится в [3]. Их практически важными геометрическими характеристиками являются: расстояние между соседними рядами шаров, отнесенное к диаметру шара, h/d ; среднеобъемная порозность шаровой укладки ϵ , равная отношению свободного от

шаров объема к объему канала, в котором размещены шары; относительное минимальное проходное сечение (просвет) ψ , равное отношению площади, свободной от шаров, к площади сечения канала. Эти параметры связаны между собой уравнением [3]

$$\frac{h}{d} = \frac{2}{3} \frac{1 - \psi}{1 - \varepsilon}.$$

С позиций внешней задачи гидродинамики в качестве характерной скорости принимают среднерасходную скорость жидкости в канале перед укладкой w , а в качестве характерного линейного размера — диаметр шара d . Коэффициент гидравлического сопротивления шара в засыпке целесообразно представить в форме [4]

$$\xi = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon \psi^2}{1 - \varepsilon} \zeta \frac{d}{H},$$

где $\zeta = 2\Delta P/\rho w^2$; $H = (z - 1)h + d$ — высота шаровой укладки; h — расстояние между соседними рядами шаров; z — число рядов в укладке; ΔP — перепад давлений; ρ — плотность рабочей среды.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование гидравлического сопротивления тонкослойных шаровых укладок в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = wd/\nu = 5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ (ν — кинематический коэффициент вязкости). Опыты произведены на аэродинамической трубе открытого типа, ее схему и описание можно найти в [2, 5]. Абсолютное давление воздуха составляло $\sim 0,1$ МПа, температура ~ 300 К. В процессе проведения опытов измерялись перепады статических давлений и температуры воздуха на рабочем и расходомерном участках с помощью U -образных манометров или микроманометров ММН-240 и лабораторных термометров с ценой делений 0,5 К.

Установлено, что в исследованном диапазоне Re гидравлическое сопротивление ряда шаров в укладке определяется степенью расширения потока за данным рядом [2]. Поэтому в канале постоянного поперечного сечения гидравлическое сопротивление всех рядов шаров, кроме последнего, одинаково и перепад давлений на z -рядной укладке представляется как

$$\Delta P = \left[\frac{3}{2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \psi^2} \left(\frac{H}{d} - 1 \right) \xi + \zeta' \right] \frac{\rho w^2}{2}$$

(ζ' — коэффициент сопротивления последнего ряда шаровой укладки равный коэффициенту сопротивления одиночного ряда шаров).

В случае размещения шаров в суживающемся канале характерная скорость обтекания шара в i -м ряду укладки $w_i = Q/F_i$ (Q — объемный расход, F_i — площадь канала в мидельном сечении i -го ряда шаров). Полагая сужение канала равномерным, с учетом уравнения сплошности запишем

$$\Delta P = \left[\frac{3}{2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \psi^2} \frac{h}{d} \sigma \xi + \zeta' \right] \frac{\rho w_0^2}{2} \left(\sigma = \sum_{i=1}^{z-1} \left[1 - \left(1 - F_z/F_0 \right) \frac{i-1}{z-1} \right]^{-2} \right).$$

Экспериментально исследованы укладки шаров различной структуры в прямых и суживающихся каналах при изменении числа рядов шаров от одного до шести. Геометрические характеристики исследованных укладок приведены в табл. 1, 2 для прямых и суживающихся каналов соответственно. Установлено, что при $Re > (4 \dots 6) \cdot 10^4$ наступает автомодельность коэффициента гидравлического сопротивления шаровых укладок относительно Re : $\xi = \xi_0$ и $\zeta' = \zeta'_0$. Полученные нами экспери-

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Тип укладки [3]	Сечение канала, мм	ψ	h/d	ξ_0
1	Кубическая	113×68	0,224	0,1	0,23
2	Ромбическая			0,866	0,30
3	Орторомбическая	120×68	0,123	1,0	0,30
4	Биромбическая			0,866	0,25
5	Тетраэдрическая	113×61	0,135	0,816	0,23
6	Октаэдрическая	113×68	0,224	0,707	0,16

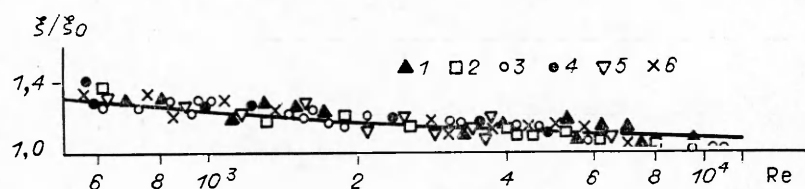
ментальные данные удовлетворительно обобщаются формулой (рис. 1, 2 отвечают табл. 1, 2)

$$\xi/\xi_0 = \zeta'/\zeta'_0 = 7/\sqrt{\text{Re}} + 1,$$

где коэффициент гидравлического сопротивления последнего ряда шаров при инерционном режиме течения определяется по формуле Борда-Карно $\zeta'_0 = (F_0/(\psi F_z) - F_0/F)^2$ (F_0 , F_z , F — площади канала перед шаровой засыпкой, в миделевом сечении последнего ряда шаров и за шаровой засыпкой соответственно), а коэффициент ξ_0 зависит от структуры шаровой засыпки; его значения, основанные на наших опытных данных,

Т а б л и ц а 2

№ п/п	Тип укладки [3]	z	σ	$F_z\psi/F_0$	$F_z\psi/F$	ψ	ε		
1	Кубическая	2	1,0	0,185	0,244	0,220	0,480		
		3	2,28	0,165					
		4	3,82	0,149					
		5	5,64	0,136					
		3	2,81	0,110	0,268	0,190			
		5	7,46	0,088					
2	Ромбическая	2	1,0	0,189	0,244	0,222	0,401		
		3	2,25	0,169					
		4	3,71	0,151					
		5	5,46	0,142					
		3	2,39	0,129	0,231	0,190			
		5	6,67	0,098					
		3	2,47	0,073	0,220	0,210			
		5	7,25	0,110					
		3	2,16	0,175	0,226	0,220			
		5	5,09	0,148					
		3	Биромбическая	2	1,0	0,112	0,161	0,120	0,323
				3	2,31	0,101			
4	3,94			0,090					
5	5,90			0,081					



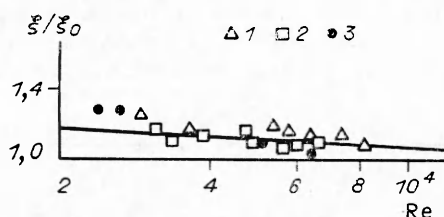
Р и с. 1

приведены в табл. 1. Для случайных засыпок шаров [1] $\xi_0 = 1,25\epsilon^{1,5}$ (применимо в диапазоне $\epsilon = 0,26 \dots 0,48$).

Кроме того, исследовано гидравлическое сопротивление пакетов, состоящих из шаровых укладок, размещенных между перфорированными пластинами [6]. Пористость пластин изменялась в диапазоне $m = 0,05 \dots 1,0$. Установлено, что для определения полного гидравлического сопротивления пакета можно использовать выражение

$$\zeta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 \zeta_i,$$

где $\zeta_i = 2\Delta P_i / \rho w^2$ — коэффициент i -го местного сопротивления ($i = 1, 2$ — перфорированные пластины, $i = 3$ — шаровая засыпка).



Р и с. 2

Нами не обнаружено взаимного влияния местных сопротивлений в исследованных пакетах, в то время как взаимное влияние сдвоенных перфорированных пластин без шаровой засыпки оказывается существенным и может быть учтено формулой [6]

$$\zeta_{\Sigma} = (1 + K_{\text{и}}) \sum_{i=1}^2 \zeta_i$$

($K_{\text{и}} = 0,18(l/D) - 0,5$ — коэффициент интерференции, $l/D = 0 \dots 14$, l — зазор между пластинами, D — гидравлический диаметр канала).

Таким образом, получены зависимости, отражающие влияние на коэффициент гидравлического сопротивления тонкослойных шаровых укладок структуры укладки, числа рядов шаров, сужения канала и наличия перфорированных пластин, удерживающих шары.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сунцов Н. Н., Деменок С. Л., Гусев А. Н. Обобщение опытных данных по гидравлическому сопротивлению шаровых засыпок. — Деп. ВИНТИ № 2806 — В89, 1989.
2. Сунцов Н. Н., Деменок С. Л., Медведев В. В. Гидравлическое сопротивление регулярных шаровых укладок. — Деп. ВИНТИ № 8766 — В88, 1988.
3. Деменок С. Л., Лавренов Д. В., Сунцов Н. Н. Структура и геометрические характеристики шаровых укладок. — Деп. ВИНТИ № 5190 — В88, 1988.
4. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984.
5. Деменок С. Л., Медведев В. В., Сивуха С. М., Сударев Б. В. Гидравлическое сопротивление тонкослойных засыпок с регулярной укладкой шаров. — Деп. ЦНИИ «Румб» № ДР — 3027, 1988; опубл. БАУ «Судостроение», 1988, сер. 2, вып. 8.
6. Сунцов Н. Н., Сударев Б. В., Сивуха С. М. и др. Гидравлическое сопротивление ограниченных перфорированными пластинами регулярных шаровых укладок. — Деп. ЦНИИ «Румб» № ДР — 2811, 1987; опубл. БАУ «Судостроение», 1987, вып. 8.

г. Ленинград

Поступила 28/III 1989 г.