

УДК 533.6.071.4 : 532.517.4
533.6.071.082 : 532.526

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ХОНЕЙКОМБА

*Г. И. Дербунович, С. П. Лаврухина, Н. П. Михайлова,
Е. У. Репик, Ю. П. Соседко*

Приведены результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления хонейкомбов в зависимости от числа Рейнольдса, коэффициента заполнения хонейкомба и относительной длины каналов хонейкомба. Предложена методика расчета коэффициентов гидравлического сопротивления хонейкомбов, используемых в аэродинамических трубах.

Для выравнивания поля течения и снижения уровня турбулентности в аэродинамических трубах широко используются хонейкомбы. Однако аэродинамические характеристики хонейкомбов пока недостаточно изучены. В литературе практически отсутствуют необходимые сведения о методике расчета коэффициента гидравлического сопротивления $K = 2\Delta p / \rho U_\infty^2$ хонейкомбов, применяемых в аэродинамических трубах. Знание величины K является необходимым как при определении дополнительных энергетических затрат на преодоление сопротивления хонейкомба, так и для оценки коэффициента уменьшения турбулентности набегающего потока после прохождения его через хонейкомб, а также собственной турбулентности, порождаемой хонейкомбом. Приведенная в [1, 2] методика определения величины K относится к случаю, когда в канале хонейкомба имеет место течение с сомкнувшимся пограничным слоем при сравнительно больших числах Рейнольдса ($Re = \frac{U_\infty d}{\nu} > 2000$), в то время как в аэродинамических трубах обычно используются короткие хонейкомбы с относительной длиной каналов хонейкомба, равной $l/d \leq 10$ [3], когда пограничный слой в канале не является сомкнувшимся. Кроме того, в [1, 2] предполагается, что величина K соответствует потерям скоростного напора, обусловленным только сопротивлением поверхностного трения в канале хонейкомба, при этом не учитывается то обстоятельство, что стенки каналов хонейкомба имеют конечную толщину, и при их обтекании образуется спутный след, потери давления в котором дают дополнительный вклад в общую величину коэффициента сопротивления. Таким образом, возникает необходимость в проведении новых экспериментальных исследований, которые могли бы явиться основой для разработки рациональной методики расчета коэффициента гидравлического

кого сопротивления хонейкомбов, используемых в аэродинамических трубах.

Настоящие опыты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе в диапазоне скоростей набегающего потока U_∞ от 3 до 19 м/с. Исследовались характеристики хонейкомба из плотно уложенных круглых тонкостенных трубок и хонейкомба сотового типа. Хонейкомбы первого типа изготавливались путем плотной упаковки в готовый каркас круглых трубок с толщиной стенок $\delta=0,1$ мм (рис. 1, а). Было исследовано три серии хонейкомбов этого типа, отличающихся значением диаметра трубок ($d=2, 3$ и 4 мм). При этом в каждой из этих серий относительная длина хонейкомбов изменялась в широких пределах ($l/d=3; 5; 8; 15$ и 20). Геометрический коэффициент заполнения хонейкомба (без учета вязкого течения внутри канала хонейкомба), определяемый как отношение затененной площади ко всей площади поперечного сечения хонейкомба, в каждой из трех серий в порядке возрастания d был равен соответственно $S=0,12; 0,08$ и 0,06.

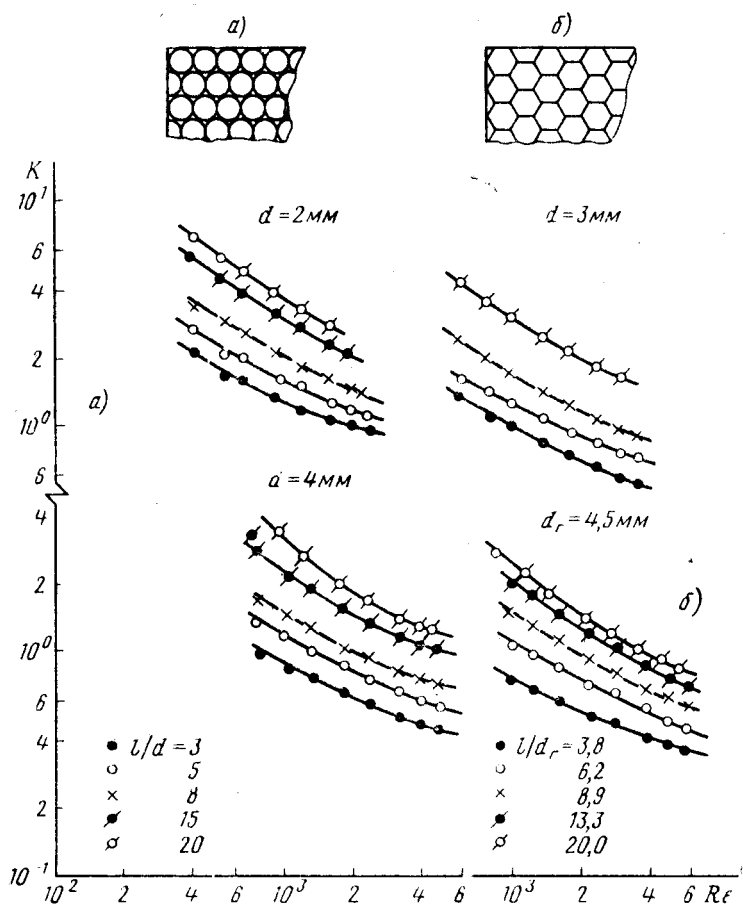


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления хонейкомба от числа Рейнольдса: а) хонейкомб из круглых трубок; б) хонейкомб сотового типа

Ячейка хонейкомба сотового типа (см. рис. 1, б) представляет собой правильный шестиугольник, длина стороны которого составляет $a=2,5$ мм, а толщина стенок $\delta \approx 0,1$ мм. Эквивалентный (гидравлический) диаметр такой ячейки равен $d_r = 4F/\Pi = 4,5$ мм (здесь F — площадь ячейки хонейкомба, Π — периметр ячейки). Геометрический коэффициент заполнения S такого хонейкомба равен 0,04. Хонейкомбы сотового типа исследовались при пяти значениях длины каналов: $l = 17; 28; 40; 60$ и 90 мм, при этом соответственно $l/d_r = 3,8; 6,2; 8,9; 13,3$ и 20 .

Коэффициент гидравлического сопротивления хонейкомба K определялся по перепаду Δp величин статического давления до и после хонейкомба. Результаты определения K при разных значениях скорости набегающего потока U_∞ приведены на рис. 1 в виде зависимости от числа Рейнольдса $Re = U_\infty d_r / \nu$. Видно, что при всех значениях относительной длины l/d значение K сильно зависит от числа Re , при этом зависимость K от Re наблюдается во всем исследованном диапазоне чисел Re (от 400 до 6000). Заметим, что для сеток [4] и перфорированных решеток [5] значения K в том же диапазоне скоростей перестают зависеть от числа Re , рассчитанного по характерному размеру, при весьма умеренных его значениях (соответственно 300 и 1000) и являются функцией только коэффициента заполнения S , что значительно упрощает расчет значений K . Существенное влияние на величину K оказывает также относительная длина l/d хонейкомба. Так, при увеличении l/d от 3 до 20 значение K возрастает приблизительно втрое.

Анализ опытных данных, приведенных на рис. 1, показывает, что установление общей единой зависимости K от всех влияющих параметров, включая такие трудноучитываемые параметры, как форма ячеек и толщина стенок каналов хонейкомба, является делом крайне сложным. Однако, учитывая то обстоятельство, что в настоящих опытах течение внутри каналов хонейкомба, как правило, не было сомкнувшимся, задачу можно упростить, если ввести в рассмотрение обобщенный эквивалентный коэффициент заполнения хонейкомба $S_{\text{ЭКВ}}$, который должен быть однозначно связан с коэффициентом сопротивления K .

Экспериментально величина $S_{\text{ЭКВ}}$ может быть сравнительно просто определена по максимальному значению скорости $U_{\text{и}}$ на выходе из хонейкомба в центре ячейки (при несомкнувшемся пограничном слое). Действительно, из условия сохранения расхода следует

$$S_{\text{ЭКВ}} = 1 - U_\infty / U_{\text{и}}. \quad (1)$$

Сопоставление экспериментально определенных значений K и $S_{\text{ЭКВ}}$ приведено на рис. 2, из которого следует, что между этими величинами имеется однозначная зависимость. При этом значения $S_{\text{ЭКВ}}$ определялись как при $U_\infty = \text{const}$ (светлые точки), так и при $U_\infty = \text{var}$ (темные точки).

Экспериментально установленная зависимость K от $S_{\text{ЭКВ}}$ может быть аппроксимирована эмпирическим соотношением (рис. 2)

$$K = S_{\text{ЭКВ}} + 1,8 \left(\frac{S_{\text{ЭКВ}}}{1 - S_{\text{ЭКВ}}} \right)^2. \quad (2)$$

Интересно отметить, что соотношение (2) хорошо согласуется и с экспериментальной зависимостью $K(S)$, полученной нами ранее для перфорированных решеток [5]. Заметим, что имеющийся на рис. 2 от-

$d, \text{мм}$	2,0					3,0				4,0				4,5					
l/d	3	5	8	15	20	3	5	8	20	3	5	8	15	20	3,8	6,2	8,9	13,3	20
$U_{\infty} = \text{var}$	-	-	▲	▲	▲	-	-	■	-	■	-	■	-	■	-	-	◆	-	-
$U_{\infty} = \text{const}$			△					□				○					◇		

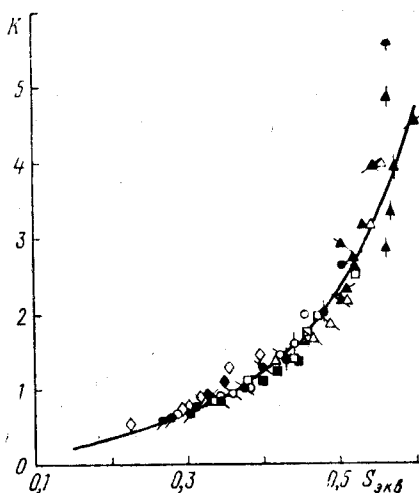


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления хонейкомба от эквивалентного коэффициента заполнения хонейкомба

носителю большой разброс значений K при $S_{\text{экв}} > 0,5$, что соответствует малым значениям d , обусловлен, во-первых, большой погрешностью измерения, когда размер термоанемометрического датчика соизмерим с размером ячейки хонейкомба, и, во-вторых, тем, что эти измерения соответствуют наименьшим числам Re , при которых режим течения внутри ячеек приближается к полностью развитому течению с сомкнувшимся пограничным слоем. Последнее обстоятельство противоречит исходному предположению о существовании ядра течения.

Таким образом, из экспериментально установленной зависимости (2) следует, что расчет коэффициента гидравлического сопротивления K сводится к задаче определения расчетным путем эквивалентного коэффициента заполнения хонейкомба, что, в свою очередь, сводится к расчету толщины пограничного слоя внутри ячеек хонейкомба. Особенность расчета в данном случае состоит в том, что в соответствии с соотношением (1) значение скорости U_0 на входе в ячейку канала увеличивается по сравнению со значением скорости набегающего потока U_{∞} . Это обусловлено уменьшением площади поперечного сечения потока за счет толщины стенок каналов хонейкомба на относительную величину S , а также за счет торможения потока в узких щелях между круглыми трубками (на величину $S_{\text{щ}}$) в случае хонейкомба, изготовленного из цилиндрических трубок. При стандартной гексагональной упаковке трубок в хонейкомбе имеем $S_{\text{щ}} = 0,0931$.

Поскольку в исследованном нами диапазоне чисел Рейнольдса течение внутри каналов хонейкомба является ламинарным, то воспользуемся приведенными в [6] результатами расчета ламинарного течения в начальном участке круглой трубы,

В соответствии с [6] профиль скорости в канале на выходе из хонейкомба может быть рассчитан с помощью соотношения

$$\frac{U}{U_0} = \frac{I_0[\Phi(X)] - I_0\left[\frac{2r}{d}\Phi(X)\right]}{I_2[\Phi(X)]}, \quad (3)$$

где U — значение скорости на расстоянии r от оси канала; I_0, I_2 — модифицированные функции Бесселя; r — расстояние от оси канала хонейкомба; $X = \frac{1000}{Re_0} \cdot \frac{X}{d}$ — безразмерная продольная координата; $\Phi(X)$ — некоторая функция X , значения которой приведены в таблице; $Re_0 = U_0 d / \nu$.

В таблице приведены соответствующие значения $\bar{U}_M = U_M / U_0$ на оси канала хонейкомба, рассчитанные по формуле (3) при $r=0$.

Таблица

Значения $\bar{U}_M = U_M / U_0$, рассчитанные по ф-ле (3)

X	Φ	\bar{U}_M	X	Φ	\bar{U}_M
0,0065	100,00	1,0203	13,73	3,00	1,7285
0,0835	30,00	1,0701	15,63	2,75	1,7612
0,205	20,00	1,1079	17,88	2,50	1,7939
0,343	16,00	1,1377	20,53	2,25	1,8261
0,43	14,50	1,1535	23,68	2,00	1,8573
0,55	13,00	1,734	25,85	1,85	1,8753
0,65	12,00	1,1898	28,3	1,70	1,8926
0,83	11,00	1,2095	31,025	1,55	1,9090
1,045	10,00	1,2337	34,125	1,40	1,9245
1,353	9,00	1,2638	36,475	1,30	1,9342
1,805	8,00	1,3021	39,0	1,20	1,9434
2,493	7,00	1,3514	41,775	1,10	1,9520
2,97	6,50	1,3814	44,875	1,00	1,9600
3,575	6,00	1,4157	48,35	0,90	1,9673
4,35	5,50	1,4547	52,275	0,80	1,9740
5,35	5,00	1,4989	56,75	0,70	1,9800
6,675	4,50	1,5488	61,975	0,60	1,9852
8,375	4,00	1,6041	68,25	0,50	1,9897
10,65	3,50	1,6645	76,0	0,40	1,9934
12,08	3,25	1,6961	∞	0	2,0000

С помощью таблицы можно определить ту предельную относительную длину $(l/d)_H$ хонейкомба, при которой происходит смыкание пограничного слоя (начальный участок течения в трубе). Поскольку при полностью развитом течении в трубе с сомкнувшимся пограничным слоем имеем $U_M / U_0 = 2$, то условным считать, что пограничный слой еще не является сомкнувшимся, если $U_M / U_0 \leq 1,98$. Этому значению U_M / U_0 соответствует величина $X_H = 56,75$. Тогда при умеренном числе $Re_0 = 2000$ имеем $(l/d)_H = 113$, что намного больше тех значений l/d , которые обычно встречаются на практике.

На рис. 3 сравниваются расчетные величины $S_{э\text{кв}}$, полученные с использованием формул (1) и (3), с их опытными значениями в зависимости от l/d , U_∞ и d . Сплошными линиями обозначены результаты расчетов $S_{э\text{кв}}$, в которых при определении относительной скорости U_0 / U_∞ в начальном сечении канала хонейкомба (см. формулу (1))

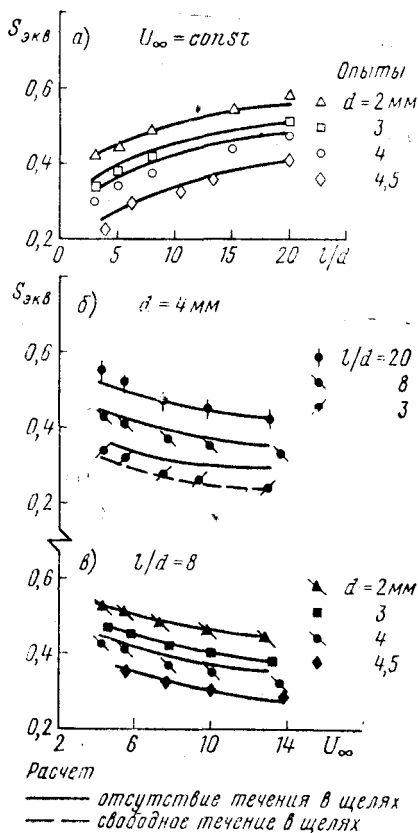


Рис. 3. Сравнение опытных и расчетных значений эквивалентного коэффициента заполнения хонейкомба; а) $U_\infty = const$; б) $d = const$; в) $l/d = const$

предполагалось, что течение в щелях между трубками хонейкомба является полностью заторможенным, т. е.

$$\frac{U_0}{U_\infty} = \frac{1}{1 - (S + S_{ш})}. \quad (4)$$

Однако это предположение приводит к некоторому завышению расчетных величин $S_{экв}$ по сравнению с их опытными значениями в том случае, когда имеют место относительно большие значения диаметра цилиндрической трубки, особенно при малых значениях l/d . Это видно из рис. 3, б, где приведено сравнение опытных данных с результатами расчета $S_{экв}$ для хонейкомба с диаметром трубок $d = 4$ мм и $l/d = 3$. Если же в этом случае исходить из предположения, что $S_{ш} = 0$ в соотношении (4), т. е. считать, что поток проходит через щели беспрепятственно, то расчет (пунктирная кривая) хорошо согласуется с опытными данными. Таким образом, в этом предельном случае последнее предположение является более правильным, чем предположение об отсутствии течения в щелях между трубками.

Результаты сопоставления расчетных и опытных значений $S_{\text{экв}}$, приведенных на рис. 3, позволяют сформулировать приближенные критерии, согласно которым течение в щелях следует считать либо полностью заторможенным, либо полностью свободным.

При гексагональной упаковке цилиндрических трубок относительная величина гидравлического диаметра щели составляет $d_{\text{щ}}/d = (4F_{\text{щ}}/\Pi)/d \approx 0,1$. (Здесь $F_{\text{щ}}$ — площадь поперечного сечения щели, Π — периметр щели.) Как было показано выше, начальный участок течения в трубе соответствует относительной длине $(l/d)_{\text{н}} \approx 0,06 \text{ Re}$. Следовательно, для течения в щели получим $(l/d_{\text{щ}})_{\text{н}} \approx 0,06 U_{\infty} d_{\text{щ}}/\nu = 0,006 \text{ Re}$.

Теперь проведем оценку экспериментальных значений $l/d_{\text{щ}}$ по результатам измерений, приведенным на рис. 3, б, для двух предельных случаев, а именно для случая, когда опытные данные согласуются с расчетом при полностью заторможенном течении в щели ($l/d = 20$, $\text{Re} = 5000$, сплошная кривая), и для случая, когда опыты согласуются с расчетом при полностью свободном течении в щели ($l/d = 3$, $\text{Re} \approx 5000$, пунктирная кривая). В этих двух случаях имеем предельные значения $(l/d_{\text{щ}})_{\text{пред}} = (l/d) \cdot (d/d_{\text{щ}}) = 200$ и 30 соответственно. Расчетное же значение $(l/d_{\text{щ}})_{\text{н}}$ для числа $\text{Re} = 5000$ равно 30.

Таким образом, сопоставляя предельные значения $(l/d_{\text{щ}})_{\text{пред}}$ с расчетным значением $(l/d_{\text{щ}})_{\text{н}}$, мы приходим к следующему выводу. Течение в щели можно считать полностью свободным, если $(l/d_{\text{щ}}) \leq (l/d_{\text{щ}})_{\text{н}}$, а полностью заторможенным — если $(l/d_{\text{щ}}) \geq 5(l/d_{\text{щ}})_{\text{н}}$. В промежуточных случаях, $(l/d_{\text{щ}})_{\text{н}} < (l/d_{\text{щ}}) < 5(l/d_{\text{щ}})_{\text{н}}$, расчетные значения $S_{\text{экв}}$ (см. рис. 3) следует определять путем интерполяции между предельными значениями $S_{\text{экв}}$.

В целом результаты расчетов $S_{\text{экв}}$ хорошо согласуются с опытными данными, что позволяет успешно использовать изложенную методику для оценки значений $S_{\text{экв}}$ и коэффициентов гидравлического сопротивления хонейкомбов, применяемых на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lumley J. L., Passage of a turbulent stream through honeycomb of large length-to-diameter ratio // J. Basic Eng., Trans. ASME, ser. D. — 1964. Vol. 86, N 2.
2. Lumley J. L., McMahon J. F. Reducing water tunnel turbulence by means of a honeycomb // J. Basic Eng., Trans. ASME, ser. D. — 1967. Vol. 89, N 4.
3. Mehta R. D. The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers // Progr. Aerospace Sci. — 1977. Vol. 18.
4. Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П. К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток // Ученые записки ЦАГИ. — 1980. Т. 11, № 2.
5. Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П. Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток // Ученые записки ЦАГИ. — 1984. Т. 15, № 2.
6. Langhaar H. L. Steady flow in the transition length of a straight tube // J. Appl. Mech. — Vol. 9, N 2; Trans. ASME, 1942. Vol. 64.

Рукопись поступила 11/VI 1991 г.