

УДК 532.546

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ И ПРЕЛОМЛЯЮЩЕМ ДЕЙСТВИИ МЕЛКОЯЧЕЙСТЫХ СЕТОК

ЕРШИН Ш. А., ХАДИЕВА Л. Г.

Сделана попытка систематизированного изучения гидравлического сопротивления и преломляющего свойства решеток и пакетов из них как на основе обобщения имеющихся данных, так и проведения дополнительных экспериментов с широким варьированием основных характеристик сеток и значений числа Рейнольдса. Получен универсальный закон сопротивления для сеток и матриц, справедливый в интервале $1 < Re_e < 10^3$.

Подробно исследовано преломляющее действие решеток и матриц из них; показана справедливость теоретической зависимости М. А. Гольдштрика для показателя преломления линий тока.

Установленное соотношение для коэффициента гидравлического сопротивления и показателя преломления решеток и матриц могут быть использованы для расчета соответствующих аппаратов.

Интерес к изучению закономерностей взаимодействия сеток и пакетов из них с набегающим потоком объясняется их широким использованием в различных технологических целях [1, 2]. При этом наибольшее внимание обращается на две важные в прикладном отношении технические характеристики сеток: а) гидравлическое сопротивление и б) их преломляющее действие на поток. Первому из указанных свойств посвящено несколько исследований в основном экспериментального характера [3–7], второму же — практически единственная теоретическая работа [8], ибо в известных исследованиях [9, 10] ставились несколько иные цели. Полученные данные разрознены и зачастую противоречивы ввиду имеющегося разногласия в понимании особенностей взаимодействия решетки с жидким (или газовым) потоком. Например, представление об одинарной сетке как пористом слое предельной толщины [4, 8] убедительно, однако таким образом не решается вопрос выбора закона сопротивления: остается ли он неизменным и в предельном случае или отклоняется от известной зависимости Форхгеймера [11]

$$\Delta P = AU_n + BU_n^2 \quad (1)$$

где ΔP — перепад давления на пористом слое, U_n — нормальная к сетке скорость течения. Анализ же имеющихся опытных данных, как выяснилось впоследствии, давал основания для предположения о применимости соотношения (1) к сеткам. Однако прямых доказательств тому в литературе не имеется.

Кроме того, как показывают экспериментальные [9, 10] и теоретические [8] исследования, решетка, являясь тонким структурным слоем, может оказывать преломляющее действие на падающий под углом к ней поток жидкости. Однако и здесь отсутствует определенность, ибо нет экспериментального подтверждения. Работ же по изучению преломляющего действия пакета решеток найти не удалось.

В этой связи были поставлены специальные эксперименты по систематизированному изучению гидравлического сопротивления и преломляюще-

Таблица 1

Шифр решетки	$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$b \cdot 10^3, \text{ м}$	ε	$a, \text{ м}^{-1}$	Рабочее тело	Источник
α	0,04	0,06	0,689	31 318	Воздух	
β	0,07	0,10	0,679	18 335	»	
γ	0,1	0,3	0,806	7 768	»	
δ	0,12	0,2	0,708	9 745	»	
η	0,2	0,5	0,776	4 470	»	
κ	0,055	0,071	0,663	24 480	»	
λ	0,3	1,0	0,820	2 400	»	
λ_p	0,3	1,0	0,791	2 785	»	
ν	0,406	1,26	0,809	1 885	»	
o	0,266	0,6	0,759	3 625	»	[14]
τ	0,164	0,262	0,697	7 353	»	[14]
φ	0,1	0,145	0,680	12 803	»	[14]
χ	0,15	0,27	0,720	7 468	Вода	[6]
ψ	0,22	0,48	0,753	4 483	»	[6]
ω	0,23	0,61	0,785	3 735	»	[6]
θ	0,3	1,40	0,861	1 847	»	[6]
ρ	0,85	7,5	0,922	367	»	[6]
μ	1,0	11,5	0,940	239	»	[6]
ε	0,03	0,04	0,665	44 731	»	[6]
ζ	0,055	0,071	0,659	24 850	Воздух	[7]
	0,08	0,112	0,674	16 310	»	[7]

Таблица 2

Шифр	ε	$a, \text{ м}^{-1}$	Шифр	ε	$a, \text{ м}^{-1}$	Источник
2λ.0	0,820	2 400	ληα.0	0,794	5 295	
2λ.015	0,820	2 400	αλη.0	0,794	5 295	
2λ.04	0,820	2 400	αηλ.0	0,794	5 295	
2λ.06	0,820	2 400	ηαλ.0	0,794	5 295	
2λ.10	0,820	2 400	2ψ.0	0,753	4 483	[6]
2λ.20	0,820	2 400	5ψ.0	0,753	4 483	[6]
3λ.0	0,820	2 400	2θ.0	0,861	1 847	[6]
3λ.15	0,820	2 400	5θ.0	0,861	1 847	[6]
4λ.015	0,820	2 400	2ρ.0	0,922	367	[6]
5λ.0	0,820	2 400	3ρ.0	0,922	367	[6]
2β.0	0,679	18 335	5ρ.0	0,922	367	[6]
2η.04	0,776	4 470	2κ.0	0,663	24 480	[7]
2η.08	0,776	4 470	5κ.0	0,663	24 480	[7]
3η.0	0,776	4 470	16κ.0	0,663	24 480	[7]
βλ.0	0,793	5 415	2μ.0	0,665	44 731	[7]
λβ.0	0,793	5 415	5μ.0	0,665	44 731	[7]
2(λη).04	0,802	3 228	15μ.0	0,665	44 731	[7]
2(ηλ).04	0,802	3 228	25μ.0	0,665	44 731	[7]
2(η)2(λ)	0,802	3 228	41μ.0	0,665	44 731	[7]

го действия сеток и матриц из них с целью установления общих закономерностей взаимодействия потока с решеткой.

Сетка — пористый материал толщиной h , пористостью ε и удельной поверхностью a , равными соответственно удвоенному диаметру проволоки, отношению свободного объема ячеек к полному объему сеточного материала и отношению всей поверхности проволоки к объему сетки.

Исходя из этого, были определены экспериментальные значения коэффициентов сопротивления различных сеток по известной формуле для пористых сред [11]

$$\xi_c = \frac{\Delta P}{h} \left(\frac{\rho U_n^2}{2} \frac{a}{\varepsilon^3} \right)^{-1} \quad (2)$$

Шифр	ε	$a, \text{ м}^{-1}$	$\theta, \text{ град}$			Источник	
1λ.0	0,820	2 400	30	60			
1η.0	0,776	4 470	30	60			
1α.0	0,689	31 318	30	60			
ηλ.0	0,713	3 228	30	60			
2η.0	0,776	4 470	30	60			
3η.0	0,776	4 470	30	60			
4η.0	0,776	4 470	30	60			
5η.0	0,776	4 470	30	60			
ληα.0	0,794	5 295	30	60			
1τ.0	0,697	7 353	10	15	30	45	[9]
1ξ.0	0,771	6 569	10	15	30	45	[9]
1σ.0	0,800	4 839	10	15	30	45	[9]
1ι.0	0,864	2 859	10	15	30	45	[9]

Решетки устанавливались на выходе из хорошо профилированного круглого сопла с большим поджатием. Скорости движения воздуха измерялись термоанемометром.

Исследовано восемь решеток, характеристики которых приведены в табл. 1. В табл. 1–3 решетки и матрицы из них унифицированы с помощью шифров. Цифра перед шифром матрицы указывает количество решеток данной марки, например шифр $n\lambda m\eta$ обозначает, что матрица состоит из n решеток марки λ и m марки η , а $k(\beta\gamma)$ означает: k пар решеток марки β и γ . Число после точки — расстояние между решетками в пакете. Все опыты по исследованию сопротивления одиночных решеток легли на одну универсальную кривую вида

$$\xi_e = \frac{C_1}{\text{Re}_e} + C_2, \quad \text{Re}_e = \frac{4U_n}{va} \quad (3)$$

справедливую для пористого (зернистого) слоя. Для насыпного слоя значения коэффициентов C_1 и C_2 определяются качеством укладки его элементов и колеблются в довольно широких пределах [11]. Решетка же — регулярная система, поэтому коэффициенты пропорциональности для всех решеток неизменны: $C_1 = 44,2 \pm 0,2$ и $C_2 = 0,35 \pm 0,01$.

На фиг. 1 представлены данные обработки опытов.

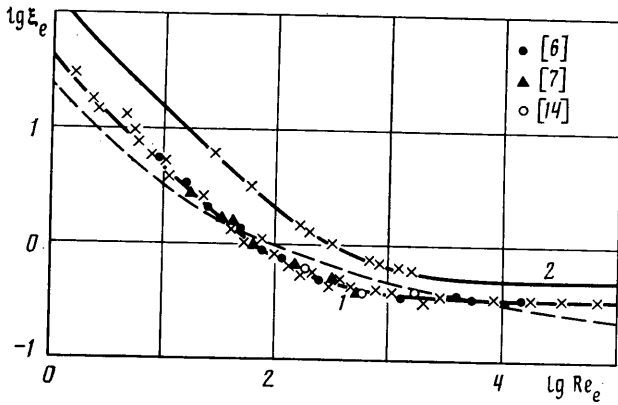
Если принять, что полный перепад давления на плотно упакованной матрице из решеток ΔP равен сумме перепадов давления на составляющих ее решетках ΔP_i (см., например, [5]), то на основании (2) с использованием закона сопротивления (3) для каждой i -й сетки придем к выражению

$$\xi_e = \frac{C_1'}{\text{Re}_e} + C_2', \quad \text{Re}_e = \frac{4U_n}{va}$$

$$C_1' = C_j Q_j, \quad Q_j = \frac{\varepsilon^3}{ha^m} \sum_{i=1}^N \frac{h_i a_i^m}{\varepsilon_i^3} \quad (4)$$

$$m = \frac{2}{j}, \quad j=1, 2, \quad h = \sum_{i=1}^N h_i$$

где ε и a , ε_i и a_i — соответственно пористость и удельная поверхность матрицы и составляющих ее решеток. Нетрудно видеть (см. (2)–(4)), что коэффициент сопротивления пакетов из одинаковых решеток просто равен коэффициенту сопротивления одинарной сетки.



Фиг. 1

При проведении экспериментов с эллиптическими потоками (в наших опытах потоки были осесимметричными с радиусами $R_1=R_2=R$)

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{4K} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d_j^2 l_j)_i, \quad a = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d_j l_j)_i$$

$$K = R_1 R_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 d_{ji}, \quad l_j = 2R_j + 4 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^m \sum_{k=1}^{A_1} \sqrt{R_j + k^2 S_j^2}$$

$$A_j = R_j s_j^{-1}, \quad s_j = b_j \sin \alpha + d_j, \quad m = (-1)^j, \quad j = 1, 2$$

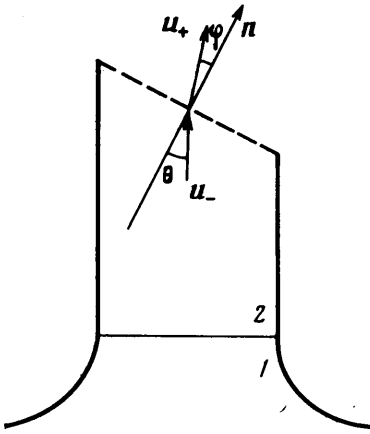
Здесь d_1, d_2, l_1, l_2 и b_1, b_2 — соответственно диаметры, суммарная длина проволочек плетения и расстояния между соседними проволочками, расположенными параллельно малой ($2R_2$) и большой ($2R_1$) осям сеточного эллипса, α — острый угол решеток с ячейками ромбовидной формы. В прямоугольных потоках

$$\epsilon = 1 - \frac{\pi}{4h} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (d^2 N)_{ji}, \quad a = \frac{\pi}{h} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (dN)_{ji}$$

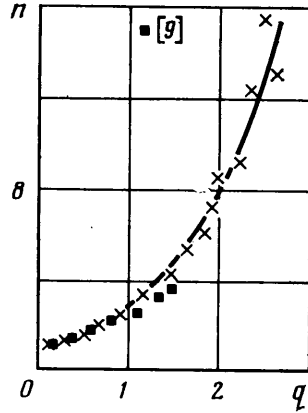
где N_1 и N_2 — соответственно число проволок на единицу длины в продольном и поперечном направлениях.

Для проверки справедливости зависимости (4) были испытаны пакеты из различного набора решеток. Характеристики их даны в табл. 2. Результаты представлены на фиг. 1. Опытные данные для пакетов из одинаковых решеток в полном соответствии с (2)–(4) ложатся на кривую 1, отвечающую закону сопротивления одинарных сеток. Для матриц с набором неодинаковых решеток справедливо соотношение (4). Например, кривая 2, рассчитанная по формуле (4), и экспериментальные данные получены для пакетов $\beta\lambda$ и $\lambda\beta$ (см. табл. 2).

Данные для разреженных матриц, т. е. для сеток, расположенных на некотором удалении друг от друга, также ложатся на расчетные кривые. Во всех случаях максимальное отклонение экспериментальных точек от расчетных кривых не превышает $\pm 10\%$ и наблюдается в переходной области от линейного закона к квадратичному, что, по-видимому, объясняется неустойчивостью течения.



Фиг. 2



Фиг. 4



Фиг. 3

В [4] предлагается эмпирический закон сопротивления сеток

$$\log \xi = 1,75 (\text{Re})^{-0,203} - 1,176$$

или

$$\xi_e = 2 \exp \{ 2,3026 [1,75 (1/4 \text{Re}_e)^{-0,203} - 1,175] \} \quad (5)$$

Как показывает сравнение (см. штриховую кривую на фиг. 1), формула (5) описывает закон сопротивления сеток весьма приближенно. Отклонение от экспериментов составляет в области линейной фильтрации 38%, в переходной 41% и в квадратичной 36%.

Наряду с исследованием сопротивления сеток и пакетов из них проводились опыты по изучению преломления линий тока жидкости.

К выходному соплу 1 экспериментальной установки прикреплялись короткие усеченные цилиндры 2 с косым срезом под различными углами. Внутренний диаметр этих цилиндров равен диаметру отверстия сопла; устанавливались они так, как это показано схематично на фиг. 2. К усеченному выходу накладывались эллиптические кольца с туго натянутыми сетками.

Из многочисленных способов определения направления вектора скорости [9, 12, 13] был выбран наиболее простой, но достаточно надежный метод [9]. К проволочкам решетки привязывались легкие нейлоновые нити, хорошо указывающие направление течения. Они фотографировались (фиг. 3). По фотоснимкам можно определить величину угла преломления потока с точностью $0,5^\circ$. На основании этих данных вычисляется показатель преломления

$$n = \operatorname{tg} \theta / \operatorname{tg} \varphi$$

где θ и φ — углы между нормалью к решетке и вектором скорости до и после нее (см. фиг. 2).

Задача о пересечении наклонно расположенной бесконечно тонкой пористой пластины равномерным потоком идеальной жидкости рассмотрена в [8]. Получена теоретическая формула для показателя преломления

$$n = \exp\left(\frac{1}{2} \gamma \varepsilon^2 \zeta\right), \quad \zeta = \frac{\Delta P}{\rho U_n^2}, \quad U_n = |U| \cos \theta \quad (6)$$

где γ — степень анизотропии преломляющей среды, ζ — коэффициент потери давления. Если в последней формуле перейти от величины ζ к универсальной функции ξ_e , то можно сопоставить теоретическое решение с экспериментом. В случае положительного результата есть основание для распространения соотношения (6) на пакеты сеток с использованием выражения (4). Опыты проводились как с одинарными решетками, так и плотноупакованными матрицами (табл. 3). Результаты экспериментов обработаны в виде зависимости величины n от комплекса $q = 0,5ha\varepsilon^{-1}\xi_e$. Сплошная кривая на фиг. 4 построена по формуле (6) при $\gamma = 1$ с учетом того, что

$$\zeta = ah\varepsilon^{-3}\xi_e$$

Как видно из фиг. 4, экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретической кривой. Аналогичным образом были обработаны данные [9]. Они также хорошо согласуются с установленной зависимостью. Сами же авторы [9] предлагают эмпирическое соотношение

$$\alpha = \frac{\varphi}{\theta} = 1,1(1+k)^{-1/2}, \quad k = \frac{2\Delta P}{\rho|U|^2} \quad (7)$$

Как показал анализ, последней зависимости удовлетворяют лишь данные самих авторов, полученные для сравнительно узкого интервала изменения скорости потока и угла падения θ . При сравнении же с данными других исследований (см. [10]) разброс составляет $\pm 40\%$. Сопоставление результатов настоящей работы с зависимостью (7) дает отклонение более 70% .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Идельчик И. Е.* Аэрогидродинамика технологических аппаратов. М.: Машиностроение, 1983. 351 с.
2. *Караваев М. М., Засорин А. П., Клещев Н. В.* Каталитическое окисление аммиака. М.: Химия, 1983. 231 с.
3. *Bernardi R. I., Linehan J. H., Hamilton L. H.* Low Reynolds number loss coefficient for fine-mesh screens // Trans. ASME. Ser. I. 1976. V. 98. № 4. P. 762–764.
4. *Grootenhuis P.* A correlation of the resistance to air flow of wire gauzes // Proc. Inst. Mech. Eng. 1954. V. 168. № 34. P. 837–846.
5. *Ханжонков В. И.* Сопротивление сеток // Промышленная аэродинамика. М.: Бюро новой техники НКАП, 1944. С. 101–114.
6. *Ван Чжаньшень.* Опытные исследования сопротивления проволочных сеток простого плетения при протекании однородной жидкости: Дис. ... канд. техн. наук. Л.: 1960.
7. *Шевич Ю. А.* Исследование теплообмена в сетчатых матрицах: Дис. ... канд. техн. наук. М.: 1972.
8. *Вайсман А. М., Гольдштик М. А.* О течении сквозь тонкий пористый слой (решетку) // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 4. С. 74–80.

9. *Taylor G. I., Batchelor G. K.* The effect of wire gauze on small disturbances in a uniform stream // *Quart. J. Mech. and Appl. Mat.* 1949. V. 2. Pt 1. P. 1–29.
10. *Davis G. de Vahl.* The flow of air through wire screens // *Hydraulics and Fluid Mech.* /Ed. Silvester R. New York: Pergamon Press. 1964. P. 191–212.
11. *Аэров М. Э., Тодес О. М.* Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 510 с.
12. *Лучинский С. Ф., Тойшибеков И. С.* Влияние расположения сфер на интенсивность массообмена и динамику их обтекания в турбулентном потоке // *Динамика сплошной среды.* Алма-Ата: Изд-во КазГУ, 1982. С. 81–89.
13. *Горлин С. М., Слезингер И. И.* Аэромеханические измерения. М.: Наука, 1964. 720 с.
14. *Collar A. R.* The effect of a Gauze on the Velocity Distribution in a uniform Duct. // *Reports and Memoranda,* 18th February. 1939. № 1867. P. 1–9.

Алма-Ата

Поступила в редакцию
6.11.1987