

ГИДРОМЕХАНИКА

Д. М. МИНЦ

**О ВЗВЕШИВАНИИ ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ В ВОСХОДЯЩЕМ  
ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ**

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 9 XI 1951)

В настоящем сообщении излагаются проведенные автором исследования явления взвешивания зернистого слоя в восходящем потоке жидкости, предпринятые с целью обобщения результатов, полученных ранее в совместной работе с С. А. Шубертом<sup>(1)</sup>. Вопрос имеет практическое значение для ряда отраслей техники, в том числе для водоснабжения при промывке водоочистных фильтров. Он интересен и с теоретической точки зрения, так как движение жидкости через взвешенный в потоке зернистый слой является частным случаем фильтрации через пористую среду.

Взвешивание зернистого слоя в восходящем потоке жидкости происходит после того, как скорость потока становится больше некоторой критической величины  $u_{кр}$ . При этом зерна слоя начинают хаотически двигаться, а объем, занимаемый зернистым слоем, увеличивается. Каждому значению скорости потока  $u > u_{кр}$  соответствует определенный в данных условиях объем слоя.

Перепад давления, отнесенный к единице толщины взвешенного слоя  $P/L$ , должен зависеть от плотности жидкости  $\rho_1$ , вязкости  $\mu$ , истинной скорости потока  $v$  и линейного параметра  $l$ , характеризующего структуру зернистого слоя: его пористость, величину и форму зерен.

В качестве характерного линейного параметра принят гидравлический радиус пористой среды  $l = m/\omega$ , где  $m$  — пористость и  $\omega$  — поверхность зерен в единице объема зернистого слоя.

Уравнение размерностей дает

$$\frac{P}{L} = \eta \frac{\rho_1 v^2}{l}, \quad (1)$$

где  $\eta = \varphi(\text{Re})$  — коэффициент сопротивления, а

$$\text{Re} = \frac{\rho_1 v l}{\mu}. \quad (2)$$

Опыт показывает, что перепад давления  $P$  с увеличением скорости потока возрастает очень незначительно (рис. 1), так что практически его можно принять постоянным и равным весу в жидкости столба зернистого материала с единичной площадью основания (это положение также вытекает из рассмотрения равновесия сил, действующих на взвешенный зернистый слой):

$$P = L (\rho_2 - \rho_1) g (1 - m); \quad (3)$$

$\rho_2$  — плотность материала зерен. Тогда из выражений (1) и (2) получим:

$$\eta = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} g \frac{m^3}{u^2} \frac{d}{\alpha \cdot 6}, \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_1 u}{(1 - m) \mu} \frac{d}{\alpha \cdot 6}; \quad (5)$$

здесь  $d$  — диаметр зерен,  $\alpha$  — коэффициент формы, определенный как отношение поверхности зерна к поверхности равновеликого шара,  $u = vt$  — скорость фильтрации.

С помощью полученных формул для коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса были обработаны данные наших опытов. Опыты проводились в стеклянной цилиндрической трубке  $D = 5,82$  см с речным москворецким песком в восходящем потоке воды. Они охватили диапазон значений чисел Рейнольдса от 0,36 до 360. Размер зерен песка в опытах изменялся от 0,25 до 2,18 мм. Пористость взвешенного зернистого слоя имела значения от 0,40 до 0,80.

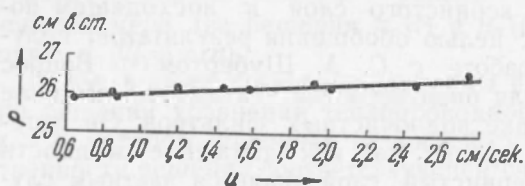


Рис. 1. Зависимости величины потери давления во взвешенном слое от скорости потока

Опытные точки в координатах  $\lg \eta - \lg Re$  (рис. 2) плотно ложатся вдоль некоторой кривой, обнаруживая существование однозначной зависимости  $\eta = \varphi(Re)$  \*. Этот результат говорит о том, что все физические факторы, имеющие значение при движении жидкости через взвешенный зернистый слой, учтены, и гидравлический радиус пористой среды, принятый в качестве линейного параметра, действительно характеризует структуру слоя.

Закономерность изменения коэффициента сопротивления для взвешенного зернистого слоя оказывается аналогичной таковой при обычной фильтрации (1-3): прямолинейный участок кривой при малых значениях  $Re$ , выражающий обратную пропорциональность коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса, постепенно переходит в плавную кривую. Алгебраическое выражение полученной закономерности не получается достаточно простым и удобным для решения практических задач. Постежнее оказывается более удобным выполнить графически, не прибегая к аналитическому выражению зависимости  $\eta = \varphi(Re)$ . Номограмма (рис. 3), принцип построения которой вытекает из структуры формул (4) и (5), позволяет определить любую из величин, входящих в правые части этих формул, если заданы все остальные. Для этого необходимо задаться произвольным значением искомой величины (при определении пористости следует принять  $m = 0,50$ ) и по формулам (4) и (5) вычислить фиктивные значения  $\eta$  и  $Re$ ; полученную точку отложить на графике (рис. 3а) и провести через нее прямую, параллельную линиям  $u$  — при определении скорости потока, или линиям  $d$  — при определении диаметра или поверхности зерен, до пересечения с кривой  $\eta = \varphi(Re)$ . Точка пересечения дает действительные значения  $\eta$  и  $Re$ . Таким способом, в частности, может быть найдена критическая скорость. В этом случае в расчет

\* При расчетах коэффициент формы  $\alpha$  был принят равным 1. Полученная вследствие этого ошибка, как видно из формул (4) и (5), не влияет на взаимное расположение опытных точек, но вся кривая оказывается смещенной вдоль осей координат на величину  $\lg \alpha$ .

должна быть принята величина пористости  $m_0$ , равная той, которая соответствует нормальному состоянию зернистого слоя до его взвешивания в потоке. При определении объема взвешенного слоя или

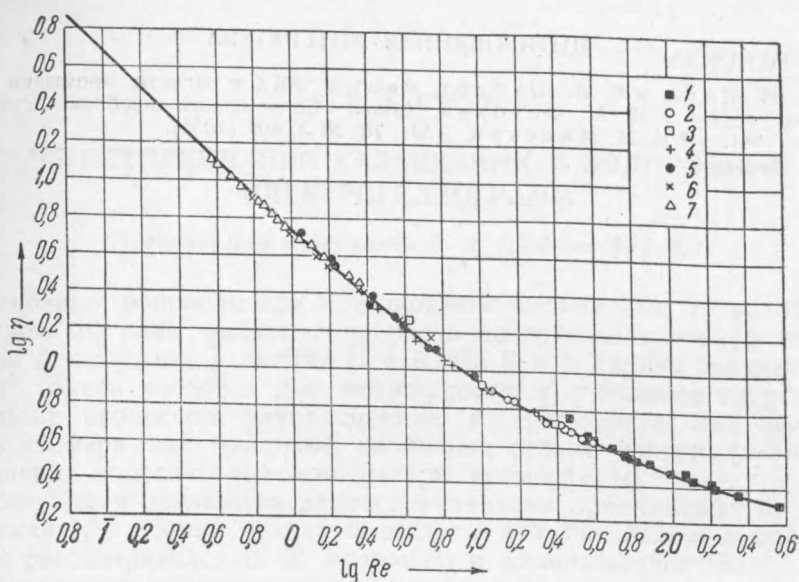


Рис. 2. [Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса. 1 —  $d = 2,18$  мм,  $t = 20^\circ$ ; 2 —  $d = 1,37$  мм,  $t = 18^\circ$ ; 3 —  $d = 1,01$  мм,  $t = 20^\circ$ ; 4 —  $d = 0,63$  мм,  $t = 18^\circ$ ; 5 —  $d = 0,46$  мм,  $t = 20,5^\circ$ ; 6 —  $d = 0,34$  мм,  $t = 20,5^\circ$ ; 7 —  $d = 0,25$  мм,  $t = 19^\circ$ ]

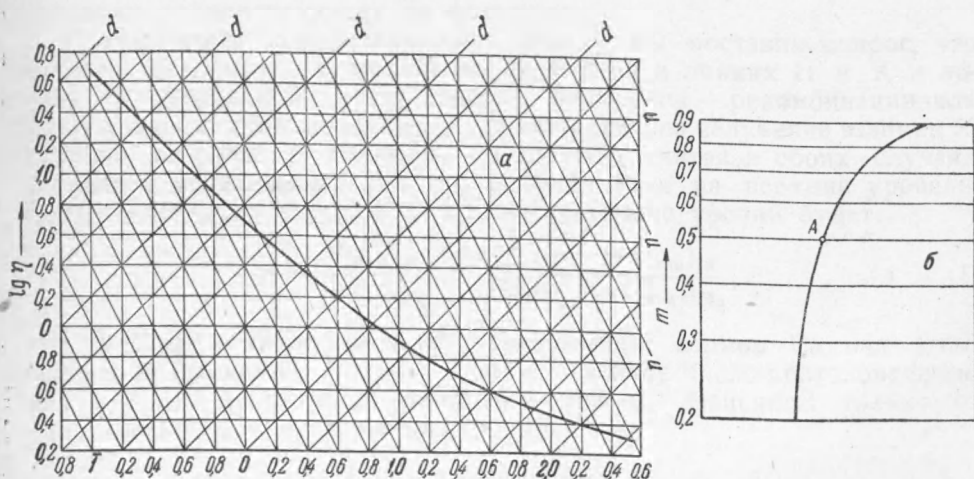


Рис. 3. Номограмма для определения параметров взвешенного зернистого слоя

величины подъема его поверхности задача сводится к вычислению пористости  $m$ . В этом случае график рис. 3б, выполненный на кальке, совмещается с графиком рис. 3а так, чтобы точка А совпала с точкой фиктивных значений  $\eta$  и  $Re$ , определенных для  $m = 0,50$ .

Пересечения кривой  $m$  с кривой  $\eta = \varphi(\text{Re})$  даст действительные значения  $\eta$  и  $\text{Re}$  на неподвижном графике, а на подвижном графике — непосредственно искомое значение пористости.

Поступило  
14 IX 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Д. М. Минц и С. А. Шуберт, Фильтры АКХ и расчеты промывки скорых фильтров, 1951. <sup>2</sup> И. М. Федоров, Сборн. Современные проблемы сушительной техники, 1941. <sup>3</sup> Е. М. Минский, ДАН, 78, № 3, 409 (1951).