

10. Baker G. R., Barker S. J., Bofan K. K., Saffman P. G. Laser anemometer measurements of trailing vortices in water. *J. Fluid Mech.*, 1974, vol. 65, No. 2.
11. Ринкевичюс Б. С. Применение ОКГ для определения скорости частиц в двухфазной струе методом гетеродинамирования. *Радиотехника и электроника*, 1966, т. 14, № 10.
12. Власов С. А., Исаева О. В., Калашников В. Н. Средние и пульсационные составляющие скорости в затопленных струях полимерных растворов. *Инж.-физ. ж.*, 1973, т. 25, № 6.
13. Goldstein R. J., Hagen W. F. Turbulent flow measurements utilizing the Doppler shift of scattered laser radiation. *Phys. Fluids*, 1967, vol. 10, No. 6.
14. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И. Исследование турбулентных потоков лазерным анемометром со спектральным анализом доплеровского сигнала. *Теплофизика высоких температур*, 1975, т. 13, № 3.
15. Абрамович Г. Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
16. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
17. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
18. Бай Ши-и. Теория струй. М., Физматгиз, 1960.

УДК 532.58

## ОБ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ БЛОКИРОВАННОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Ю. И. ЗИНОВЬЕВ

(Москва)

Приведена характеристика блокированного псевдоожигенного слоя. По экспериментальным данным получены зависимости от определяющих параметров аэродинамического сопротивления первого и второго ярусов дисков, образующих твердую фазу слоя, и статического давления на любой глубине неоднородного по структуре слоя. Рассмотрена связь между плотностью расположения в слое элементов аэродинамического сопротивления и стабильностью его удельного сопротивления по глубине.

**1. Характеристика объекта и постановка задачи.** В блокированном псевдоожигенном слое (фиг. 1) в отличие от псевдоожигенного зернистого слоя элементы твердой фазы соединены при помощи гибких нитей в отдельные гирлянды 2, концы которых прикреплены к воздухораспределительной решетке 1. Гирлянды располагаются вдоль оси воздушного потока. В занятом ими объеме создается избыточное статическое давление, которое возрастает в направлении от поверхности слоя к распределительной решетке. На помещенное в слой тело действует выталкивающая сила, величина которой для тел, близких по форме к эллипсоиду, однозначно зависит от их объема, а при определенных геометрических характеристиках системы почти пропорциональна объему.

Благодаря стабильности характеристик твердой фазы блокированный псевдоожигенный слой как сепарирующая система имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с зернистым псевдоожигенным слоем.

При погружении в слой тела гирлянды отклоняются перед ним в стороны, входя при этом элементами одна в другую. Элементы твердой фазы в форме тонких дисков оказались наиболее приемлемыми как в отношении аэродинамического сопротивления, так и в отношении подвижности гирлянд в направлении, поперечном потоку.

В [1] предложен метод подхода к определению сопротивления наполнителей в зависимости от определяющих параметров на основе струйной теории. Сопротивление пучка труб, расположенных поперек потока, по экспериментальным данным обобщено функцией

$$(1.1) \quad Eu = f(\text{Re}, \xi)$$

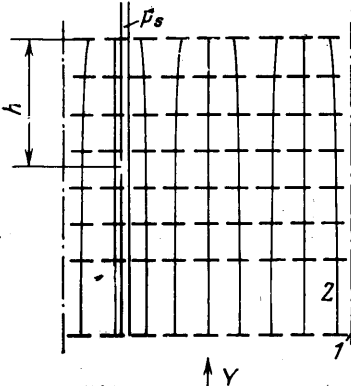
где  $Eu$  — критерий Эйлера,  $\xi$  — коэффициент, характеризующий сужение потока при прохождении между элементами сопротивления.

Блокированный псевдоожигенный слой в отличие от гомогенных структур характеризуется выраженным ярусным строением со свободными промежутками меж-

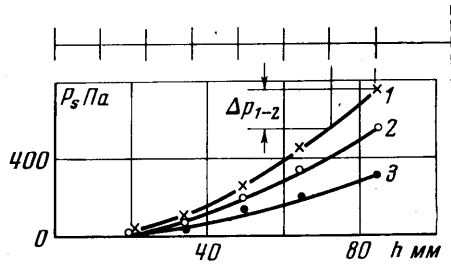
ду решетками, образованными плоскими дисками. Поэтому движение потока в нем нельзя рассматривать как чисто струйное.

Отыскание обобщающей зависимости для сопротивления слоя на всей его высоте усложняется неоднородностью структуры: в результате расталкивающего действия струй между группами гирлянд образуются расширяющиеся кверху каналы. Таким образом, понятие удельного сопротивления (отношение полного сопротивления гомогенной системы к ее длине [2]) применительно к слою в целом здесь неприменимо.

**2. Методика проведения экспериментов.** Объектом исследования был нормальный блокированный псевдооживленный слой, признаками которого являются: плоская воздужораспределительная решетка, одинаковая форма всех гирлянд, постоянная величина как диаметра дисков, так и шага их расположения в гирляндах.



Фиг. 1



Фиг. 2

Размер ванны  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>. Шаг расположения дисков в гирляндах  $t=8, 12, 16$  мм при относительном просвете в первом ярусе дисков  $\varphi_0=0.07, 0.215, 0.36, 0.46, 0.55$  и  $0.68$ . Относительный просвет  $\varphi_0$  определяется как отношение площади живого сечения дисковой решетки  $f_0$  к ее полной площади  $F$ . Длина гирлянд составляла  $\sim 100$  мм, расстояние от воздужораспределительной решетки до первого ряда дисков во всех случаях равно  $20$  мм. Скорость потока  $V$ , приведенная к площади ванны, в общей сложности изменялась в пределах  $1.7-10$  м/сек. Диаметр дисков  $8$  мм, толщина  $1.2$  мм.

Скорость потока определялась по тарировочным графикам  $p_R=f(V)$ , где  $p_R$  — статическое давление в воздушной камере, расположенной под воздужораспределительной решеткой. Для построения тарировочных графиков скорость потока при каждом геометрическом варианте системы замерялась чашечным анемометром в ванне над слоем в пяти точках, по результатам находились средние значения скорости.

Для определения коэффициента сопротивления единичного элемента, расположенного в трубе, один пьезометр устанавливается в сечении перед элементом, другой — за ним [3]. В случае последовательного расположения элементов сопротивления в гирляндах на достаточно близких расстояниях, таких что каждый элемент находится в аэродинамическом следе предыдущего, образуются ансамбли, в которых сопротивление одного яруса определится как разность давлений на уровнях этого яруса и расположенного над ним следующего.

Отбор статического давления  $p_s$  на различных глубинах слоя проводился с помощью погружаемых трубок с заглушенными нижними концами и с боковыми отверстиями на заданном уровне (см. фиг. 1). Открытые концы трубок резиновыми трубками соединялись с многоканальным микроанометром.

**3. Обобщение и анализ результатов.** Поток, пронизывающий блокированный псевдооживленный слой, турбулизован, и через отборники давления замеряется среднее статическое давление на соответствующем расстоянии от поверхности слоя  $h$ . Замеры проводились в 16 ансамблях, различающихся по шагу размещения дисков в гирляндах и по плотности расположения последних на распределительной решетке. Точки, соответствующие экспериментальным значениям давлений, во всех случаях укладывались в плавные кривые зависимости  $p_s=f(h)$  (фиг. 2). Здесь  $\varphi_0=0.36$ , кривые 1-3 соответствуют значениям  $V=6.4, 5, 3.5$  м/сек. Отсутствие скачков давления по глубине слоя, несмотря на случайное расположение мест отбора давления по отношению к ярусам дисков, свидетельствует о сглаживании внутри слоя ступенчатой падения давления за каждым ярусом. Это позволяет принять характер снижения давления по высоте слоя от первого яруса дисков до поверхности слоя монотонным.

Перепад статического давления на участке между первым и вторым ярусами дисков  $\Delta p_{1-2}$  и между вторым и третьим  $\Delta p_{2-3}$  определялся на экспериментальных зависимостях  $p_s=f(h)$  как разность между значениями  $p_s$ , соответствующими уровням расположения ярусов (фиг. 2).

Обобщение результатов проводилось на основе теории подобия и анализа размерностей. Параметрами процесса являются:  $\Delta p$  — аэродинамическое сопротивление дисковой решетки в составе слоя, Па;  $d_0$  — гидравлический диаметр решетки, м;  $d$  — диаметр диска, м;  $t$  — расстояние между дисками в гирляндах или между решетками, образованными дисками, м;  $V$  — скорость потока, м/сек;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  — кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/сек. Сопротивление дисковой решетки является функцией остальных параметров  $\Delta p=f(d_0, t, V, \rho, \nu, d)$ .

Требуется установить связь между семью величинами. Согласно П — теореме теории подобия функциональная зависимость между характеризующими процесс величинами может быть представлена в виде зависимости между составленными из них безразмерными критериями подобия [4].

Выбрав в качестве основных единиц измерения линейный размер (гидравлический диаметр дисковой решетки и диаметр диска —  $d_0$  и  $d$ ), скорость потока  $V$  и плотность воздуха  $\rho$ , находим критерии подобия. Ими оказываются: критерий Эйлера  $Eu=\Delta p/\rho V^2$ , критерий Рейнольдса, определенный по гидравлическому диаметру дисковой решетки,  $Re_0=Vd_0/\nu$ , критерий Рейнольдса, определенный по диаметру диска,  $Re=Vd/\nu$ , и геометрический критерий  $t/d$ .

Таким образом, зависимость  $\Delta p=f(d_0, t, V, \rho, \nu, d)$  представим в виде

$$(3.1) \quad Eu=f(Re_0, Re, t/d)$$

Видна аналогия полученной зависимости с (1.1) (коэффициент  $\xi$ , характеризующий сужение струи при прохождении между трубами в пучке, учитывает также и соотношение между геометрическими параметрами пучка).

Гидравлический диаметр дисковой решетки, принятый в качестве характерного размера при определении критерия Рейнольдса,  $d_0=4f_0/\Pi$ , где  $f_0$  — площадь живого сечения решетки, м<sup>2</sup>,  $\Pi$  — периметр живого сечения, м. Для безграничной решетки с квадратной схемой расположения дисков и относительным просветом  $\varphi_0=f_0/F>0.215$  имеем

$$(3.2) \quad d_0=\varphi_0 d/(1-\varphi_0)$$

Величина просвета  $\varphi_0=0.215$  замечательна тем, что соответствует предельному сближению гирлянд, происходящему при  $q^{-0.5}=d$ , где  $q$  — плотность расположения гирлянд на воздухораспределительной решетке, шт.м<sup>-2</sup>. При  $\varphi_0<0.215$ , а это возможно благодаря взаимопроникновению гирлянд в поперечном направлении

$$d_0 = \frac{4\varphi_0}{\pi d q (1-\alpha/45)}, \quad \alpha = \arccos \frac{1}{d\sqrt{q}}$$

Экспериментальные точки сопротивления отдельных дисковых решеток удовлетворительно обобщаются функцией

$$(3.3) \quad \frac{Eu}{Re} \left( \frac{t}{d} \right)^k = A Re_0^{-n}$$

графики которой представлены на фиг. 3, где  $a$  — первый ярус дисков;  $b$  — второй ярус дисков; точки 1–6 соответствуют шагу  $t=8$  мм; 7–11 —  $t=12$  мм; 12–16 —  $t=16$  мм; при каждом значении  $t$  просвет  $\varphi_0$  изменяется в порядке 0.07, 0.215, 0.36, 0.46, 0.55, 0.68. Этот порядок размещения точек на графиках выражается через соответствующее возрастание значений  $Re_0$ .

Для первого яруса дисков показатель  $k=0$ , а для второго яруса  $k=0.5$ , следовательно, сопротивление первой дисковой решетки, по крайней мере при условии  $t/d=1 \div 2$ , не зависит от расстояния до следующей, второй решетки ( $A=12.36$ ,  $n=1.2$ ).

Аппроксимирующие формулы для сопротивления первого и второго ярусов дисков соответственно

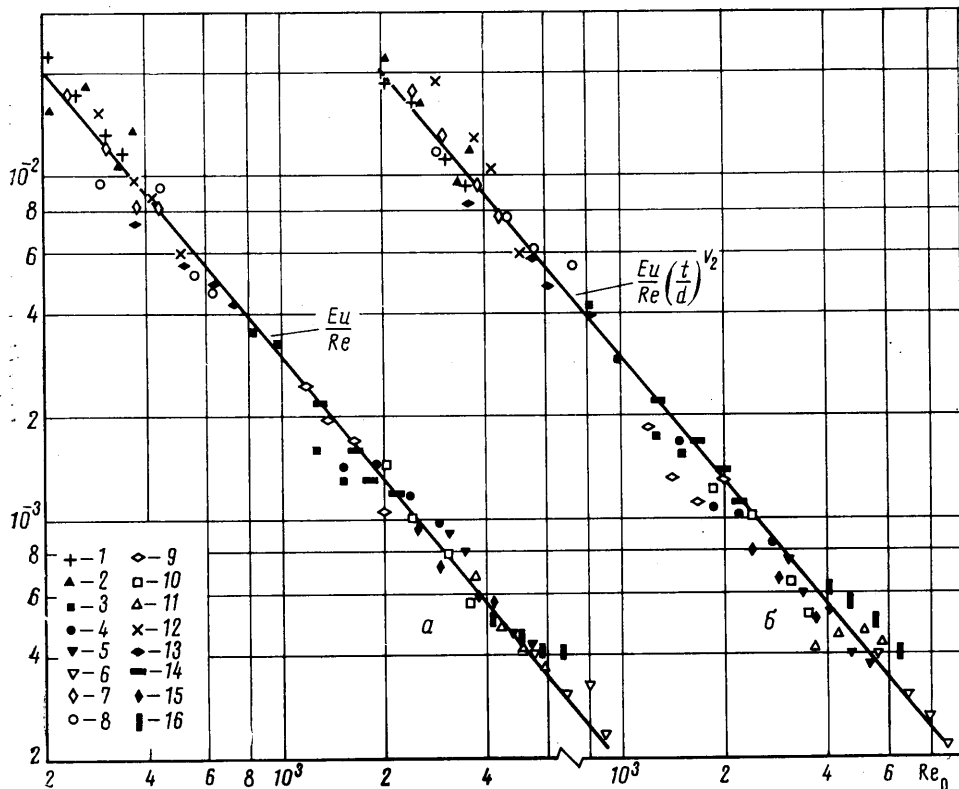
$$(3.4) \quad \Delta p_{1-2} = 12.36 \rho V^2 Re Re_0^{-1.2} = 12.36 \rho V^{1.8} \left( \frac{\nu}{d} \right)^{0.2} \left( \frac{1}{\varphi_0} - 1 \right)^{1.2}$$

$$(3.5) \quad \Delta p_{2-3} = 12.36 \rho V^2 Re Re_0^{-1.2} \left( \frac{t}{d} \right)^{-0.5} = 12.36 \rho V^{1.8} \nu^{0.2} d^{0.3} t^{-0.5} \left( \frac{1}{\varphi_0} - 1 \right)^{1.2}$$

Интересно, что при  $t=d$  сопротивление второго яруса дисков равно сопротивлению первого яруса. По мере увеличения  $t$  сопротивление второго яруса уменьшается.

Судя по виду формулы (3.5), при  $t < d$  сопротивление второго яруса дисков больше, чем сопротивление первого яруса. Обращает внимание, что сопротивление первой дисковой решетки с увеличением диаметра дисков возрастает, а сопротивление второй решетки, наоборот, снижается.

Формулы (3.4) и (3.5) по структуре аналогичны формуле удельного сопротивления сплошного зернистого слоя  $\Delta p/h = A\rho V^m$ , где  $A$  и  $m$  — величины, зависящие от геометрических характеристик слоя [5].



Фиг. 3

В исследованной области геометрических характеристик блокированного псевдооживленного слоя величина  $m$  может быть принята постоянной, равной 1.8.

Как следует из полученных результатов сопротивления отдельных дисковых решеток, получить полное сопротивление слоя  $p_s$  путем умножения сопротивления одной решетки на их количество нельзя. Зависимость последнего от глубины  $h$  для нормального слоя представляется кривыми типа приведенных на фиг. 2. При всех геометрических параметрах слоя зависимости удовлетворительно аппроксимируются степенными функциями  $p_s = Ch^\beta$  [6], где величины размерной постоянной  $C$  кг·м<sup>-(β+1)</sup>·сек<sup>-2</sup> и показателя  $\beta$  зависят от определяющих параметров процесса,  $h$  в см.

Для показателя  $\beta$  путем подбора получена эмпирическая зависимость  $\beta = B(t - 3 \cdot 10^{-3})^{0.38} \exp 0.926\phi_0$ , здесь  $B = 8.5 \text{ м}^{-1}$ .

Обобщающая зависимость для коэффициента  $C$  находится в результате приравнивания двух различных выражений удельного аэродинамического сопротивления (сопротивления, отнесенного к единице высоты слоя), полученных по экспериментальным данным. Одно из них характеризует среднее удельное сопротивление на участке между первым и вторым ярусами дисков и имеет вид  $\rho_{s(1-2)} = \Delta p_{1-2}/t$ . Второе является производной функции сопротивления слоя  $p_s$  по  $h$ , определенной для глубины, соответствующей срединному положению между первым и вторым ярусами дисков. При длине гирлянд  $H = 100 \text{ мм}$  эта глубина  $h = 0.08 - t/2$ . В результате

$$(3.6) \quad C = 12.36 \rho V^2 t^{-1} \text{Re} \text{Re}_0^{-1.2} (0.08 - t/2)^{-(\beta-1)}.$$

Закон изменения производной  $dp_s/dh$  отражает степень неоднородности сопротивления слоя по глубине  $h$ . Он выражается исходя из  $p_s=ch^\beta$  и (3.6) функцией

$$(3.7) \quad \frac{dp_s}{dh} = \rho_s(1-2) \left( \frac{h}{0.08-t/2} \right)^{\beta-1}$$

Из формулы (3.7) следует, что степень различия между удельным сопротивлением ансамбля из гибких гирлянд на глубине  $h$  и средним удельным сопротивлением на участке между первым и вторым ярусами дисков определяется множителем  $[h/(0.08-t/2)]^{\beta-1}=M$ , являющимся, таким образом, показателем изменчивости сопротивления слоя по глубине (при  $M=1$  удельное сопротивление слоя постоянно на всей глубине).

Приведенные на фиг. 4 расчетные зависимости  $M=f(\varphi_0)$  для  $h=25$  мм при различных значениях шага  $t$  показывают, что однородность сопротивления слоя повышается с увеличением степени насыщения его элементами аэродинамического сопротивления, т. е. с уменьшением просвета  $\varphi_0$  между дисками в ярусах и расстояний между ярусами  $t$ . Кривые 1-3 соответствуют шагу  $t=8, 12$  и 16 мм. Связь между уплотненностью элементов слоя и стабильностью его удельного сопротивления по глубине можно объяснить тем, что в более уплотненных системах подвижность гирлянд в поперечном направлении, а следовательно, и возможность каналаобразования ограничены.

В заключение автор благодарит А. А. Бармина за редактирование работы и ценные методические советы.

Поступила 17 V 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Р. С., Померанцев В. В., Шагалова С. Л. Обобщенный метод расчета аэродинамического сопротивления нагруженных сечений. В сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах». М.-Л., Госэнергоиздат, 1958.
2. Аэров М. Э., Годес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л., «Химия», 1968, стр. 43.
3. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. М., «Наука», 1964, с. 121-124.
4. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1957, с. 11, 31.
5. Рамзин Л. К. Газовое сопротивление слоев сыпучих материалов. Изв. теплотехн. ин-та, 1926, № 7 (20).
6. Зиновьев Ю. И., Зубков В. Е. Исследование блокированного псевдооживленного слоя как среды для отделения клубней картофеля от комков и камней. Тр. Всес. научн.-исслед. ин-та механизации сельского хоз-ва, 1975, т. 72.

УДК 533.6.011.5

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНОЙ ПРИСТЕНОЧНОЙ ЗВУКОВОЙ СТРУИ С СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

А. И. ГЛАГОЛЕВ, Ю. А. ПАНОВ

(Москва)

Для изучения взаимодействия встречной пристеночной струи с сверхзвуковым потоком использовалась модель в виде плоской заостренной пластины с укрепленным на ней круглым баясодом для вдува с внешним и внутренним диаметрами, равными 6 и 4 мм соответственно. Число Маха в набегающем потоке  $M=3$ . Число Рей-