

В. М. ЭЛЬТЕРМАН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В СЛУЧАЕ ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

(Представлено академиком А. Н. Колмогоровым 31 XII 1971)

Вдали от мест возникновения турбулентности течение можно рассматривать как однородное изотропное движение, например, течение в обратных потоках, возникающих в вентилируемых ограниченных объемах, и в струях на больших расстояниях от сопла.

Для решения инженерных задач необходимо знать зависимость коэффициента турбулентного обмена от исходных параметров, характеризующих конкретные условия.

Теорией локальной изотропной турбулентности А. Н. Колмогорова ⁽¹⁾ и А. М. Обухова ⁽²⁾ коэффициент турбулентного обмена определяется зависимостью

$$A \sim \varepsilon^{1/2} l^{4/3}, \quad (1)$$

где ε — величина удельной энергии, диссипируемой в единице массы воздуха в единицу времени, $\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-3}$; l — определяющий размер объекта, м.

Задачей настоящего исследования было определить опытным путем коэффициент пропорциональности в зависимости (1). Опытные установки представляли аэродинамические каналы 1 с определяющими размерами l входа в них 0,15 и 0,505 м (рис. 1). Воздух в каналы 1 опытных установок поступал из вентилируемого объема, в воздушной среде которого определяли коэффициент турбулентного обмена.

В сечение 2 аэродинамического канала 1, отстоящего от входа в него на некотором расстоянии, подавалась примесь и создавалась равномерная по всему сечению повышенная ее (примеси) концентрация. Изучалось распространение примеси в аэродинамическом канале вверх по потоку воздуха от нулевого сечения, в котором вводилась примесь.

В опытах варьировались начальная концентрация примеси в нулевом сечении q_0 , скорость движения воздуха в канале U , величина диссипируемой энергии ε в массе воздуха вентилируемого объема. Изменение вели-

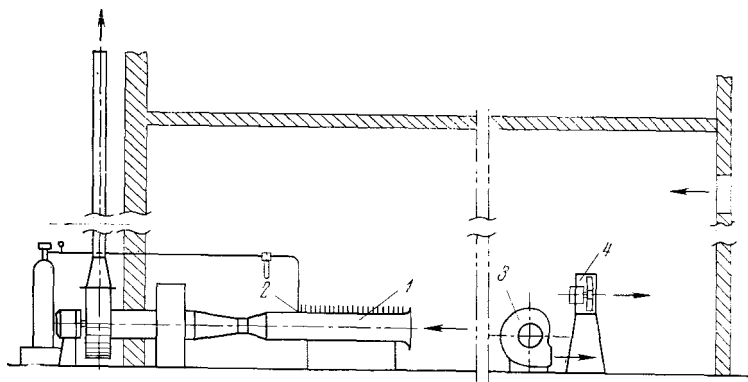


Рис. 1. Схема опытной установки: 1 — аэродинамический канал, 2 — подача газа-примеси в аэродинамический канал, 3, 4 — центробежный и осевой вентиляторы соответственно, применявшиеся для увеличения удельной энергии, диссипируемой в массе воздуха помещения

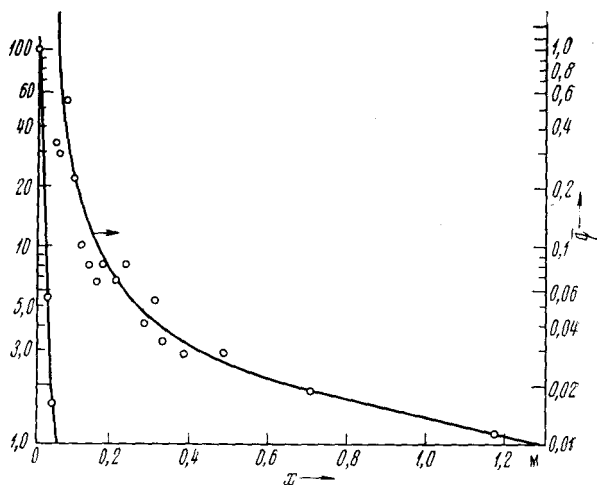


Рис. 2. Распределение концентраций по оси аэродинамической трубы установки № 1 вверх по потоку от источника выделения примеси, $v = 0,18$ м/сек

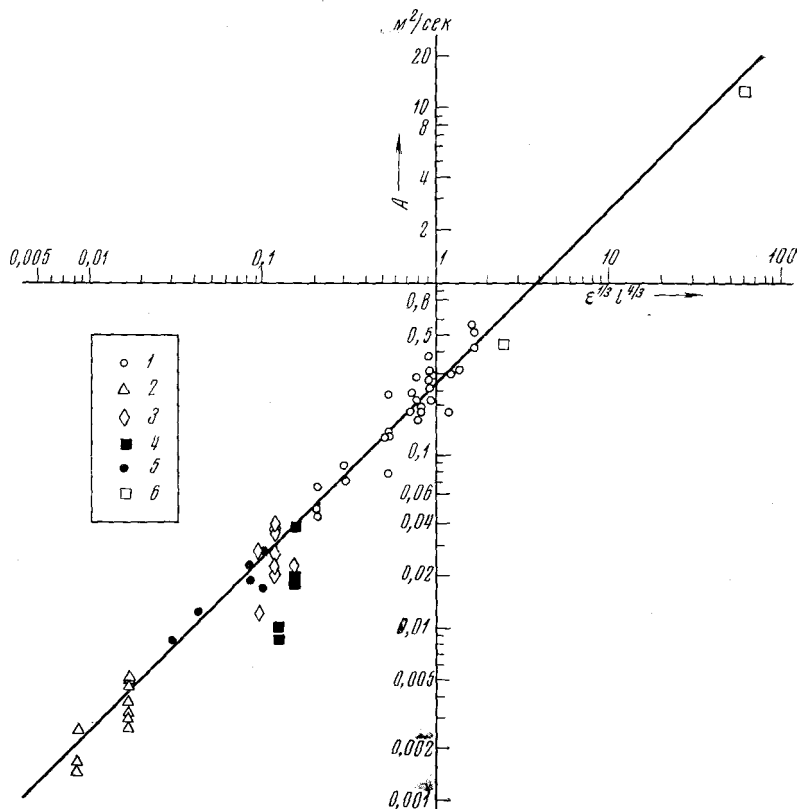


Рис. 3. Зависимость коэффициента обмена A от диссипируемой энергии ϵ и масштаба наблюдения l . 1 — опытная установка № 1; 2—4 — опытная установка № 2; для турбулизации воздуха в помещении действовал центробежный вентилятор 3, рис. 1, (3), осевой вентилятор 4, рис. 1 (4); 5 — опытная установка № 3; 6 — опыты Ричардсона (3)

чины ε производилось путем подачи в вентилируемый объем струй с помощью вентиляторов 3, 4 с разными расходами и скоростями.

Приточные струи, подаваемые в вентилируемый объем, развивались вдали от ограничивающих его твердых стенок и вызывали возмущения с масштабами от соответствующих всему объему до мелких вихрей, в которых происходит превращение механической энергии в тепловую. Доля кинетической энергии, превращающейся в тепловую около твердых стенок, при этом оказывается незначительной. Количество энергии ε , диссипируемой в единицу времени в единице массы воздуха, может быть в данном случае определено как отношение кинетической энергии струй к массе воздуха, заключенной в вентилируемом объеме:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} M \alpha v_n^2 / M_0. \quad (2)$$

Так как $M = L\rho$, $M_0 = V\rho_0$ и $L/V = \text{Кр}$, то

$$\varepsilon = \text{Кр} \frac{\alpha V_n^2}{2}, \quad (2')$$

где M — масса воздуха, подаваемого в вентилируемый объем в 1 сек, кг · сек/м; α — поправочный коэффициент на скоростное давление; v_n — средняя скорость выхода воздуха из приточных отверстий, м/сек; M_0 — масса воздуха, заключенная в вентилируемом объеме V , кг · сек²/м; Кр — кратность воздухообмена, 1/сек.

На рис. 2 в качестве примера приведены полученные в одном из опытов значения концентраций примеси на участке от сечения, в котором расположен источник, до входа воздуха в канал. Всего было проведено более 140 опытов и во всех наблюдались концентрации примеси вверх по потоку от источника.

Для определения коэффициента турбулентного обмена по опытным данным можно воспользоваться с достаточной степенью точности зависимостью, определяющей поле концентраций вверх по плоскопараллельному потоку, набегающему на перпендикулярно ему расположенный бесконечный равномерный источник выделения примеси, прозрачный для потока. Для приближения к этому случаю в опытах были приняты следующие меры: 1) в сечении канала, где был расположен источник примесей, создавалось равномерное поле концентраций; 2) за счет устройства коллектора на входе в канал на участке, на котором изучалось распространение концентраций вверх по потоку, поддерживалось поле скоростей, приближающееся к равномерному; 3) в расчет принималось распределение концентраций по оси канала.

Коэффициент турбулентного обмена по длине аэродинамического канала определяется по формуле

$$A = -v / \left(\frac{d}{dx} \ln \bar{q} \right), \quad (3)$$

где $\bar{q} = q/q_0$ — отношение концентрации q в точке на расстоянии x от нулевого сечения к концентрации примеси в нулевом сечении q_0 .

На участке канала, близком ко входу в него воздуха, коэффициент A имеет постоянное значение и характеризует турбулентность среды, из которой происходит истечение.

На рис. 3 представлены результаты обработки 49 опытов*; найденные значения коэффициента турбулентного обмена в воздушной среде венти-

* Кроме результатов 49 опытов на установках № 1 и № 2, на рис. 3 приводятся результаты 7 опытов (5) на установке № 3 (вытяжной шкаф, в котором создались повышенные концентрации примеси и измерялись концентрации во всасывающем факеле у открытого рабочего окна шкафа). Результаты этих опытов хорошо согласуются с результатами опытов на установках № 1 и № 2. На рис. 3, 4 приведены также результаты четырех опытов на установке № 2, в которых энергия приточных струй, вносимая закрученной струей осевого вентилятора (рис. 1, 4), превращалась в тепло в значительной части у места выхода струи и не распространялась равномерно по всему вентилируемому объему. Поэтому данные этих четырех опытов из дальнейшей обработки были исключены.

лируемого объема, сопоставленные с величинами $\varepsilon^{1/3}l^{1/3}$, имевшими место в каждом опыте.

В результате статистической обработки данных опытов было найдено среднее значение коэффициента пропорциональности в зависимости (1) $c = 0,25$ и среднее квадратичное отклонение коэффициента c от среднего его значения $\sigma_c = 0,0608$.

Была оценена точность, с которой определены найденные параметры. Специально проведенными опытами было установлено, что средняя

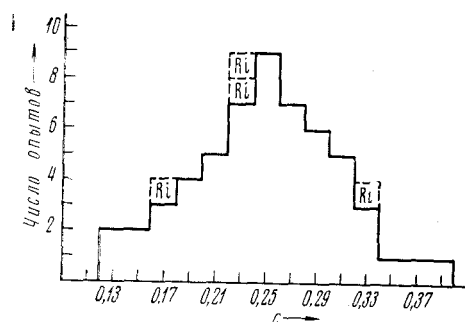


Рис. 4. Гистограмма опытных значений коэффициента пропорциональности c

$\sigma_c = 0,664 \cdot 10^{-2}$, т. е. 2,7% от среднего значения коэффициента $c = 0,25$.

На гистограмме (рис. 4), кроме опытных данных автора, нанесены результаты четырех опытов Ричардсона⁽³⁾ по наблюдениям за рассеиванием облаков в атмосфере в обработке А. М. Обухова⁽²⁾. Можно отметить удовлетворительное совпадение результатов опытов автора и Ричардсона и предположить, что для расчетов процессов диффузии в среде с однородной изотропной турбулентностью найденное опытное значение коэффициента пропорциональности c может быть применено в большом диапазоне удельной диссипируемой энергии (от $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{сек}^{-3}$ до $\varepsilon = 82 \text{ м}^2 \cdot \text{сек}^{-3}$) и масштаба объекта (от $l = 0,15 \text{ м}$ до $l = 10 \text{ км}$).

Всесоюзный центральный научно-исследовательский
институт охраны труда
Москва

Поступило
17 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Н. Колмогоров, ДАН, 31, № 6 (1941). ² А. М. Обухов, ДАН, 32, № 1 (1941); Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 45 (1941). ³ L. F. Richardson, Proc. Roy. Soc. Ser. A, 110 (1926).