

Вспоминая Виктора Михайловича Эльтермана...

А. С. Стронгин, главный специалист АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ»

Доктор технических наук Виктор Михайлович Эльтерман (1913–1983) обладал колоссальным творческим потенциалом, который он лишь частично реализовал в своих книгах [1, 2, 3]. Его профессиональным «коньком» были «интегральные методы», такие как уравнение сохранения импульса в выделенном контуре, расчет средних параметров воздуха в помещении как следствие диссипации кинетической энергии турбулентного потока, и другие.

Благодаря В. М. Эльтерману в вентиляционной науке стали применяться следствия законов однородной изотропной турбулентности академиков А. Н. Колмогорова и А. М. Обухова, понятия критериев Ричардсона и Кармана, что позволило перейти на новый качественный уровень исследований.

Зависимости В. М. Эльтермана для оценки диффузии примесей навстречу потоку, применяются как для расчета местных отсосов, так и для организации тушения возгораний токсических материалов. Большой практический интерес представляют его разработки в области охраны атмосферного воздуха, а также специальных воздушных завес.

В. М. Эльтерман был одним из моих первых научных наставников. Наша совместная работа в институте ЦНИИПромзданий продолжалась с 1976 по 1983 год. В последние годы жизни В. М. Эльтерман часто болел, но продолжал плодотворно работать. Поскольку мне поручалась тематика по охране атмосферного воздуха и воздушным завесам, мы неоднократно обсуждали все аспекты выполняемых в лаборатории работ. Поражали фундаментальные знания и эрудиция В. М. Эльтермана, которые сочетались с практическими инженерными решениями. После его смерти я редактировал и готовил к изданию монографию [3]. К сожалению, многие интересные идеи, намеченные им в черновиках рукописи, остались незавершенными и в монографию их включить не удалось.

Далее кратко изложены некоторые оригинальные работы В. М. Эльтермана, большинство из которых получили дальнейшее развитие у других авторов, например, в [4].

Турбулентный тепло- и массоперенос

Для описания турбулентного переноса в вентилируемом помещении В. М. Эльтерман использовал основные положения теории локальной изотропной турбулентности, разработанной академиком А. Н. Колмогоровым и А. М. Обуховым.

Согласно этой теории, существенной характеристикой турбулентного потока является количество кинетической энергии ϵ , $\text{м}^2/\text{с}^3$, переходящей от главного движения к турбулентным пульсациям и диссипируемой в единице массы среды в единицу времени.

Определив коэффициенты пропорциональности опытным путем, В. М. Эльтерман получил расчетные формулы [2].

Коэффициент турбулентной диффузии:

$$A = 0,25 \mathcal{E}^{1/3} l^{4/3}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (1)$$

где \mathcal{E} — количество кинетической энергии, диссипируемой в единице массы в единицу времени, $\text{м}^2/\text{с}^3$;

l — характерный размер, м.

Диссипируемая в помещении энергия приточных струй рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{п.с.}} = K_p \frac{\alpha V_0^2}{2}, \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (2)$$

Величина энергии, вносимой приточными струями, пропорциональна кратности воздухообмена и квадрату скорости выхода воздуха из приточных насадков.

Энергия, вносимая тепловыми струями, пропорциональна теплонпряженности помещения.

Зависимости для расчета коэффициента турбулентного обмена (1, 2) позволили создать замкнутую систему уравнений для многих вентиляционных процессов. Удалось рассчитать концентрации вредных веществ на рабочих местах у открытых проемов вентиляционных укрытий и найти оптимальные конструктивные решения вентиляционных устройств.

В результате решения уравнения турбулентной диффузии для плоскопараллельного потока получена формула для концентрации примеси с наветренной стороны источника (диффузия навстречу потоку воздуха):

$$q_a = q_0 e^{-\frac{V}{A}a}, \text{ мг/м}^3, \quad (3)$$

где q_0 , q_a — соответственно концентрация вредных веществ в плоскости проема и на расстоянии a от укрытия, мг/м^3 ;

a — расстояние от плоскости проема до контрольной точки в рабочей зоне, м;

V — скорость потока, м/с.

Поле концентрации во встречном потоке определяется экспоненциальным законом (рис. 1, 2).

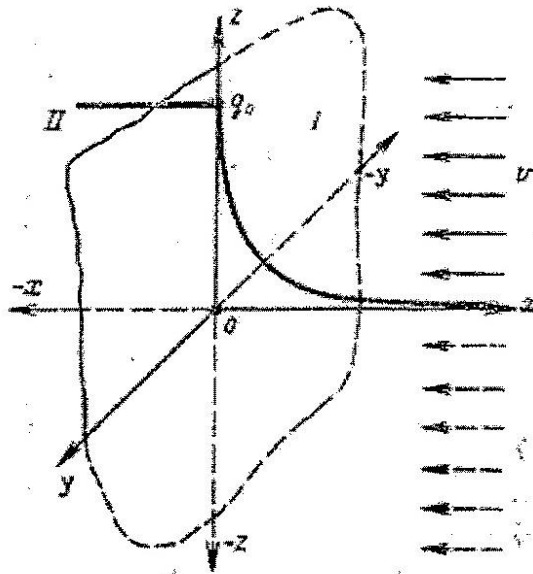


Рис. 1. Схема распределения концентрации в плоскопараллельном потоке.

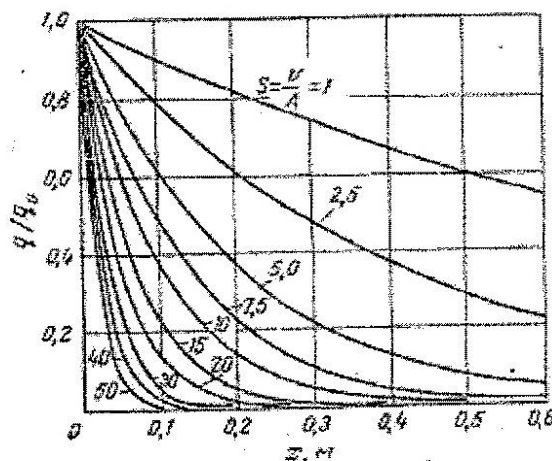


Рис. 2. Кривые концентраций во встречном плоскопараллельном потоке для разных значений v/A .

Требуемая скорость потока в проеме вентиляционного укрытия, в котором выделяются вредные вещества, может быть рассчитана по формуле:

$$V_n = \frac{A}{0,434\alpha} \lg \frac{q_0}{q_{\text{ПДК}}}, \text{ м/с.} \quad (4)$$

Зависимости, описывающие турбулентный перенос, положены в основу расчетов для следующих задач:

- определение количества вредных веществ, выделяющихся из оборудования, среда в котором находится под разряжением;
- определение производительности местных отсосов от укрытий источников вредных выделений;

- расчет общеобменной вентиляции при неравномерном распределении температур и концентраций в помещении;
- оценка теплообмена через границы контура замкнутой циркуляции (при отсутствии осредненного течения);
- оценка поля концентрации примеси в приземном слое атмосферы;
- определение безопасного расстояния от источника горения токсичных веществ при его тушении с наветренной стороны.

Шиберующая воздушная завеса

В книге «Воздушные завесы» [1], вышедшей в 1961 году, В. М. Эльтерман предложил оценивать эффективность действия ВЗ по дополнительному сопротивлению проходу воздуха через проем, создаваемому воздушной завесой. Эффективность ВЗ оценивалась коэффициентом расхода проема ворот $\mu_{пр}$ при действии завесы.

Для определения значения коэффициента $\mu_{пр}$ В. М. Эльтерман применил закон сохранения количества движения для контура, выходящего за пределы проема ворот с тем, чтобы учесть силы реакции наружных ограждений (рис. 3).

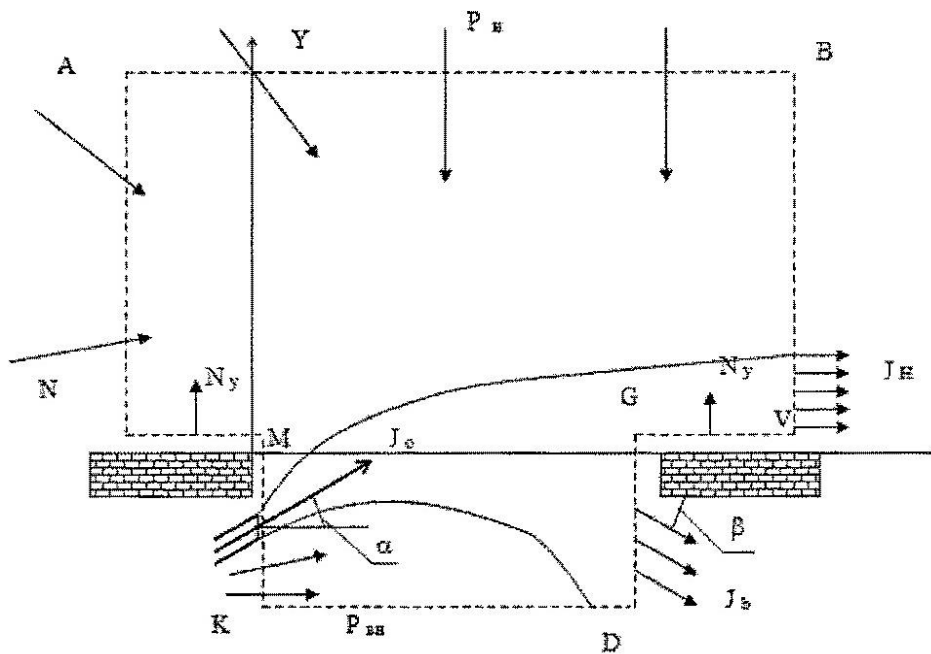


Рис. 3. Схема динамического расчета воздушной завесы

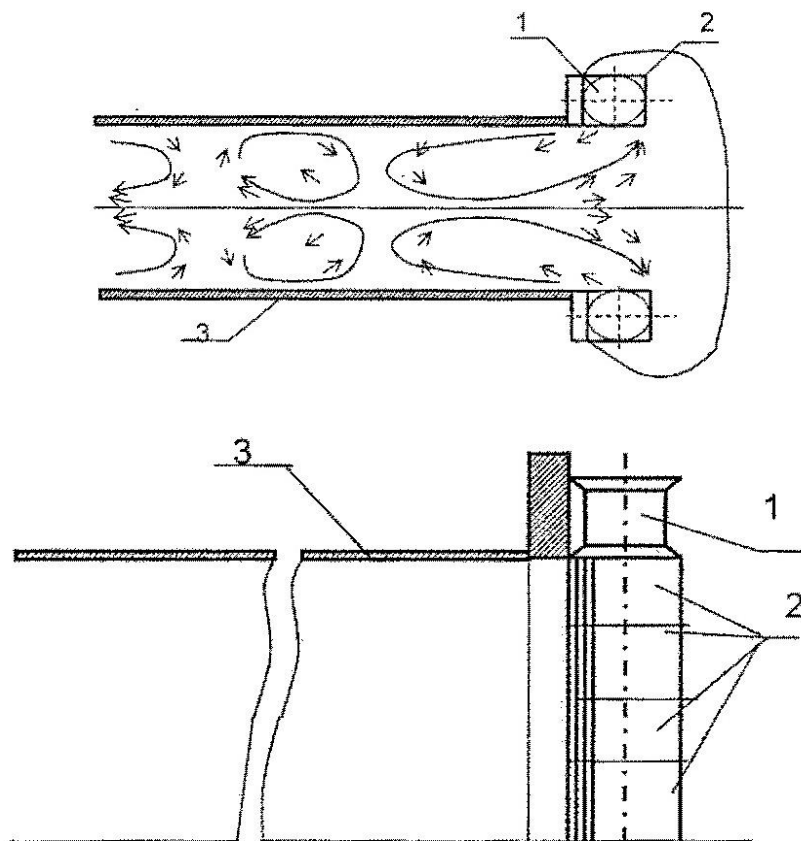


Рис. 4. Принцип действия «завесы в канале»
 1 — вентилятор, 2 — распределительный короб, 3 — канал

Из закона сохранения количества движения для выделенного контура, составленного в проекции на ось x и уравнения Бернулли, им получена следующая формула для $\mu_{\text{пр}}$:

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{1 + 4\mu_0 q^2 D} - 1}{2q^2 D}, \quad (5)$$

$$\text{где } D = f \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_3} \sin \alpha;$$

$$q = \frac{G_3}{G_{\text{пр}}};$$

$$f = \frac{F_B}{F_{\text{ш}}};$$

μ_0 — коэффициент расхода воздуха через ворота без воздушной завесы;
 G_3 — начальный массовый расход воздуха завесы;
 $G_{\text{пр}}$ — массовый расход воздуха через проем ворот;
 $\rho_{\text{см}}, \rho_3$ — соответственно плотности смеси воздуха, поступающего в проем, и плотность воздуха на выходе из завесы;

$F_B, F_{\text{ш}}$ — соответственно площади ворот и воздуховыпускных щелей завесы;

α — угол выпуска струи завесы к плоскости ворот.

Приведенная зависимость проверена экспериментально и в отличие от кинематических методов расчета показала хорошее совпадение с опытными данными.

Воздушная завеса в канале

Принцип «воздушной завесы в канале» проиллюстрирован на рис. 4. В такой завесе воздух из щели выходит под углом $5-10^\circ$ к оси канала навстречу врывающемуся потоку. Подобный выпуск воздуха возможен только при устройстве завесы в канале определенной длины. Развиваясь в канале, струя завесы тормозится и у конца канала поворачивает в противоположную сторону, запирая его для поступления воздуха из окружающей атмосферы. Воздуховыпускные патрубки отнесены внутрь канала на расстояние, достаточное для перехода импульса струи в противодействие и отсутствия неорганизованного перетекания воздуха через проем. Тепло- и массоперенос в проеме происходит только за счет турбулентного обмена через границу замкнутой циркуляционной зоны.

Динамическая эффективность «завесы в канале» в среднем в $2 \div 2,5$ раза выше, чем для традиционных шиберующих завес.

Такие завесы могут быть применены для притворов крупногабаритных ворот, в технологических установках, тоннелях и др. [4].

Течение струи в турбулизованной среде

В турбулизованной среде струя увлекает больше воздуха, чем при движении в спокойной среде [3].

Профиль поперечных скоростей в струе становится более пологим и экспериментальная константа C становится переменной, увеличиваясь по мере удаления от сопла и от оси струи. Соответственно, с увеличением расстояния от сопла уменьшается аэродинамическая характеристика струи m . Такая струя не безгранична по длине, и на определенном расстоянии от сопла она распадается. Первоначально распад струи происходит по ее периферии (рис. 5). В. М. Эльтерман предположил, что воздействие турбулентной среды определяется отношением удельной величины энергии,

диссипируемой в единице массы в единицу времени в струе ($\mathcal{E}_{стр}$) к соответствующей величине в окружающей среде ($\mathcal{E}_{среды}$).

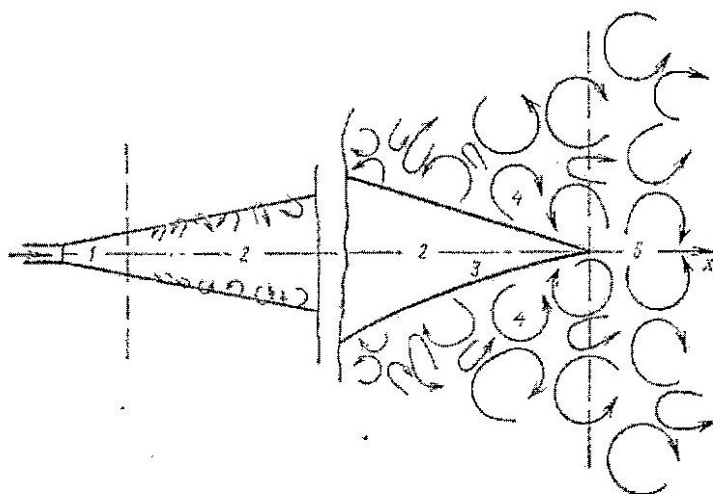


Рис. 5. Схема гурбулентной струи в турбулизированной среде:

- 1 – начальный участок струи; 2 – основной участок струи; 3 – граница, вдоль которой $\mathcal{E}_{стр} = \mathcal{E}_{среды}$; 4 – зона периферийного распада струи; 5 – участок полного распада струи.

Начало участка полного распада струи определяется им из условия $\mathcal{E}_{стр} = \mathcal{E}_{среды}$ по формуле:

$$X = \sqrt[4]{\frac{3(V_0 m \sqrt{F_0})^2}{2\mathcal{E}_{среды}}}, \text{ м}, \quad (6)$$

где V_0 — начальная скорость струи, м/с;

F_0 — площадь воздухораспределителя.

К сожалению, В. М. Эльтерман не успел получить зависимости, описывающие изменение параметров струи по ее длине, хотя сделал качественную оценку явления и наметил подходы к теоретическому решению [3].

Литература

1. Эльтерман В. М. Воздушные завесы. — М.: Машгиз, 1961 г.
2. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. — 3-е изд. М.: Химия, 1980 г.
3. Эльтерман В. М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях. — М.: Химия, 1985 г.
4. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Крупкин Г. Я., Стронгин А. С., Шилькрот Е. О. Отопление и вентиляция производственных помещений. — Санкт-Петербург.: «АВОК Северо-Запад», 2007 г.