

06
Т 78

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

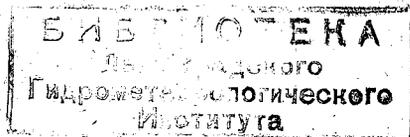
Т Р У Д Ы ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

имени А. И. Воейкова

ВЫПУСК 138

ВОПРОСЫ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук
М. Е. БЕРЛЯНДА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1963

179625

АННОТАЦИЯ

В сборнике излагаются результаты работ по теории распространения аэрозолей в атмосфере, методика наблюдения за загрязнениями приземного слоя воздуха и их выпадениями, результаты работ по исследованию характеристик метеорологических условий, определяющих диффузию примесей, а также по вопросам, связанным с исследованиями процессов турбулентной диффузии тепла и влаги в атмосфере.

Сборник рассчитан на метеорологов и специалистов, интересующихся вопросами учета метеорологических условий при проектировании предприятий и сохранения чистоты атмосферного воздуха.

М. Е. БЕРЛЯНД, Е. Л. ГЕНИХОВИЧ,
В. П. ЛОЖКИНА, Р. И. ОНИКУЛ

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ И РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВБЛИЗИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Дается численное решение задачи о турбулентной диффузии невесомой примеси в пограничном слое атмосферы от точечного источника, которое позволяет исследовать условия распространения газов и мелкодисперсной пыли, выбрасываемых из труб промышленных предприятий. Рассматривается ряд методов контроля полученного решения. Приводятся примеры расчета, выполненные с помощью электронной вычислительной машины «Урал-1». Дается анализ полученных результатов.

Введение и постановка задачи

С развитием промышленности и энергетики во многих случаях, если не принять необходимые предупредительные меры, может резко увеличиться количество вредных примесей, поступающих в атмосферу. Это в первую очередь относится к тепловым электростанциям большой мощности, крупным предприятиям металлургической и химической промышленности и др.

Несмотря на определенные достижения в области улавливания вредных выбросов, значительная часть их, в особенности мелкие аэрозоли, не задерживаемые фильтрами, и некоторые газы (такие, как сернистый ангидрид и др.), проникает в атмосферу.

Распространение примесей в атмосфере, их концентрация существенно зависят от метеорологических условий, высоты трубы, мощности и характера выброса. В целях учета метеорологических условий при проектировании предприятий и прилегающих к ним жилых массивов большое значение приобретает расчет распространения взвешенных примесей, поступающих из труб.

Исследованию турбулентной диффузии примеси в атмосфере в последние годы уделяется довольно большое внимание. По этому вопросу имеются обстоятельные обзоры [11, 14, 15], специальные сборники работ и монографии [10, 16].

Однако теория турбулентной диффузии еще недостаточно развита, и в настоящее время для расчета загрязнений атмосферы определяют концентрации примесей на различных расстояниях от труб, используя главным образом эмпирические и полуэмпирические формулы. Так, наиболее распространенный, особенно за рубежом, метод расчета основан на формулах Сеттона [14], в частности, эти формулы приняты основными и в указанной выше монографии [10]. Остановимся поэтому кратко на главных положениях данного метода.

Основываясь на результатах наблюдений, Сеттон прежде всего предположил, что распределение концентрации от точечного источника в разных направлениях можно описать законом Гаусса. Концентрация от мгновенного источника оказывается тогда пропорциональной произведе-

нию множителей вида $\frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma_i}} e^{-\frac{x_i^2}{2\sigma_i^2}}$, где через x_i обозначены координаты x, y, z , так что индексы i , равные 1, 2, 3, последовательно относятся к соответствующей координате; σ_i — дисперсия примеси в направлении оси x_i . Согласно известной теореме Тейлора, σ_i связано с лагранжевым коэффициентом корреляции $R_i(\xi)$ между скоростями одной и той же частицы воздуха в моменты $t - \xi$ и t .

Далее Сеттон задает определенный вид для $R_i(\xi)$ и находит, что $\sigma_i^2 = \frac{1}{2} C_i^2 (\bar{u}t)^{2-n}$, где \bar{u} — средняя скорость ветра, а C_i — некоторые коэффициенты.

Для исследования диффузии при установившихся условиях делается еще одно допущение, согласно которому t можно заменить на $\frac{x}{\bar{u}}$. При этом существенно предположение, что \bar{u} постоянно по высоте.

Вместе с тем Сеттон показал, что при избранной форме для $R_i(\xi)$ должен выполняться степенной закон для изменения скорости ветра с высотой, где показатель степени связан с n . Следовательно, параметр n , необходимый для расчета концентрации, можно определить по вертикальному профилю скорости ветра и косвенно учесть условия стратификации. Однако, как отметил сам Сеттон [14], при этом имеет место определенное противоречие с указанным ранее предположением о постоянстве \bar{u} . Полученные формулы относятся к случаю наземного источника. Для высотного источника Сеттон не выводит формулы, а постулирует их.

Формулы Сеттона в настоящее время рекомендованы Всемирной метеорологической организацией и изложены в технической записке ВМО [19], посвященной оценке загрязнений воздуха вокруг предприятий атомной промышленности. Изменена только методика определения коэффициентов σ_y и σ_z , вместо которых вводится ширина d и высота облака h_1 .

Ширина d определяется из соотношения $\exp\left[-\frac{d^2}{8\sigma_y^2}\right] = 0,1$, что соответствует уменьшению концентрации q на краю облака в 10 раз по сравнению с ее осевым значением. Аналогично из соотношения $\exp\left[-\frac{h_1^2}{8\sigma_z^2}\right] = 0,1$ устанавливается высота облака h_1 . Вместо ширины облака вводится еще угловое расширение θ . На основании обработки данных наблюдений даются значения h_1 и θ для разных метеорологических условий.

Как видно из приведенного рассмотрения, формулы Сеттона основаны на большом числе предположений, которые теоретически недостаточно обоснованы. Так, в них, по существу, постулируется определенный характер пространственной зависимости концентрации, который не всегда, и прежде всего это относится к вертикальному распределению концентрации, соответствует опытным данным. Вследствие быстрого изменения коэффициента турбулентности в приземном слое атмосферы предположение о гауссовом распределении концентрации по высоте совершенно неверно. Задание определенной зависимости концентрации от

координат ведет к тому, что не удовлетворяется дифференциальное уравнение диффузии, определяющее существенные свойства переноса примеси в атмосфере. Формулы Сеттона, следовательно, надо рассматривать как интерполяционные для определенных опытов и справедливые только для условий этих опытов. Применение их для других условий требует специальных доказательств и дополнительного экспериментального материала.

Введенные в формулы коэффициенты C_i недостаточно хорошо известны, мало изучена зависимость их от метеорологических условий (скорости ветра, устойчивости и др.), высоты источника, шероховатости поверхности и др. Поэтому приходится ограничиваться весьма грубым учетом метеорологической обстановки. Вообще в формулах Сеттона некоторые из параметров фактически являются подгоночными. К ним можно, в частности, отнести величину N , аналог молекулярной вязкости ν . Имеются указания [20], что даже при подобранном заранее значении N для условий наземного источника рассчитанные концентрации от источников, расположенных на высоте 100 м и выше, существенно отличаются от фактических.

Несмотря на эти недостатки формул Сеттона, следует указать, что они позволили впервые согласовать расчеты с опытными данными, полученными в Портоне при равновесных условиях [14]. Согласно этим данным, концентрация примесей от наземного точечного источника для расстояний в несколько сот метров убывает пропорционально $\frac{1}{x^{1,76}}$.

Если использовать формулы Сеттона, то при $n = \frac{1}{4}$ следует, что $q \sim \frac{1}{x^{1,75}}$.

Существенно иные результаты следовали из развитой ранее теории Робертса, основой которой явилось решение уравнений турбулентной диффузии при постоянных значениях составляющих коэффициента обмена.

Согласованность с портоновскими данными в основном определила некоторые преимущества работы Сеттона и ее широкое применение для расчета атмосферных загрязнений от источников. Однако использование решения уравнения диффузии для этой цели является физически более обоснованным. При этом важно правильно учесть значения турбулентного обмена. Последующие расчеты в данном направлении, учитывающие изменение коэффициента обмена с высотой, позволили получить формулы, обеспечивающие также согласованность с указанными данными портоновских опытов.

Развитию методов расчета концентрации, основанных на решении уравнений турбулентной диффузии, существенно способствовали работы по исследованию температуры и влажности в приземном слое атмосферы, выполненные в СССР.

В [1] было показано, что нахождение решения типа источника совпадает с построением функции Грина. Следовательно, решение типа источника (главным образом для линейного источника) нетрудно получить исходя из решения задачи по теории трансформации движущейся воздушной массы, которая описывается теми же дифференциальными уравнениями, что и процессы турбулентной диффузии. В этом плане Д. Л. Лайхтманом [9], М. Е. Берляндом [1—3], А. С. Мониним [12] и др. был получен ряд существенных результатов по определению концентрации примеси от источников разных типов.

Интересные исследования по диффузии тяжелой примеси проведены

А. И. Денисовым [6], Л. С. Гаидиным и Р. Э. Соловейчиком [5], И. Л. Каролем [7—8].

Выполнен ряд крупных исследований в этом плане и за рубежом. Основные результаты их содержатся в отмеченных выше работах, а также в [18, 20] и др.

Несмотря на существенные успехи по нахождению аналитического решения дифференциального уравнения, описывающего распространение примеси в атмосфере, следует заметить, что эти решения получены только при значительной стилизации реальных условий в атмосфере. Использование некоторых даже сравнительно простых функций для зависимостей скорости ветра и составляющих коэффициента обмена от высоты приводит к непреодолимым пока трудностям. Так, например, до сих пор не получено решение при логарифмическом профиле скорости ветра, при нарушении степенной или линейной зависимости коэффициента обмена от высоты и т. д.

Сейчас в связи с широким развитием численных методов исследования с применением электронных вычислительных машин для решения дифференциальных уравнений представляется естественным попытаться применить эти методы для преодоления указанных трудностей. Первые работы в данном направлении были недавно выполнены М. Е. Швецом и Л. Р. Арраго при решении задачи о турбулентной диффузии тяжелой примеси. Настоящая статья посвящена дальнейшему развитию этих работ. В ней рассматривается задача о распространении невесомой примеси (газа и мелкой пыли) от высотных источников.

Решение задачи

В качестве исходной системы уравнений в соответствии с [1] примем

$$u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y}, \quad (1)$$

а в качестве граничных условий

$$\text{при } x=0 \quad uq = Q\delta(z-H)\delta(y), \quad (2)$$

$$\text{при } z=0 \quad K_z \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\text{при } x, y, z \rightarrow \infty \quad q \rightarrow 0. \quad (4)$$

Здесь q — концентрация примеси, Q — мощность точечного источника, сосредоточенного в точке $x=y=0, z=H$, $\delta(y)$ — дельта-функция, u — скорость ветра, K_z, K_y — соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие коэффициента обмена; ось x совпадает с направлением среднего ветра u .

Для горизонтального коэффициента обмена K_y примем предложенную М. Е. Берляндом модель, согласно которой K_y пропорционально скорости ветра: $K_y = K_0 u$.

Нетрудно убедиться, что тогда

$$q = \frac{q'(x, z)}{2\sqrt{\pi K_0 x}} e^{-\frac{y^2}{4K_0 x}}, \quad (5)$$

где q' удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$u \frac{\partial q'}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q'}{\partial z} \quad (6)$$

при начальных условиях

$$\text{для } x=0 \quad uq' = Q\delta(z-H), \quad (7)$$

и граничных условиях (3) и (4).

Таким образом, задача свелась к решению 2-мерного уравнения диффузии при заданных значениях u и K_z , q' при этом представляет собой концентрацию от линейного источника.

Задача существенно упростилась, что позволяет при численном решении ее сэкономить машинное время и применять сравнительно мало-мощные электронные вычислительные машины типа «Урал-1».

При применении конечно-разностного метода для решения сформулированной задачи возникают существенные трудности из-за того, что вблизи источника концентрация резко меняется и осложняется выбор шага сетки.

Следуя идее Арраго и Швеца, для преодоления этой трудности используем конечно-разностное решение задачи, начиная со сравнительно небольшого расстояния от источника. До этого расстояния можно ограничиться аналитическим решением упрощенной задачи.

В качестве аналитического решения воспользуемся результатом работы Берлянда [3], согласно которому при $u = u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^n$ и $K = K_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^m$

$$q = \frac{Q(Hz)^{\frac{1-m}{2}} z_1^m}{2(2+n-m)K_1 \sqrt{\pi K_0 x^3}} e^{-\frac{y^2}{4K_0 x} - \frac{u_1 z_1^{m-n} (z^{2+n-m} + H^{2+n-m})}{K_1 (2+n-m)^2 x}} \times \\ \times I_{-\frac{1-m}{2+n-m}} \left[\frac{2u_1 z_1^{m-n} (Hz)^{\frac{2+n-m}{2}}}{K_1 (2+n-m)^2 x} \right]. \quad (8)$$

В случае, когда источник расположен на достаточно большой высоте, где коэффициент обмена не сильно изменяется с высотой, можно применить более простое решение, положив скорость ветра u и коэффициент обмена K постоянными ($n=0$, $m=0$). Тогда

$$q' = \frac{Q}{2\sqrt{\pi K x u}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{4\frac{Kx}{u}}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{4\frac{Kx}{u}}} \right]. \quad (9)$$

Примем, что это решение для q' , выраженное формулами (8) и (9), справедливо до некоторого расстояния x_0 . Для $x > x_0$ заменим исходную систему дифференциальных уравнений конечно-разностной. Введем с этой целью сетку точек с шагом δz по направлению оси z и с шагом δx по направлению оси x . Тогда левая часть уравнения (6) может быть записана в форме

$$u \frac{\partial q'}{\partial x} = u_{i+1, j} \frac{q'_{i+1, j} - q'_{i, j}}{\delta x}.$$

Здесь i — номер шага по направлению оси x , j — номер шага по направлению оси z , причем $i=0$ соответствует $x=x_0$, а $j=0$ соответствует $z=0$, т. е. уровню подстилающей поверхности.

Аналогично может быть преобразована в конечно-разностную форму правая часть уравнения (6). Однако здесь возникают существенные трудности при ее аппроксимации вблизи подстилающей поверхности, где резко изменяется значение коэффициента обмена. Можно, например, указать, что при практически небольших шагах δz , принимаемых для расчета с помощью электронных вычислительных машин (на этом еще остановимся ниже), K_z может изменяться в 1000 раз в пределах одного шага вблизи подстилающей поверхности. Поэтому введение средних величин, постоянных в пределах слоя, естественно, приведет к существенным погрешностям. Аналогичное положение может иметь место и для

других слоев атмосферы, например в случае приподнятой инверсии, так как при этом резко изменяется характер турбулентного обмена.

Вместе с тем можно выбрать достаточно тонкий слой воздуха, в котором сравнительно мало изменяется по вертикали турбулентный поток примеси $K_z \frac{\partial q'}{\partial z}$. Это позволяет ввести некоторый эффективный коэффициент турбулентного обмена, как это было сделано в [13] и в работах по теории речных туманов.

Для слоя между уровнями j и $j+1$ получим тогда

$$K_z \frac{\partial q'}{\partial z} = K_{e_{i(j, j+1)}} \frac{q'_{i, j+1} - q'_{i, j}}{\delta z}.$$

Если, например, предположить, что K_z изменяется линейно в слое воздуха, расположенном между двумя соседними уровнями, от $K_{i, j}$ до $K_{i, j+1}$, то

$$K_e = \frac{K_{i, j+1} - K_{i, j}}{\ln K_{i, j+1} - \ln K_{i, j}}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q'}{\partial z} &= \frac{1}{(\delta z)^2} \left\{ K_{e_{i+1(j-1, j)}} q'_{i+1, j-1} - q'_{i+1, j} \times \right. \\ &\times \left[K_{e_{i+1(j, j+1)}} + K_{e_{i+1(j-1, j)}} \right] + K_{e_{i+1(j, j+1)}} q'_{i+1, j+1} \left. \right\}. \end{aligned}$$

В дальнейшем индекс e при K_e будет опускаться, причем под K будет пониматься эффективное значение коэффициента обмена.

В результате замены указанных дифференциальных соотношений конечно-разностными после соответствующих преобразований уравнение (6) запишется следующим образом:

$$A_{i, j} q'_{i, j+1} - 2B_{i, j} q'_{i, j} + C_{i, j} q'_{i, j-1} = D_{i, j}, \quad (11)$$

где $A_{i, j} = K_{i(j, j+1)}$, $B_{i, j} = \frac{K_{i(j, j+1)} + K_{i(j-1, j)}}{2} + \frac{(\delta z)^2}{2\delta x} u_{i, j}$,

$$C_{i, j} = K_{i(j-1, j)}, \quad D_{i, j} = -\frac{(\delta z)^2}{\delta x} u_{i, j} q'_{i-1, j}.$$

Аналогично запишутся граничные условия на подстилающей поверхности

$$q'_{i0} = P_{i1} q'_{i1} + Q_{i1} \quad (12)$$

и при $z \rightarrow \infty$, т. е. при $j \rightarrow \infty$, $q'_{i, j} \rightarrow 0$. (13)

Согласно начальному условию,

$$\text{при } x = x_0 \quad q'_{0j} = q'(x_0), \quad (14)$$

где q' определяется по формуле (8) или (9).

Для решения сформулированной задачи воспользуемся методом разностной факторизации, эффективно используемым в настоящее время при решении различных задач математической физики. С этой целью перейдем от разностного уравнения (11) второго порядка к разностному уравнению первого порядка

$$q'_{i, j-1} = P_{i, j} q'_{i, j} + Q_{i, j}, \quad (15)$$

где $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$ — некоторые коэффициенты, значения которых находятся из подстановки (15) в (11) и определяются следующими соотношениями:

$$P_{i,j+1} = \frac{A_{i,j}}{2B_{i,j} - C_{i,j}P_{i,j}}, \quad (16)$$

$$Q_{i,j+1} = \frac{C_{i,j}Q_{i,j} - D_{i,j}}{A_{i,j}} P_{i,j+1}. \quad (17)$$

Сущность используемого метода заключается в том, что по заданному условию для q' на нижней границе, в нашем случае на подстилающей поверхности, определяются $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$ для более высоких уровней на основании рекуррентных формул (16), (17), а затем в соответствии с (15) находится искомого решение. Первый этап — нахождение $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$ — представляет собой некую «прогонку» величин с нижней до верхней границы, а второй этап — обратную «прогонку».

Как видно, этот метод (его называют еще методом прогонки) рассчитан в основном на задачи с фиксированными границами, и, как правило, для таких задач он и употребляется. В нашем же случае рассматривается полуограниченная среда. Однако имеется возможность данный метод распространить и на этот случай.

Воспользуемся тем, что по условиям задачи на достаточно больших высотах над источником концентрация с высотой убывает. Положим поэтому, что на некотором $j+1$ уровне $q'_{i,j+1}$ будет меньше заранее заданного значения ε . Тогда, учитывая соотношение (17) и то, что всегда $P_{i,j} < 1$, получим, что $Q_{i,j+2} < 2\varepsilon$.

Следовательно, в процессе прямой прогонки по величине $Q_{i,j}$ можно определить уровень, на котором концентрация становится достаточно малой величиной. На этом уровне, который в данной задаче может рассматриваться как верхняя граница слоя, концентрацию следует положить равной нулю и далее вести обратную прогонку.

В соответствии с изложенной схемой решения задачи была составлена программа для электронной вычислительной машины «Урал-1». Программа была построена так, чтобы исходные данные о начальном распределении по высоте концентрации, скорости ветра и коэффициента обмена K_z вводились в машину в виде таблиц. При этом в случае необходимости ввод данных на каждом шаге мог осуществляться либо по полному объему таблицы, либо по части ее.

Таким образом, программе придается универсальный характер, что позволяет использовать ее в случае решения задач при более общих условиях. Так, она применима для учета изменения входных параметров задачи не только по z , но и по x . Последнее может быть вызвано условиями неоднородности подстилающей поверхности и другими причинами.

Граничные условия на подстилающей поверхности также приняты в общем виде:

$$\text{при } z=0 \quad a(x) \frac{\partial q'}{\partial x} + b(x) q' = c(x),$$

где a, b, c — некоторые функции от x ; в случае граничного условия (3) $a=1, b=c=0$.

Программа пригодна для расчета концентрации как от высотного, так и от наземного источника.

В силу общего характера программы она может быть использована для решения различных задач тепло- и влагообмена в приземном слое

воздуха. В частности, она применима для выполненного ранее численного решения задачи о прогнозе речных туманов.

Одной из существенных задач данной статьи явилось выяснение точности изложенного метода расчета концентрации примеси в атмосфере и контроля вычислений. С этой целью для отдельных характерных случаев, когда применимо аналитическое решение (8), производилось сопоставление результатов численного и аналитического решений. Пример такого сопоставления приводится в заключительной части статьи. Проведенное сравнение дало вполне удовлетворительные результаты.

В работах по численным методам для контроля полученных результатов в случае, когда нет аналитического решения, часто сопоставляют данные расчета, выполненные при разных значениях шагов. При этом имеется в виду, что уменьшение шага ведет к увеличению устойчивости и сходимости процесса вычислений.

Нами также использовался такой способ контроля. При расчетах подбирались такие шаги счета, что с дальнейшим их уменьшением результаты вычислений изменялись относительно мало. Этот способ контроля удобен тем, что позволяет одновременно установить необходимые шаги. Однако он довольно трудоемкий и значительно увеличивает объем вычислений. К тому же следует заметить, что иногда он недостаточен. В связи с этим нами был использован еще один способ контроля вычисленных данных.

Прежде чем изложить этот способ, проинтегрируем левую и правую части уравнения (6) по переменной z в пределах от 0 до ∞ . Учитывая граничные условия и предполагая независимость u от x , получим, что

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} u q' dz = 0. \quad (18)$$

Это означает, что с удалением от источника сохранится величина суммарного потока через вертикальную плоскость. Такой вывод является вполне естественным, поскольку в силу условий задачи нет стока примеси ни на подстилающей поверхности, ни на бесконечности.

Из соотношения (18), преобразованного с учетом использованной выше сетки (i, j) , для $q'_{i,j}$ получим, что

$$\sum_{j=0}^{\infty} u_i q'_{i,j} \delta z = M, \quad (19)$$

где M — постоянная, равная Qu_H , а u_H — скорость ветра на высоте источника.

Соотношение (19), выражающее условие сохранения примеси в атмосфере, очевидно, позволяет контролировать погрешности, возникающие при численном решении задачи. В связи с этим программой предусмотрено вычисление суммы по (19) на каждом шаге по x . Ниже будут указаны результаты вычислений данной суммы, из которых следует, что точность выполненных расчетов достаточно высокая.

Использование различных способов контроля численного решения позволяет выбрать оптимальные значения параметров счета, в том числе указанные выше величины шагов δx и δz , а также x_0 и ϵ .

В соответствии с изложенной схемой решения были произведены расчеты концентрации от линейного источника при единичном расходе $\frac{q'}{Q}$ и величины $s = \frac{2\sqrt{\pi K_0}}{Q} 10^{12} q'$, пропорциональной концентрации от точечного источника (последнюю для удобства будем в дальнейшем называть также концентрацией). Расчеты эти продолжаются, поэтому здесь будут изложены только первые результаты.

Результаты расчетов и их анализ

Рассмотрим сначала случай, когда скорость ветра изменяется с высотой z по логарифмическому закону

$$u = u_1 \frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}},$$

где u_1 — скорость ветра на высоте z_1 , z_0 — шероховатость подстилающей поверхности.

Для вертикальной составляющей коэффициента обмена K_z принято, что она линейно возрастает с z ($K_z = \kappa_0 + K_1 z$) до высоты приземного слоя h , а затем остается постоянной.

В табл. 1 представлены результаты вычислений концентрации s для случая $H = 120$ м, $u_1 = 4$ м/сек., $z_1 = 1$ м, $z_0 = 1$ см, h равно 30, 50 и 100 м. Результаты для случая $h = 50$ м, кроме того, иллюстрируются рис. 1.

Из выполненных расчетов следует, что для всех указанных случаев максимум концентрации по высоте на ближайших расстояниях от источника наблюдается на уровне высоты источника, с увеличением x уровень максимума постепенно понижается.

Концентрация на высоте источника ($z = H$) с увеличением x систематически уменьшается. Наземная же концентрация с увеличением x сначала возрастает, достигая максимального значения s_{\max} при некотором x_{\max} , а затем убывает (рис. 1).

Величины x_{\max} и s_{\max} являются важными характеристиками для учета степени загрязнения атмосферы при проектировании предприятий и окружающих их жилых массивов. При проектировании количества выбросов в атмосферу и высоты труб принимается, что q_{\max} не должны превышать предельно допустимые концентрации вредных примесей в воздухе, а жилые помещения, как правило, должны размещаться за зоной опасных концентраций. Полученные значения x_{\max} и s_{\max} приведены в табл. 1.

Вертикальный профиль концентрации вблизи источника почти симметричен относительно уровня источника (рис. 2, кривая 1). С увеличением x эта симметрия нарушается: убывание концентрации вверх происходит гораздо быстрее, чем вниз (рис. 2, кривая 2), и начиная с некоторого x концентрация убывает с увеличением z от уровня подстилающей поверхности (рис. 2, кривая 3). Это обстоятельство следует иметь в виду при оценке вертикальной протяженности облака, если при-

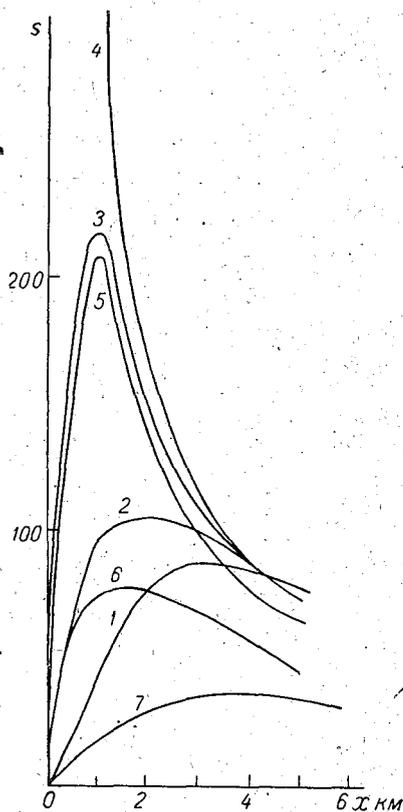


Рис. 1. Зависимость концентрации s от расстояния x на уровнях 0 (1), 40 (2), 80 (3), 120 (4), 160 (5), 200 (6), 240 (7) м.

Таблица 1

z м	x км						z м	x км										
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6					
$h = 30$ м, $x_{\max} = 4,5$ км, $s_{\max} = 72$							160	207	130	94	75	63						
0	20	51	67	70	71	69	200	75	75	65	56	42						
40	56	79	82	79	75	70	240	18	22	36	35	34						
80	217	153	114	98	83	74	280	3	11	16	19	20						
120	394	200	135	103	85	72							$h = 100$ м, $x_{\max} = 2,5$ км, $s_{\max} = 88$					
160	209	147	110	87	73	63	0	60	87	84	78	69						
200	44	62	60	56	50	46	40	123	109	92	78	67						
240	6	16	24	27	28	28	80	206	126	94	76	65						
280	1	3	7	10	13	14	120	230	126	91	72	60						
$h = 50$ м, $x_{\max} = 3,1$ км, $s_{\max} = 86$							160	180	109	81	64	54						
0	43	78	86	82	76	76	200	104	80	65	53	46						
40	98	105	96	86	77	77	240	45	50	45	41	37						
80	217	142	107	89	76	76	280	16	48	31	29	27						
120	306	158	110	86	72	72												

нимать, как в указанных выше зарубежных исследованиях, что концентрация на краю облака составляет $1/10$ осевой.

Представляет интерес определить значение $x = x_1$, начиная с которого концентрация постоянно убывает с удалением от подстилающей поверхности. Для этого следует обратить внимание на то, что вертикальные профили концентрации от точечного и линейного источников подобны, и, следовательно, можно ограничиться рассмотрением случая линейного источника. Вместе с тем, согласно полученному решению, в последнем случае значение x_1 совпадает со значением x_{\max}^l , на котором достигается максимум по направлению ветра для линейного источника. Таким образом, и в случае точечного источника значение x_1 совпадает с x_{\max}^l .

Остановимся далее на зависимости наземной концентрации s от высоты приземного слоя h (рис. 3).

Как видим, характер этой зависимости различен при разных значениях x . Вблизи источника с увеличением h увеличивается наземная концентрация s . С ростом x влияние h сначала уменьшается, а начиная с некоторого x рост h ведет к уменьшению s .

Величина s_{\max} с увеличением h несколько увеличивается, а x_{\max} уменьшается. Следует заметить, что здесь, как и в других случаях, для которых были выполнены расчеты, увеличение x_{\max} , как правило, сопровождается уменьшением s_{\max} . Так, при изменении h от 30 до 50 и 100 м x_{\max} убывает от 4,5 км соответственно до 3,1 и 2,5 км. Таким образом, x_{\max} составляет приблизительно 20—30 H .

В приведенных примерах контрольные суммы M , вычисленные по (19), при изменении x до нескольких десятков километров сохранялись с точностью до сотых долей процента. Это свидетельствует о достаточной строгости численного решения задачи.

Интересно сопоставить с M значение такой же суммы — обозначим ее через M_z — для слоя воздуха толщиной z . Отношение M_z к M может характеризовать в известной мере интегральное загрязнение этого слоя.

Если, например, взять слой воздуха, расположенный между поверхностями $z=0$ и $z=H$ (H — высота источника), то для малых x $M_H = \frac{M}{2}$. С увеличением x M_H постепенно убывает до нуля. Выше уровня $z=H$ соответствующий перенос вещества через вертикальную плоскость, наоборот, с ростом x увеличивается, достигая на бесконечности величины M . Таким образом, с удалением от источника большая часть примеси уносится в верхние слои атмосферы и наземная концентрация уменьшается, приближаясь к нулю.

В табл. 2 приведено значение концентрации s для случая, когда $H=120$ м, $u_1=1$ м/сек., $z_0=1$ см, h равно 30, 50 и 100 м. Высота H здесь сохранена той же, что и в предыдущем случае (120 м), но следует иметь в виду, что с уменьшением скорости существенно увеличивается эффективная высота источника. Следовательно, дан-

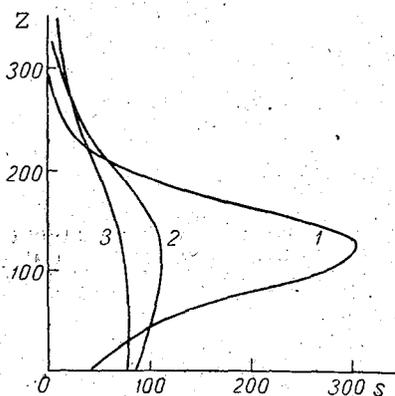


Рис. 2. Вертикальное распределение s на разных расстояниях от источника по ветру.
1 — $x=1$ км, 2 — $x=3$ км, 3 — $x=5$ км.

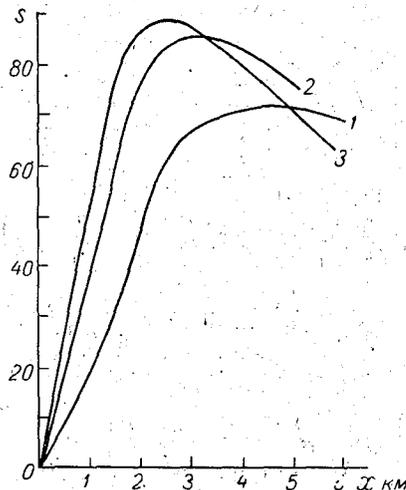


Рис. 3. Распределение s на подстилающей поверхности при разных высотах приземного слоя.
1 — $h=30$ м, 2 — $h=50$ м, 3 — $h=100$ м.

ные табл. 1 и 2 при одном и том же значении H относятся, по существу, к разным высотам трубы.

Из табл. 2 следует, что характер изменения концентрации s в основном такой же, как и в предыдущем случае, представленном в табл. 1. Различия отмечаются в абсолютных величинах s . С ослаблением скорости ветра они существенно увеличиваются. Значительно возрастает с ослаблением скорости ветра s_{\max} , x_{\max} , наоборот, резко уменьшается и составляет $10-20H$.

Влияние высоты источника H на распространение примеси иллюстрируется рис. 4, на котором дана зависимость наземного значения s от x при H , равном 50, 120 и 200 м, когда $u_1=4$ м/сек., $z_0=1$ см, $h=50$ м. На рис. 4 отчетливо видно, что с ростом H концентрация s , в том числе и s_{\max} , резко убывает, а x_{\max} значительно удаляется от источника.

Приведенные выше результаты расчета относятся к случаям «нормального» характера изменения коэффициента обмена с высотой. Однако в пограничном слое атмосферы могут наблюдаться существенно иные вертикальные профили коэффициента обмена. Так, по данным ряда исследований [4, 10 и др.], при наличии приподнятой температурной инверсии резко ослабляется турбулентное перемешивание.

По существующим представлениям [10], если такие слои, характе-

ризующиеся слабым турбулентным обменом, расположены над уровнем источника, они должны приводить к уменьшению переноса примеси вверх и к значительному усилению наземной концентрации примеси. Согласно классификации, рассмотренной в [10], этот случай относится к так называемой задымляющей струе. Количественная оценка данного эффекта может быть проведена только на основании использования численного решения задачи.

Нами был рассмотрен ряд случаев, когда на некоторых высотах значения K_z существенно ослабляются. Исследования условий аномального распространения примеси от источника представляет самостоятельный интерес, поэтому они рассмотрены в отдельной статье.

Остановимся теперь на расчете q в случае степенного закона изменения скорости ветра с высотой и сопоставлении полученных результатов с приведенными выше данными для случая логарифмического профиля ветра. Примем, что

$$u = u_1 z^n.$$

В отношении коэффициента обмена K_z , как и в предыдущем случае, положим, что он линейно растет до высоты h ($K_z = \alpha_0 + K_1 z$), а выше сохраняет постоянное значение.

Следует заметить, что и в этом случае нельзя получить точное аналитическое решение. Последнее обусловлено тем, что на подстилающей

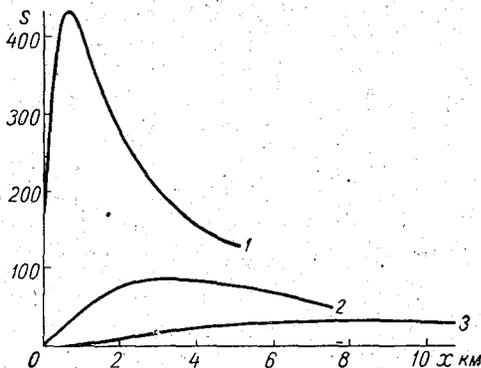


Рис. 4. Распределение s на подстилающей поверхности при различной эффективной высоте трубы.
1 — $H=50$ м, 2 — $H=120$ м, 3 — $H=200$ м.

Таблица 2

z м	x км					z м	x км				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
$h = 30$ м, $x_{\max} = 2,6$ км, $s_{\max} = 380$											
0	290	379	370	336	301	160	688	410	366	244	
40	433	430	385	339	301	200	397	298	289	200	
80	834	542	413	342	295	240	172	184	169	152	
120	1110	596	417	329	251	280	62	99	102	107	
160	801	493	358	286	241						
200	335	303	255	234	192						
240	96	146	151	145	135						
280	22	57	77	86	88						
$h = 50$ м, $x_{\max} = 1,6$ км, $s_{\max} = 434$						$h = 100$ м, $x_{\max} = 1,3$ км, $s_{\max} = 484$					
0	409	421	365	311		0	473	424	344		
40	547	448	446	307		40	589	427	337		
80	747	478	442	298		80	687	418	321		
120	850	475	419	277		120	688	394	300		
						160	593	350	269		
						200	432	289	228		
						240	269	221	183		
						280	143	154	136		

поверхности скорость ветра обращается в нуль, а K_z принимает значение коэффициента молекулярной диффузии воздуха.

Пример расчета s для случая $H=120$ м, $u_1=1$ м/сек. при разных значениях h представлен в табл. 3. Там же указаны соответствующие значения максимальной наземной концентрации s_{\max} и расстояние x_{\max} , на котором достигается максимум.

Таблица 3

z м	x км						
	1	2	3	4	5	6	7
$h = 30$ м, $x_{\max} = 2,6$ км, $s_{\max} = 311$							
0	195	306	310	292	269	247	227
40	320	356	329	298	271	246	225
80	715	476	372	312	275	244	222
120	1040	548	391	313	267	235	212
160	713	466	348	283	232	215	195
200	206	249	231	210	192	177	165
240	15	51	78	94	102	105	105
280		1	3	6	10	14	18
$h = 50$ м, $x_{\max} = 1,9$ км, $s_{\max} = 358$							
0	302	356	313	272	235	206	183
40	431	383	318	269	231	202	179
80	648	415	318	261	223	195	172
120	776	417	302	243	206	179	159
160	591	353	261	211	179	158	141
200	290	242	196	166	145	131	119
240	103	132	127	118	109	101	94
280	27	60	72	85	75	73	71
$h = 100$ м, $x_{\max} = 1,5$ км, $s_{\max} = 367$							
0	350	342	278	227	190	162	141
40	460	351	273	221	184	157	137
80	575	351	262	210	175	150	131
120	589	333	244	196	164	141	124
160	493	291	217	176	149	129	114
200	330	232	181	151	130	115	103
240	181	166	141	124	109	98	89
280	85	107	102	94	88	81	75

Сопоставление табл. 2 и 3 показывает, что при степенном законе для скорости ветра значения концентрации оказываются систематически заниженными. Полученные различия в величинах s достигают 20—30%. Примерно на столько же меньше и значения s_{\max} из табл. 3. Увеличиваются при этом и соответствующие величины x_{\max} .

Полученные результаты объясняются тем, что при использовании степенной и логарифмической зависимостей для скорости ветра принято одно и то же значение u_1 , т. е. скорости ветра на высоте 1 м. Для более высоких уровней скорость ветра u , рассчитанная по степенному закону, оказывается большей, чем по логарифмическому. Например, в рассматриваемых случаях, на высоте источника $H=120$ м, превышение u

составляет около 30%. Таким образом, переход к степенному закону связан с учетом больших скоростей ветра, что и приводит к занижению концентрации.

Расчеты были также выполнены для случая, когда скорости ветра, вычисленные по логарифмическому и степенному законам, совпадали на уровне источника. При этом условии оказалось, что различие в значениях s меньше, но все же существенно. Это обстоятельство важно учитывать при попытке приближенно заменить логарифмический профиль скорости ветра степенным, как это, например, сделано в работе Колдера [17].

Кроме того, проведено сопоставление вычисленных величин s с результатами расчета по аналитическому решению (8), соответствующее линейному возрастанию K_z с высотой и степенному возрастанию скорости ветра с z . Результаты, полученные по численному и аналитическому решениям, хорошо согласуются между собой. Пример такого сопоставления при $H=200$ м и $u_1=4$ м/сек. дан в табл. 4. Расхождение в s , как видно, незначительное. Оно несколько больше на близком расстоянии, но там сами концентрации невелики.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности численного решения уравнения турбулентной диффузии и исследования условий загрязнения атмосферы вблизи промышленных предприятий.

Таблица 4

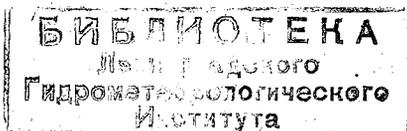
x км	2	3	4	5	6	7	8	9
Численное решение	14	20	23	24	23	22	21	20
Аналитическое решение	9	18	23	24	23	22	21	20

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е. Определение коэффициента турбулентного обмена по очертанию дыма от промышленных труб. Метеорол. и гидрол., № 6, 1961.
2. Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Гидрометеоздат, Л., 1961.
3. Берлянд М. Е. К теории турбулентной диффузии (см. наст. сборник).
4. Воронцов П. А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Гидрометеоздат, Л., 1960.
5. Гандин Л. С., Соловейчик Р. Э. О распределении дыма из фабричных труб. Труды ГГО, вып. 77, 1958.
6. Денисов А. И. О распространении пыли и газов из дымовых труб. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 6, 1957.
7. Кароль И. Л. О гипотезе квазистационарного приземного слоя в теории турбулентной диффузии тяжелого аэрозоля в пограничном слое атмосферы. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1960.
8. Кароль И. Л., Прессман А. Я. О рассеянии тяжелой монодисперсной примеси в турбулентной атмосфере на большом расстоянии от мгновенного точечного источника. Инж.-физ. журн., т. 2, № 9, 1959.
9. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Гидрометеоздат, Л., 1961.
10. Метеорология и атомная энергия. ИЛ, М., 1959.
11. Монин А. С. Атмосферная диффузия, Успехи физ. наук, т. 67, вып. 1, 1959.
12. Монин А. С. Полуэмпирическая теория турбулентной диффузии. Труды Геофиз. ин-та АН СССР, № 33 (160), 1956.
13. Оникул Р. И. О решении задач тепло- и влагообмена в нижних слоях атмосферы методом сеток. Труды Координационной комиссии по численным методам прогноза погоды. Гидрометеоздат, Л., 1961.
14. Сеттон О. Г. Микрометеорология. Гидрометеоздат, Л., 1958.

- ✓ 15. Халтинер Дж., Мартин Ф. Динамическая и физическая метеорология. ИЛ, М., 1960.
16. Atmospheric diffusion and air pollution. Proc. of Symposium held at Oxford Aug. 24—29 1958. Acad. Press., № 4, London, 1959.
17. Collier K. L. Eddy diffusion and evaporation in flow over aerodynamically smooth and rough surfaces. Quart. J. Mech. appl. Math., 2, 1949.
18. Godson W. L. The diffusion of particulate matter from an elevated source. Archiv für Meteorologie, Geodyn. u. Bioclimat. (A), Bd. 10, H. 4., 1959.
- ✓ 19. Meteorological aspects of the peaceful uses of atomic energy. Part 1, W. M. O. Tech. note, No 33, 1960.
20. Rounds W. Solutions of the two-dimensional diffusion equations. Trans. Amer. Geoph. Union, 36, 395—405, 1955.

179629



Б. Б. ГОРОШКО, В. П. ГРАЧЕВА, Г. П. РАСТОРГУЕВА,
Б. В. РИХТЕР, Г. А. ФЕДОРОВА

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА

Рассматривается программа метеорологических наблюдений в целях изучения условий распространения выбросов промышленных предприятий, а также результаты экспедиционных работ в районе Щекинской ГРЭС осенью 1961 г. В программу наблюдений вошли градиентные измерения, включающие измерения температуры и влажности воздуха и скорости ветра на высотах от 0,2 до 17 м, температуры почвы на глубинах до 20 см, а также актинометрические наблюдения. Приводятся средние данные метеорологических элементов и результаты расчетов коэффициента турбулентного обмена разными методами.

В последнее время во многих местах ведутся экспериментальные исследования загрязнения атмосферы воздуха выбросами различных предприятий. Обычно при этом для определения метеорологических условий ограничиваются измерением скорости ветра, а иногда и температуры воздуха на одном уровне. Вместе с тем перенос примесей в атмосфере существенно зависит от турбулентного обмена, для оценки которого необходим значительно более полный комплекс метеорологических элементов.

Вопрос об уточнении метеорологических условий встает сейчас особенно остро в связи с ростом крупных предприятий и электростанций, опасность загрязнения атмосферы вокруг которых может существенно увеличиться, если не предпринять необходимые предупредительные меры.

В настоящее время начаты специальные исследования по определению метеорологических условий вокруг Щекинской ГРЭС. Электростанция расположена в характерных условиях рельефа Средне-Русской возвышенности в долине реки. Долина ориентирована почти в меридиональном направлении. Непосредственно у станции имеется водохранилище, берега которого представляют собой склоны холмов высотой 30—50 м. В непосредственной близости от электростанции лесов нет, если не считать небольшие рощи. Около 80% поверхности холмов распаханно под полевые культуры, и лишь низменные части покрыты травянистой растительностью. Почва района — чернозем, местами в низинах глина и выходы известняков. В районе имеется несколько населенных пунктов, ближайшие из которых расположены в 1—3 км к юго-востоку и юго-западу от электростанции.

В соответствии с поставленной задачей основное внимание уделялось получению характеристик турбулентного обмена в пограничном слое

атмосферы. В связи с этим проводился по возможности более полный комплекс наблюдений, включающий стационарные и экспедиционные измерения, позволяющие определить характеристики турбулентного обмена различными способами и тем самым обеспечить контроль полученных выводов.

Экспедиционные работы велись в период, когда измерялась наземная концентрация сернистого газа и пыли по факелу от труб электростанции. Они проводились Главной геофизической обсерваторией совместно с Московским НИИ гигиены, Всесоюзным теплотехническим институтом и трестом ЮжОРГРЭС. Здесь приводятся результаты только метеорологических наблюдений.

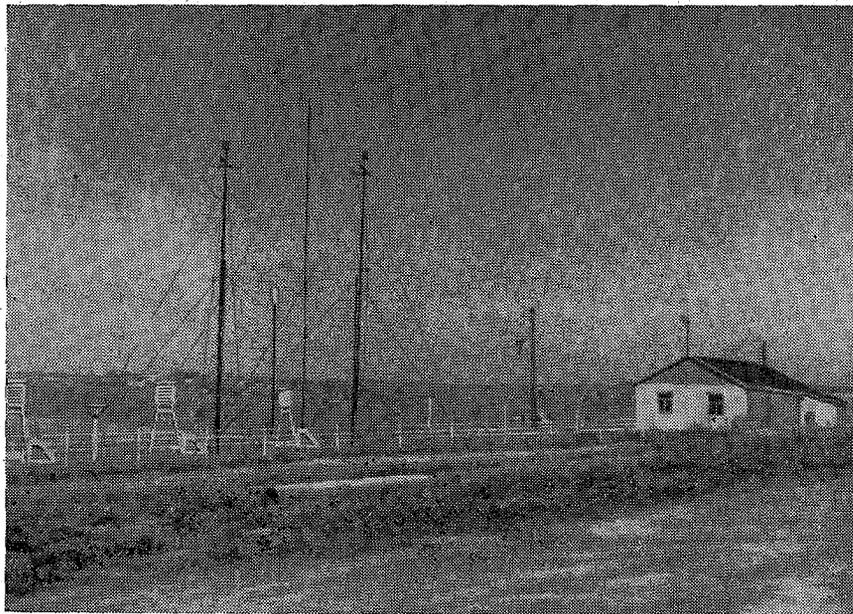


Рис. 1. Общий вид площадки для наблюдений.

Эти наблюдения позволят установить метеорологические условия загрязнения атмосферы и сопоставить результаты расчета с экспериментальными данными.

Стационарные наблюдения должны дать необходимые метеорологические данные для расчета концентрации вредных примесей в воздухе в период, когда непосредственные измерения ее не производились.

Площадка для наблюдений расположена в открытой местности на холме, у основания которого на расстоянии примерно 1 км находится ГРЭС. Разница уровней составляла примерно 40 м.

Площадка во время работы, в сентябре—октябре, была покрыта редкой травой высотой 3—5 см. Размер площадки, на которой были установлены приборы, составлял 70×20 м. Общий вид ее дан на рис. 1.

В период экспедиции программа объединяла стационарные и экспедиционные наблюдения и включала градиентные и балансовые измерения.

В соответствии с программой градиентных наблюдений производились измерения скорости ветра, температуры и влажности воздуха, а также температуры почвы на различных глубинах.

Скорость ветра измерялась контактными анемометрами, установленными на высотах 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,2; 9,7; 11,7; 16,0 м, при этом анемометры до высоты 2,0 м устанавливались на шестах, а выше — на телескопической мачте, где они укреплялись на кронштейнах. Показания анемометров отсчитывались по электромагнитным счетчикам.

Для измерения температуры и влажности воздуха использовались психрометры Ассмана, в которых обычные термометры были заменены термометрами сопротивления. Сопротивление термометров измерялось равновесным мостом Уитстона. Психрометры были установлены на уровнях 0,5; 2,0; 4,8; 9,7 и 16,7 м, причем до высоты 2,0 м они укреплялись на шестах, а выше — на второй телескопической мачте. Кроме того, параллельно температура и влажность воздуха измерялись обычными психрометрами Ассмана, установленными на высотах 0,25; 0,5 и 2,0 м. На уровнях 0,25 и 0,5 м психрометры располагались горизонтально, а на высоте 2,0 м — вертикально.

Температура почвы измерялась термометрами сопротивления (той же конструкции, что и для измерения температуры воздуха), установленными на глубинах 2, 5, 15, 20 см и на поверхности почвы. Параллельно на тех же глубинах температура измерялась савиновскими термометрами, а температура поверхности почвы — еще срочным термометром.

Балансовые наблюдения включали определение испарения с почвы и актинометрические измерения.

Испарение измерялось с помощью микроиспарителей, которые представляют собой цилиндрические металлические сосуды диаметром 1,2 см и высотой 7,0 см. Ежедневно, перед каждым сроком наблюдений, испарители заполнялись почвой, при этом структура почвы по возможности не нарушалась. Микроиспарители выставлялись на площадку на каждый час, в течение которого производились градиентные и балансовые наблюдения.

Для актинометрических наблюдений на площадке были установлены термоэлектрические приборы: актинометр, пиранометр и балансомер, с помощью которых определялись радиационный баланс подстилающей поверхности, прямая солнечная радиация на перпендикулярную и горизонтальную поверхности, отраженная коротковолновая радиация, рассеянная и суммарная радиация, а также альbedo и эффективное излучение земли.

Наблюдения производились с 12 сентября по 12 октября 1961 г. В сентябре наблюдения велись только в дневные часы, в основном в период, когда измерялась концентрация (в сроки 9 час. 30 мин. — 10 час. 30 мин., 11 час. 30 мин. — 12 час. 30 мин., 13 час. 30 мин. — 14 час. 30 мин., 15 час. 30 мин. — 16 час. 30 мин.).

В целях расчетов загрязнения атмосферы при условиях, когда не производилось непосредственное измерение концентраций пыли и газа, производились круглосуточные серии наблюдений с интервалом в 1 час. Они ставились ежедневно со 2 по 12 октября, а также 25—26 сентября.

После окончания работы экспедиции продолжались регулярные наблюдения на станции. Программа этих наблюдений включала определение направления ветра самописцем М-12, измерение скорости ветра контактными анемометрами на высотах 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 м, температуры воздуха на высотах 0,25; 0,5; 2,0 м (психрометрами Ассмана) и 0,5; 2,0 м (термометрами сопротивления), температуры почвы на поверхности и на глубинах 2, 5, 10, 15, 20 см термометрами сопротивления, актинометрические наблюдения по балансомеру, пиранометру, актинометру и визуальные наблюдения за облачностью, видимостью, атмосферными явлениями.

В первые дни работы экспедиции (12—15 сентября) погода преимущественно обуславливалась влиянием обширного циклона с рядом центров и фронтами, связанными с этим циклоном. Начиная с 15 сентября над центральной частью Европейской территории СССР началось антициклоническое преобразование, в результате которого установилась общая полоса высокого давления, вытянутая с запада на восток.

С 18 сентября малоподвижная область высокого давления потеряла свое самостоятельное значение и превратилась в отрог вновь сформировавшегося более мощного и развивающегося антициклона над Сканди-

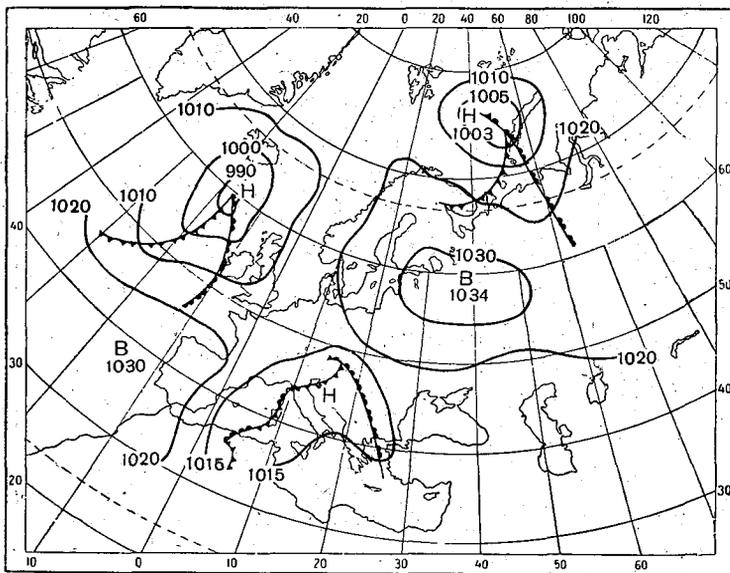


Рис. 2. Синоптическая карта за 15 час. 1/X 1961 г.

навским полуостровом. Однако до 20 сентября район экспедиции оставался под влиянием проходящих размытых фронтов, которые обуславливали облачную погоду.

В дальнейшем антициклон со Скандинавского полуострова, усиливаясь, начал смещаться в юго-восточном направлении, и его влияние распространилось на район экспедиции.

С 20 сентября по 12 октября погода обуславливалась влиянием указанного антициклона (рис. 2 и 3), поэтому наблюдалась преимущественно малооблачная погода, иногда с плохой видимостью.

Малооблачной считалась погода, когда в срок наблюдений верхняя и средняя облачность не превышала 7 баллов, нижняя — 3—4 баллов.

При обработке актинометрических наблюдений принималась во внимание отметка состояния диска Солнца (\odot^0 , \odot , \odot^2 , П). При верхней и средней облачности 8—10 баллов и нижней облачности больше 6 баллов погода считалась пасмурной.

Результаты всех наблюдений были сведены в таблицы и найдены средние за 1 час значения измеренных метеорологических элементов.

Остановимся сначала на результатах актинометрических наблюдений, производившихся с 9 до 16 час., т. е. в период, когда измерялась концентрация примесей в атмосфере. Величина суммарной радиации Q в эти часы изменялась в пасмурные дни от 0,05 до 0,40 кал/см² мин.,

в малооблачные дни — от 0,2 до 1,0 кал/см² мин. При этом величина прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность S' изменялась от 0,1 до 0,9 кал/см² мин., а величина прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность S — от 0,3 до 1,3 кал/см² мин. Значение радиационного баланса B подстилающей поверхности изменялось от 0 до 0,9 кал/см² мин. В среднем радиационный баланс составлял 0,15 кал/см² мин. в пасмурные дни и 0,30 кал/см² мин. в малооблачные.

Дневной ход осредненных за период экспедиции значений прямой, суммарной радиации и радиационного баланса, вычисленных для пасмурных и ясных дней, представлен на рис. 4. Как видно, максимальное

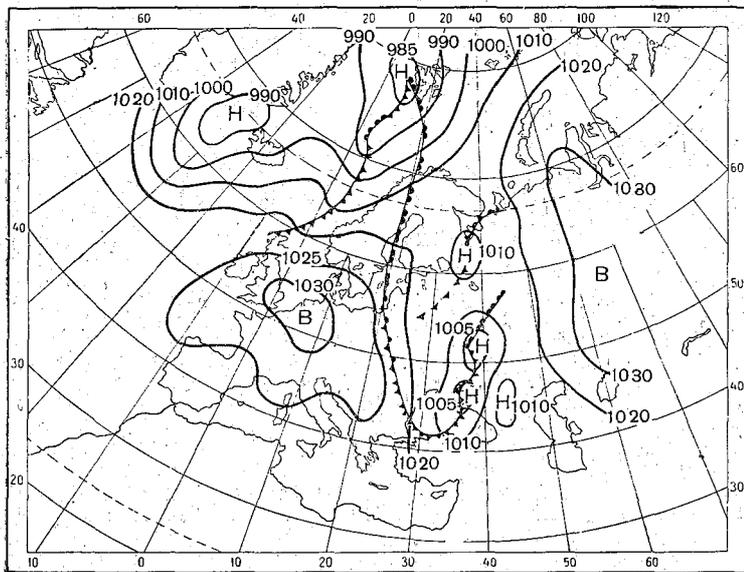


Рис. 3. Синоптическая карта за 9 час. 14/X 1961 г.

значение всех этих величин наблюдается в 11—12 час. В пасмурные дни суммарная радиация и радиационный баланс изменяются сравнительно мало, амплитуда их значений не превышает 0,15 кал/см² мин. В ясные дни амплитуда и максимальные значения Q и B в 3 раза больше, чем в пасмурные. По данным наблюдений, альbedo в среднем было равно 0,18, в отдельных случаях оно составляло 0,14—0,30.

Эффективное излучение E за наблюдаемый период изменялось в среднем от 0,08 до 0,18 кал/см² мин. Поскольку эффективное излучение в дневные часы определялось как остаточный член уравнения радиационного баланса, целесообразно было сравнить полученные величины с результатами расчетов E . С этой целью были проведены вычисления E методом М. Е. Берлянда и Т. Г. Берлянд [1] по данным о температуре и влажности воздуха на высоте 2,0 м и разности температур воздух—почва. Результаты расчетов и наблюдений согласуются между собой.

Перейдем теперь к градиентным наблюдениям. По средним данным за каждый час были построены профили температуры и влажности воздуха, температуры почвы, а также скорости ветра. Все профили выполнены в полул로그арифмическом масштабе. Построенные профили позволили произвести контроль за качеством наблюдений, проанализировать

материал и сопоставить синхронные наблюдения за одним и тем же элементом с помощью различных приборов. Кроме того, были построены средние профили величин метеорологических элементов для случаев малооблачной и пасмурной погоды.

На рис. 5 и 6 представлены средние профили скорости ветра за малооблачные и пасмурные дни. Профили за пасмурные дни в сроки от 18 до 8 час. построены только по двум имеющимся серийным наблюдениям. Как видно, в среднем скорость ветра хорошо укладывается в пределы логарифмического распределения. В большинстве случаев отклонение значений от прямых не превышает 0,1–0,2 м/сек., и лишь в отдельных случаях максимальное отклонение составляет 0,3 м/сек.

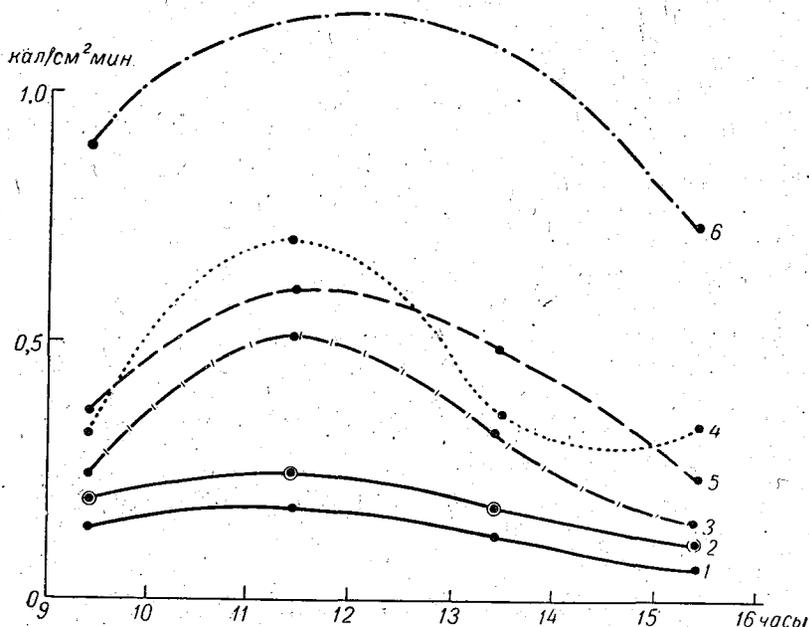


Рис. 4. Дневной ход составляющих радиационного баланса при малооблачной (B_{\odot} , Q_{\odot} , S_{\odot}) и пасмурной ($B_{п}$, $Q_{п}$, $S_{п}$) погоде.

1 — $B_{п}$, 2 — $Q_{п}$, 3 — B_{\odot} , 4 — Q_{\odot} , 5 — $S_{п}$, 6 — S_{\odot} .

Средние значения скорости ветра в малооблачную погоду изменяются от 0,5 до 2,5 м/сек. на высоте 0,25 м и от 1,5 до 3,5 м/сек. на высоте 16,0 м, в пасмурную погоду — от 1,5 до 3,0 м/сек. на нижнем уровне и от 3,0 до 5,0 м/сек. на верхнем уровне.

Наибольшая скорость ветра на самом верхнем уровне (16,0 м), по срочным наблюдениям, равнялась 6,0 м/сек. в ясную и 11,0 м/сек. в пасмурную погоду.

В табл. 1 и 2 представлены данные по суточному ходу скорости ветра, осредненной за малооблачные и пасмурные дни, на различных высотах. Как видно из таблиц, максимум скорости ветра на всех высотах наблюдался в период от 12 до 16 час., минимум — в 22–24 часа.

Средняя амплитуда суточного хода скорости ветра A в малооблачные дни на всех высотах примерно одинакова и равна 1,9–2,3 м/сек. В пасмурные дни до высоты 1,0 м сохраняется амплитуда около 2,0 м/сек., а начиная с 2,0 м она увеличивается до 3,5 м/сек.

Как отмечалось выше, измерение температуры и влажности на

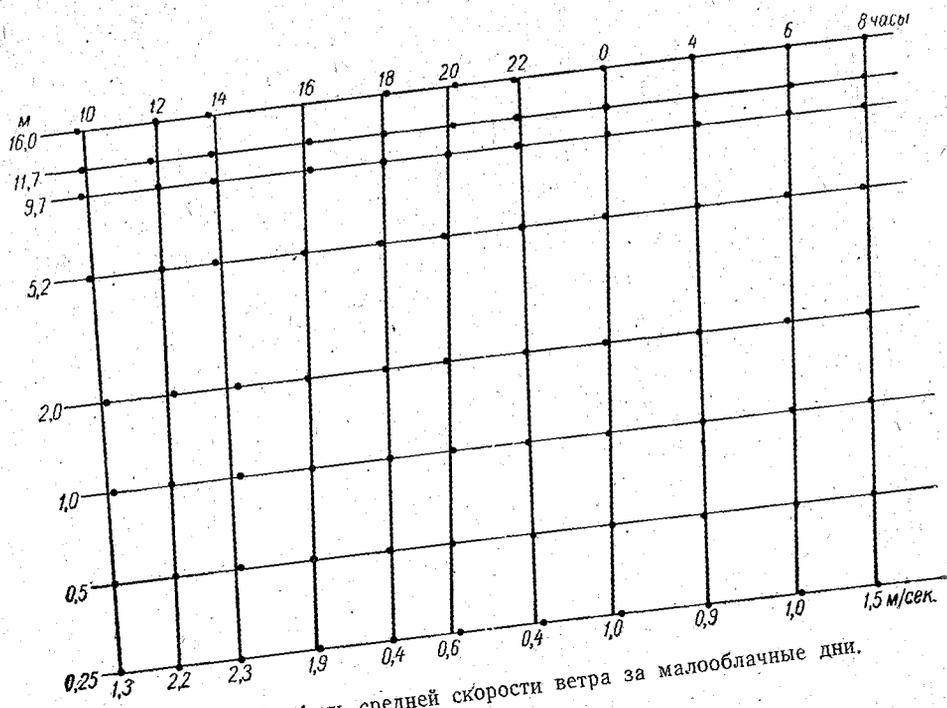


Рис. 5. Профиль средней скорости ветра за малооблачные дни.

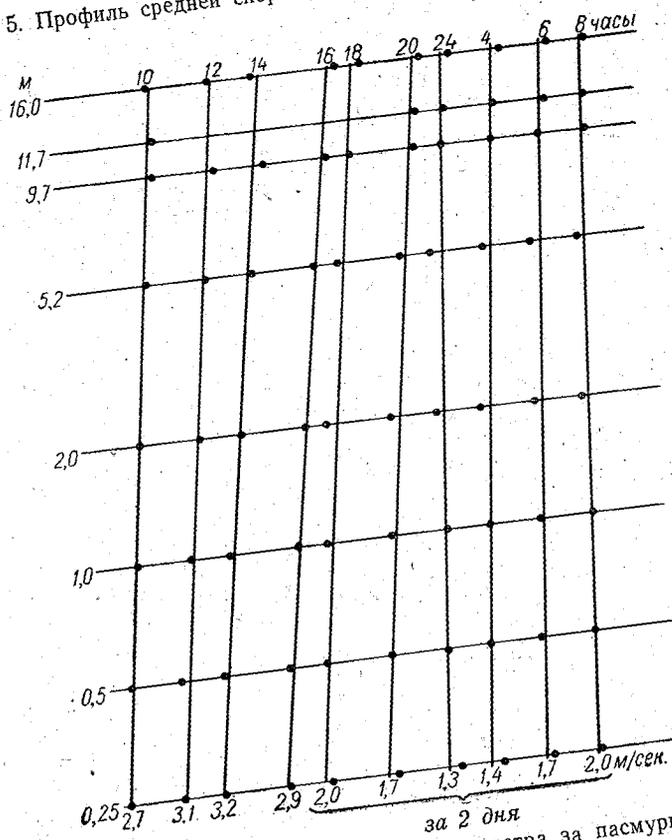


Рис. 6. Профиль средней скорости ветра за пасмурные дни.
за 2 дня

Таблица 1

Суточный ход скорости ветра (м/сек.) при малооблачной погоде

z м	Часы											А
	10	12	14	16	18	20	22	0	4	6	8	
0,25	1,3	2,2	2,3	1,9	0,4	0,6	0,4	1,0	0,9	1,0	1,5	1,9
0,5	1,4	2,4	2,6	2,1	0,6	0,7	0,4	1,0	1,0	1,1	1,7	2,2
1,0	1,7	2,7	2,9	2,3	0,9	1,0	0,6	1,2	1,3	1,3	1,9	2,3
2,0	1,8	3,0	3,2	2,5	1,2	1,2	0,9	1,4	1,5	1,5	2,1	2,3
5,2	1,7	3,1	2,9	2,9	1,4	1,6	1,2	1,9	2,0	1,9	2,4	1,9
9,7	1,7	3,3	3,1	3,3	1,8	2,0	1,4	2,3	2,3	2,3	2,8	1,9
11,7	1,8	3,1	3,2	3,4	1,9	2,2	1,4	2,3	2,3	2,5	2,9	2,0
16,0	1,8	3,4	3,2	3,4	2,1	2,4	1,4	2,4	2,3	2,5	3,1	2,0

Таблица 2

Суточный ход скорости ветра (м/сек.) в пасмурные дни

z м	Часы										
	10	12	14	16	18	20	0	4	6	8	
0,25	2,7	3,1	3,2	2,9	2,0	1,7	1,3	1,4	1,7	2,0	
0,5	3,1	3,4	3,5	3,2	2,2	1,8	1,3	1,4	1,7	2,1	
1,0	3,6	4,0	4,0	3,8	2,5	2,2	1,6	1,7	2,0	2,4	
2,0	4,0	4,5	4,6	4,3	2,8	2,5	1,7	1,8	2,2	2,4	
5,2	4,6	5,2	5,4	5,0	3,6	3,2	2,0	2,4	2,6	2,8	
9,7	5,1	5,7	6,0	5,6	4,2	3,9	2,6	2,9	3,1	3,3	
11,7	5,2	5,7	6,0	5,8	4,4	4,1	2,8	3,1	3,4	3,4	
16,0	5,2	5,8	6,0	6,1	4,7	4,3	3,0	3,4	3,6	3,6	

высотах 0,5 и 2,0 м производилось параллельно психрометрами Ассмана и термометрами сопротивления. Сопоставление значений температуры и влажности, полученных по обоим приборам, показало, что разность между ними невелика (табл. 3 и 4), и в дальнейшем вся обработка материала производилась по данным термометров сопротивления.

Таблица 3

Средние разности значений температуры воздуха (град.) по термометрам сопротивления и психрометрам Ассмана на высотах 0,5 и 2,0 м

z м	Часы										
	10	12	14	16	18	20	22	0	4	6	8
0,5	0,1	0,5	0,5	0,4	0,3	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,5	0,1
2,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,2	-0,2	0,0	-0,3	0,1

Таблица 4

Среднемесячные разности значений влажности воздуха (мб)
по термометрам сопротивления и психрометрам Ассмана на высотах 0,5 и 2,0 м

z м	Ч а с ы										
	10	12	14	16	18	20	22	0	4	6	8
0,5	0,9	0,8	1,0	0,7	0,8	1,3	0,6	0,8	0,7	0,6	0,6
2,0	0,5	0,6	0,8	1,2	1,8	1,6	0,7	0,8	0,6	0,4	0,9

В табл. 5 представлены данные по суточному ходу температуры воздуха на всех высотах. Поскольку в дни серийных наблюдений отмечалась преимущественно малооблачная погода, для пасмурных дней оказалось возможным проследить лишь дневной ход температуры на различных высотах. Данные для пасмурных дней представлены в табл. 6.

Таблица 5

Суточный ход температуры воздуха (град.) при малооблачной погоде

z м	Ч а с ы											A
	10	12	14	16	18	20	22	0	4	6	8	
0,5	7,7	13,1	13,7	12,7	8,8	6,3	4,9	4,4	2,7	2,1	3,4	11,6
2,0	6,9	11,9	12,1	12,0	9,6	7,1	5,2	4,8	3,4	2,6	3,4	10,3
4,8	7,0	11,0	11,5	11,8	9,9	7,6	5,6	5,3	4,5	3,0	3,6	9,0
9,7	7,0	11,5	11,5	11,8	10,2	8,2	6,0	5,6	4,3	3,2	3,7	9,3
16,7	6,9	11,3	11,2	11,4	10,3	8,7	6,6	6,0	4,2	3,3	3,8	9,0

Как видно из табл. 5, суточная амплитуда температуры воздуха в ясные дни на высотах 0,5 и 2,0 м равна 10—12°, выше 2,0 м — 9,0—9,5°. Дневная амплитуда в пасмурные дни невелика и составляет на всех высотах 2,0—2,5°.

Таблица 6

Дневной ход температуры
воздуха (град.) в пасмурные дни

z м	Ч а с ы			
	10	12	14	16
0,5	10,0	12,0	12,7	12,2
2,0	9,4	11,3	11,9	11,8
4,8	9,4	11,2	11,8	11,6
9,7	9,4	11,2	11,7	11,6
16,7	9,1	10,8	11,6	11,3

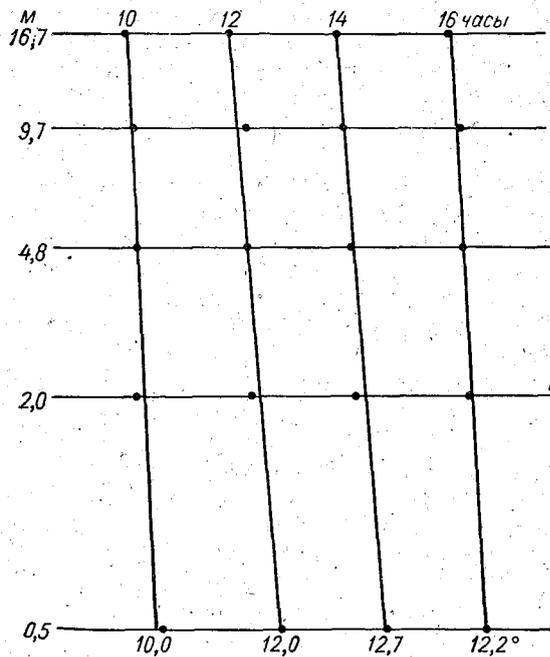


Рис. 7. Профиль средней температуры воздуха за пасмурные дни.

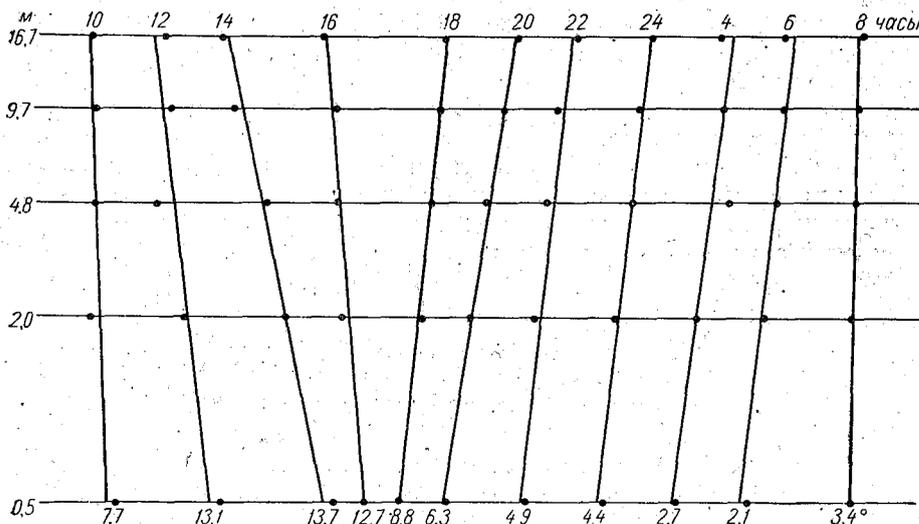


Рис. 8. Профиль средней температуры воздуха при малооблачной погоде.

Максимальное значение температуры воздуха в малооблачные и пасмурные дни наблюдалось в 14 час. и составляло 13,7° на высоте 0,5 м и 11,3° на высоте 16,7 м при малооблачной погоде. В пасмурные дни максимум прослеживается слабо и составляет 12,7° на высоте 0,5 м и 11,6° на высоте 16,7 м. Минимум при малооблачной погоде наблюдается перед восходом солнца, около 6 час. По осредненным за пасмурные и ясные дни значениям температуры построены профили (рис. 7 и 8). Из приведенных рисунков видно, что в среднем с точностью до 0,3° температура на всех высотах укладывается в прямые логарифмического профиля.

Разности температур между высотами 0,5 и 2,0 м достигали 0,8—1,2° днем и —0,4, —0,8° ночью в малооблачную погоду и 0,2—0,4° днем и 0,0, —0,2° ночью в пасмурные дни.

Аналогичной обработке подверглись наблюдения за влажностью. Из полученных данных следует, что суточный ход влажности прослеживается слабо. Его амплитуда в среднем за ясные дни на всех высотах колеблется от 0,5 до 1,5 мб.

Максимальное значение абсолютной влажности, по тем же средним данным, наблюдается на высоте 0,5 м и равно 8,4 мб; с высотой она уменьшается.

В пасмурные дни абсолютная влажность выше, чем при малооблачной погоде, и равна днем 11—12 мб на высоте 0,5 м и 9,5—10,5 мб на высоте 9,7 м.

По средним значениям абсолютной влажности за пасмурные и малооблачные дни построены вертикальные профили (рис. 9 и 10).

По построенным профилям ветра при условиях, близких к равновесным, определялась шероховатость подстилающей поверхности. За равновесные принимались условия, когда параметр $\frac{\Delta T}{u_1^2}$ (где ΔT — разность температур воздуха на уровнях 0,5 и 2,0 м, u_1 — скорость ветра на высоте 1 м), характеризующий состояние устойчивости, по абсолютной величине был равен или меньше 0,05. Среднее значение параметра шероховатости подстилающей поверхности оказалось равным примерно 1 см.

Для характеристики турбулентного обмена по данным наблюдений за каждый час в дневное время рассчитаны значения коэффициентов турбулентности на высоте 1 м различными методами по градиентным наблюдениям, согласно [2, 3, 5], и методом теплового баланса [3, 4]. Результаты расчетов представлены в табл. 7 и 8, где даны средние значения коэффициента турбулентности для пасмурной (табл. 7) и малооблачной (табл. 8) погоды.

Таблица 7
Средние значения коэффициента турбулентности (м²/сек.)
на высоте 1 м в пасмурные дни

	Часы			
	10	12	14	16
По методу М. И. Будыко	0,13	0,14	0,14	0,12
По методу Д. Л. Лайхмана	0,14	0,11	0,17	0,12
По методу М. П. Тимофеева	0,12	0,12	0,11	0,10
По методу теплового баланса	—	0,12	0,05	0,06

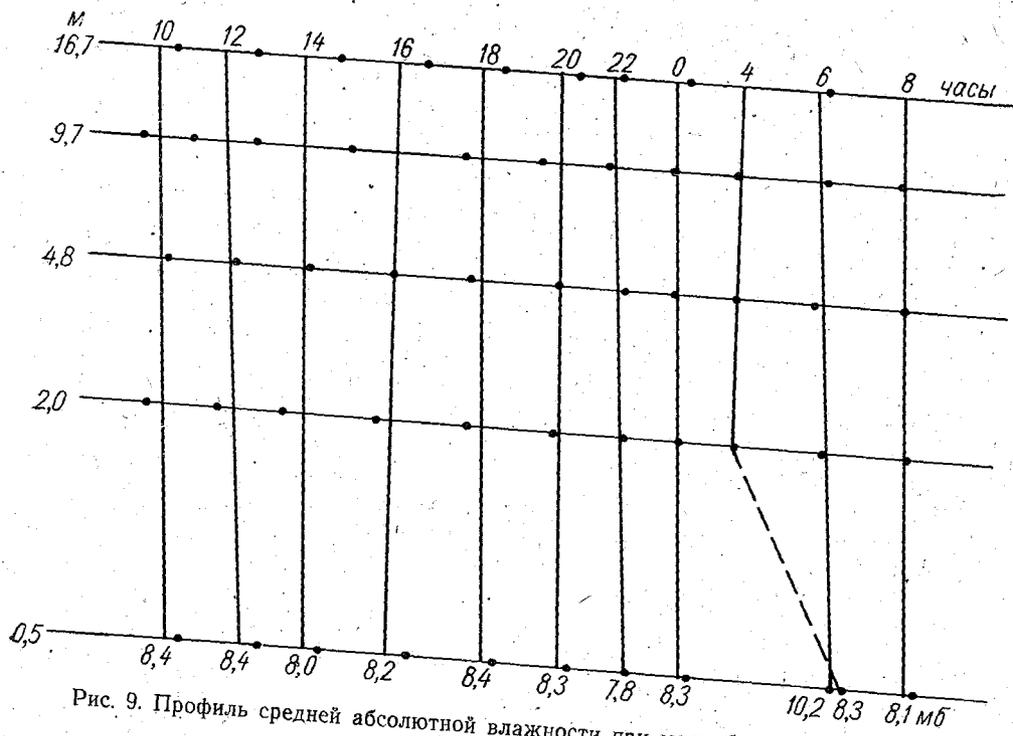


Рис. 9. Профиль средней абсолютной влажности при малооблачной погоде.

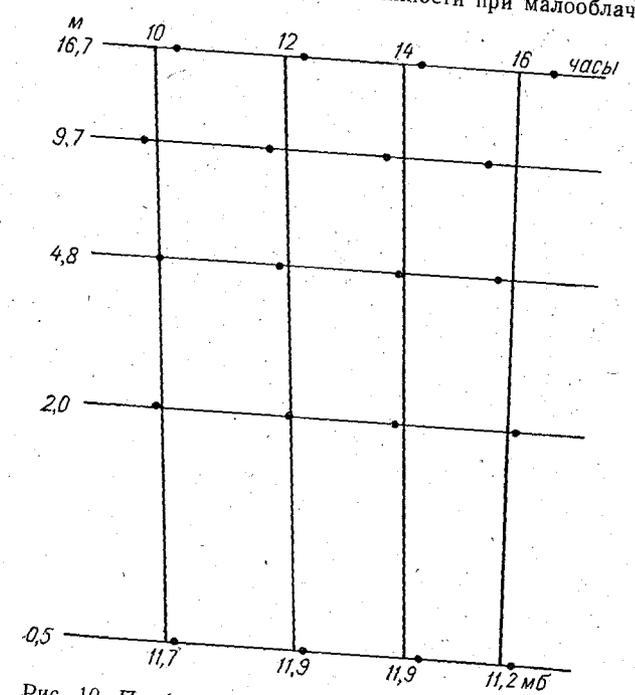


Рис. 10. Профиль средней абсолютной влажности за пасмурные дни.

Таблица 8

Средние значения коэффициента турбулентности ($\text{м}^2/\text{сек.}$)
на высоте 1 м в малооблачные дни

	Часы			
	10	12	14	16
По методу М. И. Будыко . . .	0,11	0,09	0,12	0,10
По методу Д. Л. Лайхтмана	0,05	0,10	0,05	0,06
По методу М. П. Тимофеева	0,10	0,11	0,11	0,09
По методу теплового баланса	—	0,10	0,11	0,05

Величина коэффициента турбулентности в малооблачную погоду колеблется от 0,09 до 0,12 $\text{м}^2/\text{сек.}$ по методам М. И. Будыко и М. П. Тимофеева и от 0,05 до 0,11 $\text{м}^2/\text{сек.}$ по методам Д. Л. Лайхтмана и теплового баланса.

В пасмурную погоду абсолютные значения коэффициента турбулентности по всем методам больше, чем в ясную, и изменяются от 0,05 до 0,12 $\text{м}^2/\text{сек.}$ по методу теплового баланса и от 0,10 до 0,15 $\text{м}^2/\text{сек.}$ по всем остальным методам.

Колебания коэффициента турбулентности от 12 до 16 час., рассчитанного по методу теплового баланса, для малооблачной и пасмурной погоды примерно одинаковы.

Коэффициент турбулентности за десятичасовой срок по методу теплового баланса рассчитать не удалось из-за отсутствия наблюдений за восьмичасовой срок или из-за малой разности (меньше 0,1 кал/см² мин.) между значениями радиационного баланса и потока тепла в почву.

Полученные результаты позволяют охарактеризовать метеорологические условия распределения выбросов из труб в приземном слое воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Гидрометеиздат, Л., 1956.
2. Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Гидрометеиздат, Л., 1948.
3. Временные методические указания гидрометеорологическим станциям, № 5. Гидрометеиздат, Л., 1961.
4. Горбунова И. Г., Серова Н. В. Теплофизические характеристики и влажность почвы. Труды ГГО, вып. 107, 1961.
5. Лайхтман Д. Л., Чудновский А. Ф. Физика приземного слоя атмосферы. Гидрометеиздат, Л. — М., 1949.

К ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ

Получено решение задачи о турбулентной диффузии примеси в пограничном слое атмосферы при наличии точечного и линейного источников. При этом принимается, что скорость ветра u возрастает с высотой z по степенному закону $u = u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^n$; а вертикальная составляющая коэффициента обмена $k_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^m$, для горизонтальной составляющей коэффициента обмена k_y предлагается модель, согласно которой $k_y = k_0 u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^n$.

Статья написана по результатам работы, выполненной в 1946 г.

Стационарное распределение взвешенной примеси в атмосфере в общем случае описывается уравнением

$$u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + k_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 q}{\partial y^2}. \quad (1)$$

Здесь ось x направлена вдоль среднего ветра, ось y — поперек ветра, ось z — вертикально вверх, q — концентрация примеси в воздухе, u — скорость ветра, k_x , k_y , k_z — составляющие коэффициента турбулентной диффузии.

В данной работе находится точное решение уравнения (1) с учетом изменения скорости ветра с высотой при одновременном изменении с высотой составляющих коэффициента турбулентного обмена. В ней развиваются результаты Д. Л. Лайхтмана для случая постоянной скорости ветра, представленные в обзоре А. С. Моница [3].

Примем, что скорость ветра изменяется с высотой по степенному закону

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^n, \quad (2)$$

где u — скорость ветра на высоте z , u_1 — скорость ветра на высоте z_1 , n — безразмерный параметр, зависящий от степени устойчивости атмосферы.

Известно достаточно хорошее выполнение этого закона в нижних слоях атмосферы как при сверхадиабатическом градиенте, так и при инверсии.

Положим, что

$$k_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^m, \quad (3)$$

где k_1 — значение k_z на высоте z_1 .

Предположим, что k_y пропорционально скорости ветра, т. е. что

$$k_y = k_0 u \quad \text{или} \quad k_y = k_0 u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad (4)$$

где $k_0 u_1$ — значение k_y на высоте z_1 .

Тот факт, что горизонтальная составляющая коэффициента перемешивания должна изменяться с высотой, не вызывает сомнения, ибо на поверхности земли она равна нулю, а на некоторой высоте отлична от нуля. Но очевидно, что степень изменения с высотой для горизонтальной составляющей должна быть значительно меньше, чем для вертикальной составляющей, так как земная поверхность оказывает на первую гораздо меньшее влияние. Последний результат и выражается формулой (4).

Примерно к таким же выводам можно прийти, сопоставляя значение k_y , найденное нами по очертанию дымового облака [1], с вертикальной составляющей на нижней границе слоя изотропной турбулентности [2]. Но на этом не будем здесь останавливаться.

Уравнение (1) значительно упрощается, если пренебречь в нем членом $k_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$, как членом гораздо меньшим по сравнению с остальными.

Это вполне возможно сделать, поскольку, во-первых, производная от концентрации по x значительно меньше, чем по z (горизонтальные размеры облака всегда во много раз больше вертикальных), а во-вторых, конвективный поток вдоль x всегда намного превосходит диффузионный поток $k_x \frac{\partial q}{\partial x}$ (в последнем легко можно убедиться, например, хотя бы по наблюдениям за распространением дыма от труб — дым совершенно не распространяется против ветра).

Учет члена $k_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$ принципиальных трудностей не представляет, но приводит к лишним, очень громоздким выкладкам и формулам.

После всего сказанного на основании (2), (3) и (4) уравнение (1) перейдет в

$$u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m \frac{\partial q}{\partial z} + k_0 u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n \frac{\partial^2 q}{\partial y^2}. \quad (5)$$

В качестве краевых условий необходимо потребовать удовлетворения определенных соотношений для концентрации q и ее первых производных на всех поверхностях, ограничивающих пространство, в котором рассматривается решение.

Если источник расположен в плоскости $z=0$, то интересующее нас пространство будет ($x \geq 0, z \geq 0$) и следует поставить граничные условия при $x=0$ и $x, |y|, z \rightarrow \infty$.

Найденное решение должно быть таково, чтобы на бесконечности концентрация обращалась в нуль, т. е. при $x, y, z \rightarrow \infty$ $q \rightarrow 0$.

Для $z=0$ потребуем отсутствия потока через эту плоскость, т. е. $k_z \frac{\partial q}{\partial z} = 0$ при $z=0$.

Для плоскости $x=0$ поток вещества из этой плоскости uq должен быть равным расходу источника в точках непосредственной окрестности источника, во всех же других точках плоскости он должен быть равным нулю.

В настоящей работе рассматривается теория распространения взвешенной примеси в атмосфере для трех типов источников примеси — точечного, конечной и бесконечной длины.

Для точечного источника, если он расположен в точке $(x=0, y=0, z=H)$, краевые условия запишем в следующем виде:

$$q \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad |y| \rightarrow \infty,$$

$$q \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow \infty,$$

$$k_z \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = 0,$$

$$uq = Q\delta(z-H)\delta(y) \quad \text{при} \quad x=0.$$

В последнем условии Q — расход вещества для точечного источника, соответствующий единице времени, а $\delta(z-H)$ и $\delta(y)$ представляют собой δ -функции, обладающие следующим свойством:

$$\int_a^b \varphi(t)\delta(t-\alpha)dt = \varphi(\alpha), \quad (6)$$

когда α попадает в интервал (a, b) , и $\int_a^b \varphi(t)\delta(t-\alpha)dt = 0$ для других значений α .

Сначала найдем общее решение (5). Применяя метод Фурье, положим

$$q(x, y, z) = \varphi(x)\theta(y)f(z).$$

Переменные в (5) разделяются и дают три уравнения:

$$\frac{1}{f u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^n} \frac{d}{dz} k_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^m \frac{df}{dz} = -\lambda^2,$$

$$\frac{1}{\theta} \frac{d^2\theta}{dy^2} = -\mu^2,$$

$$\frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dx} = -\lambda^2 - k_0\mu^2.$$

Знаки минус перед λ^2 и μ^2 взяты для выполнения первых краевых условий.

Последние два уравнения имеют частные решения:

$$\varphi(x) = e^{-(\lambda^2 + k_0\mu^2)x}, \quad \theta(y) = \cos \mu y,$$

а первое уравнение после простых преобразований примет вид

$$\frac{d^2f}{dz^2} + \frac{m}{z} \frac{df}{dz} + \lambda^2 \frac{u_1}{k_1} \left(\frac{z}{z_1}\right)^{n-m} f = 0.$$

Сопоставляя это уравнение со стандартным бесселевым уравнением [4]

$$y'' + \frac{1-2\alpha}{x} y' + \left[(\beta\gamma x^r - 1)^2 + \frac{\alpha^2 - p^2\gamma^2}{x^2} \right] y = 0, \quad (7)$$

имеющим общее решение $y = x^\alpha Z_p(\beta x^\gamma)$, найдем

$$f(z) = z^{\frac{1-m}{2}} Z_\nu \left(\frac{2\lambda_\nu}{1-m} \sqrt{\frac{u_1 z_1^2}{k_1} \left(\frac{z}{z_1}\right)^{\frac{1-m}{\nu}}}\right), \quad (8)$$

где $Z_\nu(t)$ — цилиндрическая функция, $\nu = \frac{1-m}{2+n-m}$.

Из этого общего решения мы должны выбрать частное решение, удовлетворяющее второму и третьему краевым условиям.

Непосредственной проверкой можно убедиться, что общее решение (8) удовлетворяет второму условию (при $z \rightarrow \infty$), т. е. выполнение этого краевого условия обеспечивается самим видом уравнения (7). В самом деле, воспользовавшись асимптотическим представлением цилиндрической функции

$$Z_p(t) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi t}} \left[A \cos\left(t - \frac{\pi p}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + B \cos\left(t + \frac{\pi p}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \right]$$

и учитывая, что в нашем случае

$$t \sim z^{\frac{1-m}{2\nu}},$$

для больших z имеем

$$q \sim \frac{1}{z^{\frac{n+m}{4}}}.$$

При учете третьего условия (при $z=0$) используем формулу для дифференцирования цилиндрической функции

$$\frac{d}{dt} t^p Z_p(t) = t^p Z_{p-1}(t).$$

Тогда

$$k_z \frac{\partial q}{\partial z} \sim z^{\frac{1+n}{2}} Z_{-(1-\nu)} \left[\frac{2\lambda_\nu}{1-m} \sqrt{\frac{u_1 z_1^2}{k_1} \left(\frac{z}{z_1}\right)^{\frac{1-m}{\nu}}}\right].$$

Положив далее

$$Z_p(t) = B J_p(t) + C J_{-p}(t),$$

где $J_{\pm p}(t)$ — функция Бесселя, и используя представление функции Бесселя для малого аргумента

$$J_p(t) \approx \frac{\left(\frac{t}{2}\right)^p}{\Gamma(1+p)},$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция, получим для малых z

$$k_z \frac{\partial q}{\partial z} \sim A + D z^{1+n}.$$

Отсюда видно, что для удовлетворения третьего условия надо положить $B=0$ и выбрать, согласно (8), частное решение

$$f(z) = z^{\frac{1-m}{2}} J_{-\nu} \left(\alpha \lambda z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right),$$

где

$$\alpha = \frac{2\nu z_1}{1-m} \sqrt{\frac{u_1}{k_1 z_1^{\frac{1-m}{\nu}}}}. \quad (9)$$

Имея, таким образом, выражения для $\varphi(x)$; $\theta(y)$ и $f(z)$, запишем общий интеграл уравнения (5) в виде

$$q(x, y, z) = z^{\frac{1-m}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\lambda^2 x} J_{-\nu} \left(\alpha \lambda z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} e^{-k|\mu^2 x} \psi(\lambda, \mu) \cos \mu y d\mu, \quad (10)$$

где $\psi(\lambda, \mu)$ — произвольная функция.

Легко видеть, что (10) удовлетворяет первому краевому условию (при $y \rightarrow \infty$).

Мы обеспечили выполнение всех краевых условий, кроме четвертого (при $x=0$), поэтому функция $\psi(\lambda, \mu)$ должна быть определена на основании этого последнего условия, которое запишем следующим образом:

$$\int_0^{\infty} J_{-\nu} \left(\alpha \lambda H^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} \cos \mu y \psi(\lambda, \mu) d\mu = \frac{Qz_1^n}{u_1 H^{\frac{1-m}{2}}} \delta(z-H) \delta(y). \quad (11)$$

Для нахождения $\psi(\lambda, \mu)$ выведем вспомогательную формулу. Сначала представим некоторую четную по отношению к y функцию $\Phi \left(y, \alpha z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right)$ через интеграл Фурье [5], рассматривая здесь z как параметр,

$$\Phi \left(y, \alpha z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \mu y d\mu \int_0^{\infty} \Phi \left(\xi, \alpha z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) \cos \mu \xi d\xi, \quad (12)$$

а затем, воспользовавшись формулой для представления произвольной функции $f(\alpha)$ через интеграл Фурье—Бесселя [6]

$$f(\alpha) = \int_0^{\infty} \lambda d\lambda \int_0^{\infty} t f(t) J_p(\lambda t) J_p(\lambda \alpha) dt$$

и положив здесь $p = -\nu$, получим для $\Phi \left(\xi, \alpha z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right)$, где ξ является параметром,

$$\begin{aligned} \Phi \left(\xi, \alpha z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) &= \frac{1-m}{2\nu} \alpha^2 \int_0^{\infty} \lambda J_{-\nu} \left(\alpha \lambda z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\lambda \times \\ &\times \int_0^{\infty} \eta^{1+n-m} \Phi \left(\xi, \alpha \eta^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) J_{-\nu} \left(\alpha \lambda \eta^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\eta. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставим (13) в (12), получим нужную вспомогательную формулу

$$\begin{aligned} \Phi \left(y, \alpha z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) &= \frac{(1-m) \alpha^2}{\nu \pi} \int_0^{\infty} \lambda J_{-\nu} \left(\alpha \lambda z^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\lambda \int_0^{\infty} \cos \mu y d\mu \times \\ &\times \int_0^{\infty} \Phi \left(\xi, \alpha \eta^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) \cos \mu \xi d\xi \int_0^{\infty} \eta^{1+n-m} J_{-\nu} \left(\alpha \lambda \eta^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\eta. \end{aligned} \quad (14)$$

Рассматривая левую часть (11) как функцию $\Phi \left(y, \alpha H^{\frac{1-m}{2\nu}} \right)$, найдем

$$\psi(\lambda, \mu) = \frac{(1-m) \alpha^2 \lambda}{2\nu} \int_0^{\infty} \Phi \left(\xi, \alpha \eta^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) \cos \mu \xi d\xi \int_0^{\infty} \eta^{1+n-m} J_{-\nu} \left(\alpha \lambda \eta^{\frac{1-m}{2\nu}} \right) d\eta.$$

С другой стороны, из правой части (11) следует, что

$$\Phi\left(y, \alpha H \frac{1-m}{2\nu}\right) = \frac{Qz_1^n H^{-\frac{1+2n-m}{2}}}{u_1} \delta(z-H) \delta(y),$$

и, таким образом,

$$\psi(\lambda, \mu) = \frac{(1-m)\alpha^2}{2\nu u_1} Qz_1^n \lambda \int_0^\infty \cos \mu \xi \delta(\xi) d\xi \int_0^\infty \eta^{\frac{1+m}{2}} J_{-\nu}\left(\alpha \lambda \eta^{\frac{1-m}{2\nu}}\right) \delta(\eta-H) d\eta.$$

Отсюда на основании свойств δ -функции получим окончательное выражение

$$\psi(\lambda, \mu) = \frac{(1-m)\alpha^2}{4\nu u_1} Qz_1^n \lambda H^{\frac{1+m}{2}} J_{-\nu}\left(\alpha \lambda H^{\frac{1-m}{2\nu}}\right). \quad (15)$$

Подставив (15) в (10) и воспользовавшись интегралом Сонина

$$\int_0^\infty \lambda e^{-\lambda^2 x} J_p(r\lambda) J_p(q\lambda) d\lambda = \frac{e^{-\frac{r^2+q^2}{4x}}}{2x} I_p\left(\frac{rq}{2x}\right),$$

а также тем, что

$$\int_0^\infty e^{-k_0 \mu^2 x} \cos \mu y d\mu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k_0 x}} e^{-\frac{y^2}{4k_0 x}},$$

получим окончательное выражение для концентрации

$$q(x, y, z) = \frac{Q(Hz)^{\frac{1-m}{2}} z_1^m}{2(2+n-m) K_1 \sqrt{\pi k_0 x^3}} e^{-\frac{y^2}{4k_0 x} - \frac{u_1 z_1^{m-n}}{k_1 (2+n-m)^2 x} (z^2 + n - m + H^2 + n - m)} \times \\ \times I_{-\frac{1-m}{2+n-m}} \left[\frac{2u_1 z_1^{m-n} (Hz)^{\frac{2+n-m}{2}}}{k_1 (2+n-m)^2 x} \right]. \quad (16)$$

Здесь мы подставили вместо α его значение (9). При достаточном удалении от источника ($x > 10-20$ м) и при небольших z ($< 10-20$ м) в (16) для функции $I_{-\frac{1-m}{2+n-m}}(t)$ аргумент t мал и можно разложить эту функцию в ряд, ограничиваясь с достаточной для практики точностью (ошибка $< 10\%$) первыми двумя членами, а в большинстве необходимых случаев, в частности для концентрации у земли, только одним членом.

Расчеты показывают, что q изменяется с n мало. Это имеет важное значение, ибо если даже допустить, что в (2) n в какой-то небольшой степени зависит от высоты, то такое изменение n не может существенно сказаться на вычисленной концентрации.

Таким образом, влияние устойчивости на распространение примеси в атмосфере сказывается главным образом только через параметры k_0 и $\frac{k_1}{u_1}$ — отношение соответственно горизонтальной и вертикальной составляющих коэффициента перемешивания на высоте z_1 к скорости ветра на той же высоте.

Если предположить, что источник бесконечной длины расположен вдоль оси y , то выражение для концентрации от такого источника получим путем интегрирования (16).

$$\begin{aligned}
 q_{\infty}(x, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y - \eta, z) d\eta = \\
 &= \frac{Q(Hz)^{\frac{1-m}{2}} z_1^m}{(2+n-m) k_1 x} e^{-\frac{u_1 z_1^{m-n}}{k_1 (2+n-m)^2 x} (z^2 + n - m + H^2 + n - m)} \times \\
 &\times I \left[\frac{2u_1 z_1^{m-n} (Hz)^{\frac{2+n-m}{2}}}{k_1 (2+n-m)^2 x} \right] \dots \quad (17)
 \end{aligned}$$

Здесь Q — расход для линейного источника, отнесенный к единице длины источника и к единице времени. Приближенно для малых z

$$\begin{aligned}
 q_{\infty}(x, z) &= \frac{Q(z_1)^{\frac{n+m}{2+n-m}}}{(2+n-m)^{\frac{n+m}{2+n-m}} (k_1 x)^{\frac{1+n}{2+n-m}} (2u_1)^{\frac{1-m}{2+n-m}} \Gamma\left(\frac{1+n}{2+n-m}\right)} \times \\
 &\times e^{-\frac{u_1 z_1^{m-n}}{k_1 (2+n-m)^2 x} (z^2 + n - m + H^2 + n - m)}
 \end{aligned}$$

Необходимо отметить, что хотя мы получили формулу (17) для концентрации от линейного источника путем интегрирования выражения концентрации для точечного источника, первая совершенно не зависит от сделанного нами ранее предположения о виде горизонтальной составляющей коэффициента перемешивания, так как при интегрировании по y член с k_y исчезает.

В случае источника конечной длины, направив ось y вдоль источника и выбрав начало координат в центре источника, получим, как это было сделано для источника бесконечной длины,

$$\begin{aligned}
 q(x, y, z) &= \int_{-l}^l q(x, y - \eta, z) d\eta = \\
 &= q_{\infty}(x, z) \left[\Phi\left(\frac{y+l}{2\sqrt{k_0 x}}\right) - \Phi\left(\frac{y-l}{2\sqrt{k_0 x}}\right) \right], \quad (18)
 \end{aligned}$$

где $2l$ — длина источника, $q_{\infty}(x, z)$ — концентрация от бесконечно длинного источника (17), $\Phi(t)$ — функция Крампа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е. Определение горизонтальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., т. 8, № 1, 1944.
2. Берлянд М. Е. Теория изменения ветра с высотой. Труды НИУ ГУТМС, сер. 1, № 25, 1947.
3. Монин А. С. Атмосферная диффузия. Успехи физ. наук, т. 67, вып. 1, 1959.
4. Шпильрейн Я. И. Таблицы специальных функций, ч. 1. Гостехиздат, М., 1933.
5. Привалов И. И. Ряды Фурье. ОНТИ, М., 1934.
6. Кузьмин Р. О. Бесселевы функции. ОНТИ, М. 1935.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ СЪЕМОК В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОГО РЕЛЬЕФА

Рассматриваются микроклиматические съемки местности, проведенные с целью изучения распространения примесей в условиях пересеченного рельефа. На основании анализа материала микросъемок даются предварительные выводы о влиянии различных форм рельефа на ветер, температуру и влажность в приземном слое воздуха.

Для многих задач прикладной метеорологии существенное значение имеет исследование характеристик турбулентного обмена в условиях пересеченной местности. Особенно важны метеорологические исследования при изучении степени загрязнения местности выбросами крупных предприятий.

С этой целью осенью 1961 г. проводился комплекс работ по изучению метеорологических условий и определению концентрации вредных примесей вдоль факела труб Щекинской ГРЭС.

Программа основных наблюдений, проводимых на метеорологической станции, изложена в работе [3]. Она включает широкий комплекс градиентных наблюдений за скоростью ветра, температурой и влажностью до высоты 17 м, позволяющий определить характеристики турбулентного обмена. Одновременно проводились микроклиматические съемки местности вокруг электростанции в радиусе 6 км, где еще наблюдалась значительная концентрация вредных примесей, выбрасываемых из труб электростанции.

Постановка этих наблюдений была связана с тем, что ГРЭС расположена в пересеченной местности с относительными превышениями холмов над долинами ≈ 30 —50 м, где закономерности распределения ветра, температуры и других метеорологических характеристик носят более сложный характер, чем над равниной [1, 2, 4].

Режим ветра в таких условиях связан с искривлением линий тока и перераспределением атмосферного давления при обтекании воздушным потоком различных форм рельефа, что создает неоднородное распределение скоростей ветра. Поэтому на вершинах и наветренных склонах скорости ветра оказываются большими, чем у основания холма и на его подветренном склоне, где в некоторых случаях могут образовываться потоки с обратным направлением движения, вызывающие интенсивные завихрения.

Скорость ветра в долине зависит от ее расположения по отношению к господствующему потоку. В случае совпадения направления ветра и долины последняя хорошо продувается. В остальных случаях имеет место ослабление скорости ветра, а также могут наблюдаться условия, близ-

кие к штилю. Кроме того, неравномерный нагрев подстилающей поверхности приводит к появлению добавочных искажений ветра, обусловленных чисто термическим происхождением.

Температурный режим в условиях изрезанного рельефа определяется экспозицией и крутизной склонов, а также свойствами подстилающей поверхности.

Одновременно с изменениями температуры и скорости ветра имеет место и изменение влажности.

В задачу микроклиматических съемок входило изучение ветрового и температурного режима, необходимого для характеристики турбулентного обмена в различных условиях рельефа. Съемки производились таким образом, чтобы можно было найти связь характеристик температуры и ветра в различных условиях местоположения пункта наблюдения с данными метеорологической станции, расположенной на плоской вершине холма в 0,5 км на СЗ от ГРЭС. В дальнейшем это должно позволить по показаниям последней судить о ветровом и температурном режиме на окружающей станции местности.

Наблюдения производились одновременно на метеостанции и в трех точках, расположенных от ГРЭС на расстоянии от 1 до 6 км, где забиралась пробы концентрации газа и пыли. Пункты наблюдений всегда ориентировались по направлению дымового факела, который совпадал со средним направлением ветра. Сами же пункты выбирались так, чтобы они находились в характерных условиях рельефа.

В программу наблюдений на пунктах входили измерения скорости ветра на высотах 1 и 2 м с помощью анемометров системы «Метеор», позволяющих определить скорость ветра с точностью 0,1 м/сек. Кроме того, на одном из пунктов измерялась скорость ветра тем же прибором на высоте 4,5 м.

Направление ветра на всех пунктах определялось с помощью вимпела и компаса.

Измерения температуры и влажности производились аспирационными психрометрами Ассмана на высотах 0,25 и 1,5 м.

Наблюдения за температурой, влажностью и ветром производились сериями в течение 1 часа одновременно с наблюдениями на основной станции. При этом выделялось три десятиминутных интервала, в каждом из которых производилось два отчета по психрометру. Скорость ветра определялась как средняя величина за 20 мин. (со второй половины наблюдений за 10 мин.). Одновременно отмечалось направление ветра.

Для каждого пункта наблюдений составлялось физико-географическое описание окружающей местности, которое учитывалось в дальнейшем при анализе материала. В описании отмечалась форма рельефа, ближайшие постройки, наличие лесных и водных объектов, характер подстилающей поверхности и другие местные особенности. Относительные превышения точек определялись по anerоиду-высотометру. Точки наблюдений наносились на специальную карту-схему.

В период проведения работ стояла в основном солнечная погода с незначительной облачностью верхнего яруса. Пасмурная погода со сплошной низкой облачностью была только один день.

Полученные материалы наблюдений по всем пунктам были обработаны и сведены в таблицы, при этом данные осреднялись за 1 час. При дальнейшей обработке были определены отношения скоростей ветра $\frac{u_n}{u_{ст}}$ в каждом пункте (u_n) и на основной станции ($u_{ст}$). Вычислялись также разности температуры и влажности между высотами 0,25 и 1,5 м, а затем

определялись их разности $\Delta T_{п} - \Delta T_{ст}$ между данными в пунктах наблюдений ($\Delta T_{п}$) и на станции ($\Delta T_{ст}$).

Полученные результаты были сведены в таблицы. Для примера приведена таблица за двенадцатичасовой срок 10/X 1961 г. В нее включена скорость ветра только на высоте 1 м (табл. 1).

Таблица 1

Место наблюдения	Ветер			Температура, град.				Влажность, мб			
	u м/сек.	$\frac{u_{п}}{u_{ст}}$	направление	$T_{0,25}$	$T_{1,5}$	ΔT	$\Delta T_{п} - \Delta T_{ст}$	$e_{0,25}$	$e_{1,5}$	Δe	$\Delta e_{п} - \Delta e_{ст}$
Станция (вершина)	2,3	—	ЮВ	10,4	9,4	1,0	—	5,1	4,0	1,1	—
Вершина	2,3	1,0	Ю	10,6	9,3	1,3	0,3	5,0	4,4	0,6	-0,5
Верхняя часть юго-юго-западного склона	2,4	1,0	Ю	10,4	9,5	0,9	-0,1	4,4	3,9	0,5	-0,6
Долина	1,5	0,6	Ю	10,0	9,1	0,9	-0,1	4,8	4,1	0,7	-0,4

В период наблюдений средняя скорость ветра на станции составляла 2,8 м/сек.

Из анализа полученного материала микросъемок следует, что с понижением рельефа отношение скоростей ветра $\frac{u_{п}}{u_{ст}}$ уменьшается от 0,9 до 0,6.

Если для повышенных форм рельефа отношение скорости ветра в пункте наблюдения к скорости ветра на станции равно примерно единице, то для низин, долин, а также подветренных склонов это отношение колеблется от 0,6 до 0,8.

Величина отношения скоростей ветра зависит от степени понижения рельефа и от положения точки по отношению к направлению господствующего потока, причем для каждой точки наблюдений величина отношения $\frac{u_{п}}{u_{ст}}$ колеблется в небольших пределах и интервал колебаний, как правило, не превышает 0,1.

Направление ветра в исследуемых точках в основном не отличалось от направления на метеостанции.

В солнечные дни разности температуры на станции $\Delta T_{ст}$ менялись от 0,5 до 1,5°, а в среднем $\Delta T_{ст} = 0,8^\circ$; разность $\Delta T_{п} - \Delta T_{ст}$ в течение 1 часа не превышала 0,8°, а в среднем составляла 0°. В пасмурную ветреную погоду во всех формах рельефа наблюдалась изотермия.

Разности влажности на станции $\Delta e_{ст}$ за период наблюдений колебались от 0,2 до 1 мб, а в среднем $\Delta e_{ст} = 0,9$ мб. Максимальная разность $\Delta e_{п} - \Delta e_{ст}$ составляла 0,7 мб, а в среднем, — около 0,2 мб.

Более отчетливые закономерности изменений разности температуры $\Delta T_{п} - \Delta T_{ст}$ и влажности $\Delta e_{п} - \Delta e_{ст}$ в зависимости от формы рельефа из-за недостаточного количества наблюдений выявить не удалось.

В заключение следует отметить, что сделанные выводы являются предварительными. В дальнейшем исследования по учету влияния рельефа на распределение ветра, температуры и влажности будут продолжены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архипова Е. П., Глебова М. Я., Романова Е. Н. Особенности микроклимата пахотных склонов. Труды ГГО, вып. 91, 1960.
2. Гольцберг И. А. Микроклимат и его значение в сельском хозяйстве. Гидрометеоздат, Л., 1957.
3. Горошко Б. Б., Грачева В. П., Расторгуева Г. П., Рихтер Б. В., Федорова Г. А. Метеорологические наблюдения при исследовании промышленных загрязнений приземного слоя воздуха (см. наст. сборник).
4. Микроклимат северной части Казахского мелкосопочника. Под ред. И. А. Гольцберга. Гидрометеоздат, Л., 1957.

ВОЗМОЖНОСТИ АСПИРАЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Дается описание применяемой фильтро-вентиляционной установки, метода измерений и расчета концентрации активности в воздухе, а также некоторые результаты измерений. Анализируются результаты измерений и даются рекомендации о выборе параметров вентилярующих устройств, размеров фильтров и т. д. для достижения необходимой точности измерений.

Одной из задач исследования загрязнений атмосферы является изучение временного и пространственного распределения радиоактивных веществ.

Продукты расщепления появляются в атмосфере как твердые субстанции в виде радиоактивных аэрозолей и в виде благородных газов аргона, криптона и ксенона [2, 9]. Эти радиоактивные продукты попадают в атмосферу от реакторных источников, от взрывов ядерного и термоядерного оружия. Продукты распада от первого источника остаются в пределах пограничного слоя, и их распределение обусловлено обменом в этом слое. Продукты распада от второго источника остаются в пределах тропосферы, где пути радиоактивных облаков прослеживаются несколько раз вокруг Земли и могут служить индикаторами при изучении траекторий и трансформаций воздушных масс. Наконец, продукты распада от третьего источника поступают в стратосферу, где время их пребывания составляет несколько лет [3, 9] и откуда постепенно они проникают в тропосферу.

Следовательно, данные о временном и пространственном распределении радиоактивных веществ в атмосфере могут служить одной из характеристик обмена большого и малого масштабов.

Выпавшие на поверхность земли продукты распада могут ветром отрываться от земли, опять принимать участие в процессах, происходящих в тропосфере, и снова выпадать вместе с осадками или без них в других местах, что может приводить к местным колебаниям фоновой активности. Поэтому существенно также получить связи концентрации радиоактивности в атмосфере с осадками и другими метеорологическими элементами.

Одним из методов изучения фоновой активности атмосферы является аспирационный метод, который получил в настоящее время широкое распространение [2, 9]. Сущность метода заключается в фильтровании воздуха с помощью фильтро-вентиляционной установки через пористые фильтры и в последующем измерении α - или β -активности, скопившейся на фильтрах, торцовыми счетчиками Гейгера—Мюллера.

Эффективность аспирационного метода зависит от ряда таких фак-

торов, как геометрические и физические характеристики применяемых фильтров, скорость фильтрации, общий объем фильтруемого воздуха и т. д.

Для оценки возможностей аспирационного метода автором была собрана фильтро-вентиляционная установка (рис. 1), с помощью которой производились измерения в декабре 1959 г. и в январе 1961 г.

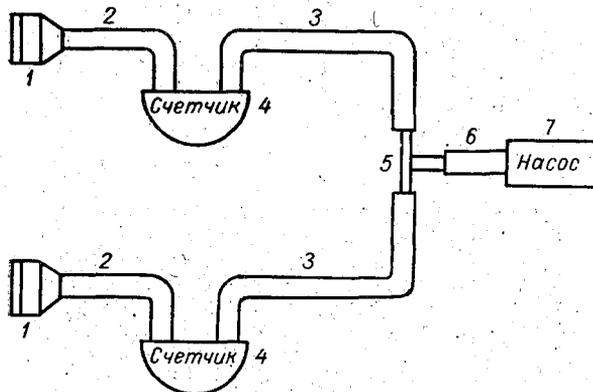


Рис. 1. Фильтро-вентиляционная установка.

1 — фильтродержатели, 2, 3 и 6 — вакуумные шланги, 4 — газовые счетчики (ГКФ), 5 — тройник, 7 — форвакуумный насос.

Установка состояла из форвакуумного насоса типа «Пфейфер» для фильтрации воздуха, двух газовых счетчиков типа ГКФ, указывающих

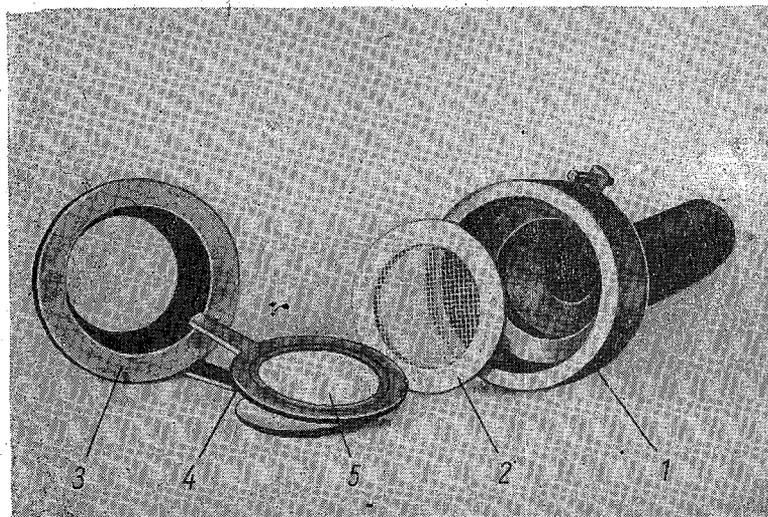


Рис. 2. Фильтродержатель.

1 — корпус, 2 — кольцо с сеткой, 3 — зажимное кольцо, 4 — держатель фильтра, 5 — фильтр.

объем прокачанного воздуха, двух фильтродержателей и промежуточных коммуникаций.

В установке использовались фильтродержатели двух типов: первый — для фильтров круглой формы с рабочей поверхностью $9,6 \text{ см}^2$ (рис. 2) и второй — для фильтров прямоугольной формы с рабочей поверхностью $98,0 \text{ см}^2$ (рис. 3).

Установка позволяла прокачивать воздух одновременно через два фильтра с помощью двух независимых вентиляционных каналов, включенных параллельно друг другу. Общая производительность установки составляла 9000 л/час независимо от числа каналов. При работе двух каналов через каждый канал фильтровалось примерно по 4500 л/час, а при работе одного канала — 9000 л/час.

В качестве фильтров использовались фильтры типа ФПП-15. Фильтры применялись как в один, так и в два слоя, сложенные навстречу друг другу собирающими поверхностями. Фильтры ФПП представляют собой подложку из марли, на которую нанесен слой синтетического волокна с большой эффективностью захвата. Толщина слоя синтетического волокна (поглотителя), выраженная его весом, отнесенным к единице

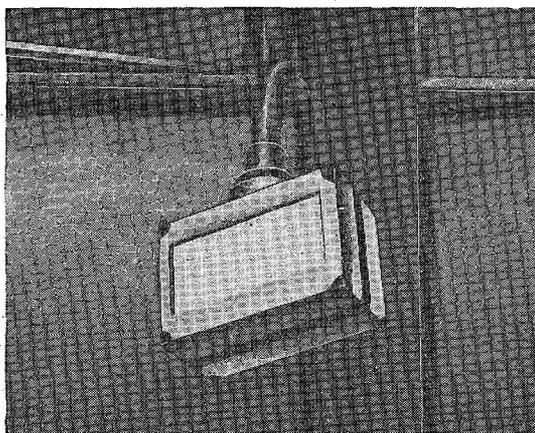


Рис. 3. Фильтродержатель прямоугольных фильтров.

площади, равна $1,7 \text{ мг/см}^2$. Это позволяет не учитывать самопоглощение и рассеяние в фильтре, если толщина поглотителя не превышает 0,04 толщины слоя половинного ослабления излучения, что имеет место при измерении β -излучений с максимальной энергией, не превышающей 0,84 Мэв.

Рабочая поверхность фильтров благодаря большой эффективности захвата легко нарушается. Это ведет к изменениям коэффициента эффективности, которые не поддаются учету. Следовательно, применение двухслойных фильтров представляется более целесообразным, так как при этом одновременно уменьшается коэффициент проскока до 0,1% [4] и незначительно увеличивается сопротивление фильтра, что хорошо видно из табл. 1.

Для удобства манипуляций, хранения и измерения активности, накопившейся на фильтрах, они вкладывались вначале в картонные держатели в виде двух колец, вырезанных из одного куска картона и сложенных вместе путем перегиба перемычки, соединяющей их (см. рис. 2). С противоположного края колец напротив перемычки было оставлено два выступа длиной около 3 см. Внутренний диаметр колец был равен диаметру рабочей поверхности фильтра и составлял 35 мм. Но такие картонные держатели оказались недостаточно удобными. Поэтому в январе 1961 г. уже применялись фильтры, вклеенные между двумя картонными кольцами без выступов. При этом ткань очень хорошо и равно-

Некоторые свойства фильтров [4]

Марка фильтра	Максимальная скорость фильтрации, л/мин. см ²	Перепад давления, мм рт. ст.	Процент проскока	Вес ткани, мг/см ²	Толщина ткани, мк
МФ № 2	5	180—185	0,1	3—5	100
МФ № 4	8	140—145	0,1	3—5	100
МФ № 5	8,6—9	110—120	0,1	3—5	100
ФПП-5	10,7—11,4	45—50	0,1	2,6	100
БФ	10,7—11,4	45—50	0,1	1,8	100
ФПА-15	12,1—12,8	10—15	8,4	1,4	100
ФПП-15 (новая марка)	12,1—12,8	10—15	8,2	1,7	100
ФПП-15 (старая марка)	12,1—12,8	10—15	16,3	2,6	125
ФПП-25	12,1—12,8	10—15	8,1	2,4	100
ФПП-15 удвоенной толщины	12,1—12,8	15—16	0,1	5,3	250

мерно натягивалась. На кольцах записывались данные о фильтрации, дата и номер фильтра.

Для измерения активности фильтров использовалась установка Б-2 с галогенным торцовым счетчиком СБТ-7 при обсчете круглых фильтров диаметром 35 мм и с пакетом из семи счетчиков СТС-5 при обсчете прямоугольных фильтров размером 70×140 мм. Все измерения на установке Б-2 производились в свинцовом домике типа ИФХАН с толщиной стенок 40 мм, при этом фон счетчика СБТ-7 снижался до 14 имп/мин.

Держатель с круглым фильтром помещался в специальную обойму из плексигласа, что позволяло точно фиксировать взаимное расположение фильтра и счетчика. Для постоянства геометрических условий измерений с помощью пакета счетчиков СТС-5 был изготовлен алюминиевый кожух, состоящий из двух полуцилиндров, соединенных шарнирно и снабженных двумя кольцевыми пружинами, прижимающими к внутренней поверхности кожуха прямоугольный фильтр. В середине кожуха с фильтром помещался пакет из семи счетчиков (один счетчик в центре, а шесть счетчиков вокруг первого). Все счетчики включались параллельно. Длина и ширина вкладываемого фильтра таковы, что он полностью охватывает пакет счетчиков, и телесный угол ω , из которого регистрируется излучение, приближается к 2π.

Благодаря многократным совпадениям в счетчиках, включенных параллельно, увеличение фона не кратно количеству счетчиков, а существенно меньше, в то же время эффективная поверхность, чувствительная к β-излучению, значительно увеличивается. И действительно, в свинцовом домике фон пакета счетчиков составлял всего 25 имп/мин. при фоне одного счетчика 6 имп/мин.

Накопившаяся на фильтрах β-активность измерялась методом торцовых счетчиков с фиксированным телесным углом [6].

Для абсолютных измерений активности фильтра этим методом измеренная скорость счета должна исправляться на просчеты за счет мертвого времени счетчика $\tau_{сч}$ и на его фон. По исправлении скорости счета n_{β} в имп/мин. активность фильтра a определяется в кури по формуле

$$a = \frac{n_{\beta}}{2,22 \cdot 10^{12} \varepsilon \omega \delta (P_1 K_1 S_1 q_1 + P_2 K_2 S_2 q_2 + \dots)}; \quad (1)$$

где ε — эффективность счетчика к β -излучению (обычно $\varepsilon=0,995$), ω — относительный телесный угол, под которым виден чувствительный объем счетчика из центра препарата ($\omega < 0,5$), δ — поправка на уменьшение размеров телесного угла из-за конечных размеров и неравномерности препарата ($\delta \leq 1$), P_i — парциальные коэффициенты самопоглощения и саморассеяния β -излучения в препаратах ($i=1, 2, \dots$), K_i — парциальные коэффициенты прозрачности слоя между препаратом и чувствительным объемом счетчика ($K_i \leq 1$), S_i — вероятности распада ядра радиоактивного изотопа, при котором испускаются β -частицы 1-го, 2-го и т. д. парциальных спектров ($S_i \leq 1$), q_i — парциальные коэффициенты обратного рассеяния β -излучения от подложки препарата ($q_i \geq 1$). Часто выражение $\varepsilon \omega \delta (P_1 K_1 S_1 q_1 + \dots)$ обозначается через η и называется коэффициентом счета.

Как правило, коэффициенты K , P и q в (1) определяются не точно. Они зависят друг от друга и от размеров телесного угла ω . Поэтому, когда K , P и q малы, ошибка измерения будет большой [4].

Для уменьшения влияния погрешностей при определении коэффициентов в формуле (1) применяются торцовые счетчики с толщиной окна не более 3 мг/см², используются тонкие препараты без подложки или на подложке с минимальной толщиной, применяются подставки для счетчика и препарата из плексигласа, а сами препараты размещаются на расстоянии не менее 50 мм от дна подставки. При этом увеличивается коэффициент прозрачности, уменьшаются самопоглощение и рассеяние, обратное рассеяние и отражение от подставки и дна.

По имеющимся оценкам [6], ошибки в определении ω могут быть доведены до 2%, а в определении δ — до 1%; при пренебрежении $\tau_{\text{сч}}$ для скоростей счета меньше 50 имп/сек. ошибка может быть 1%, а при пренебрежении K и P — соответственно 2—3% для энергии β -излучения $E=0,5 \div 0,7$ Мэв и 1% для $E > 1$ Мэв. Отсюда, если считать, что $\varepsilon = P_i = K_i = q_i = 1$, общая ошибка в определении активности препарата может составлять 6—8%.

Обычно при измерении β -активности препаратов с известным спектром излучения коэффициент счета η определяют с помощью эталонного или образцового источника, имеющего такой же или похожий спектр излучения. Значение η в этом случае определяется из отношения

$$\eta = \frac{n_{\text{эт}}}{n_{0\text{эт}}}, \quad (2)$$

где $n_{\text{эт}}$ — скорость счета от эталона в имп/мин. за вычетом фона, $n_{0\text{эт}}$ — действительная активность эталона в имп/мин.

При измерении β -активности препаратов с неизвестным спектром излучения, что имеет место при измерении активности, накопившейся на фильтрах, коэффициент η определяется таким же способом, но погрешность его определения может значительно возрастать. Поэтому в качестве эталонных источников рекомендуется использовать KCl, Tl²⁰⁴ или Sr⁹⁰, как имеющие спектр излучения, близкий к спектру продуктов распада, находящихся в атмосфере.

Для определения концентрации радиоактивных аэрозолей применялась формула [4, 5]

$$Q = \frac{n_{\beta}}{2,22 \cdot 10^{12} \eta v F} \text{ кюри/л}, \quad (3)$$

где v — объем фильтруемого воздуха в литрах, F — коэффициент эффективности осаждения аэрозолей.

Относительная средняя квадратичная ошибка измерения скорости счета δn_β определялась по формуле

$$\delta n_\beta = \frac{1}{n_\beta} \sqrt{\frac{n}{t} + \frac{n_\phi}{t_\phi}}, \quad (4)$$

где n и n_ϕ — скорость счета от фильтра и фона соответственно, $n_\beta = n - n_\phi$ — скорость счета от фильтра с учетом фона, t и t_ϕ — время измерения активности фильтра и фона соответственно.

Общая относительная ошибка измерения концентрации выражается как

$$\delta = \delta_n + \delta_\eta + \delta_v + \delta_F, \quad (5)$$

где δ_η может быть доведено до 6—8%, δ_v обычно равно 2% и δ_F не должно превышать 1%, так как обычно приводятся значения F , равные 99,9%.

Чтобы δ_n заметно не увеличивало общую погрешность измерения, целесообразно получать такие скорости счета, чтобы δ_n составляло не более 20—30% полной ошибки измерения [6]. Поэтому необходимо, чтобы статистическая погрешность составляла от 1 до 3%.

Для измерения скорости счета $n_\beta = n - n_\phi$ со статистической ошибкой δ_n % длительность измерений определяется из формул:

$$t = \frac{n + \sqrt{nn_\phi}}{\delta_n^2 n_\beta^2 \cdot 10^{-4}}, \quad t_\phi = \frac{n_\phi + \sqrt{nn_\phi}}{\delta_n^2 n_\beta^2 \cdot 10^{-4}}. \quad (6)$$

Для определения коэффициента счета η был приготовлен эталон из соли KCl, содержащей 0,0119% радиоактивного K^{40} по отношению к общему количеству стабильного калия.

Раствором KCl с известной активностью был пропитан чистый фильтр ФПП-15, зажатый в картонный держатель, описанный выше.

Удельная активность KCl равна $3,87 \cdot 10^{-10}$ кюри/г, поэтому у навески KCl, равной 200 мг, полная активность эталона $n_{0 \text{ эт}}$ должна составлять 172 имп/мин.

Измеренная с точностью 10%, скорость счета $n_{\text{эт}}$ составляла 4,4 имп/мин. Отсюда из формулы (2) следует, что

$$\eta = \frac{4,4}{172} = 0,026 \pm 0,003.$$

Порядок измерений был следующим. Два фильтра ФПП-15 помещались в два фильтродержателя (см. рис. 2), затем включалась вентиляционная установка и через фильтры прокачивался определенный объем воздуха. Отмечалось время включения и выключения насоса и показания газовых счетчиков.

Полученные данные о фильтрации воздуха представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2, средняя скорость фильтрации для однослойного и двухслойного фильтров практически не меняется (в пределах ошибки 2,7%). Увеличение скорости фильтрации в 2 раза для фильтров № 10 и 11 произошло благодаря переключению откачивающей системы на один канал, но при этом удельная скорость прокачивания уменьшается до 1,6 л/мин. см². Это свидетельствует о том, что производительность вентиляционной установки недостаточна и что ее необходимо увеличить в 5 раз для того, чтобы довести удельную скорость фильтрации воздуха до рекомендуемой [4].

Определение характера активности на фильтрах № 6 и 7

№ фильтра		Активность n_{β} на фильтрах через						Средняя активность на фильтрах		
однослойного	двухслойного	1 суток		2 суток		5 суток		n_{β} имп/мин.	δ%	Q_1 кюри/л
		имп/мин.	δ%	имп/мин.	δ%	имп/мин.	δ%			
—	6	2,0	29	2,0	34	2,2	24	2,1	45	$(2,24 \pm 0,11) \cdot 10^{-16}$
7	—	2,1	24	2,1	29	2,7	23	2,3	30	$(2,84 \pm 0,85) \cdot 10^{-16}$

Как уже отмечалось, следы долгоживущих радиоактивных веществ более или менее надежно были получены только после прокачивания воздуха в объеме 140—160 м³, причем оказывается, что дальнейшее увеличение объема фильтруемого воздуха нецелесообразно ввиду того, что на фильтре осаждается большое количество пыли, которая увеличивает массу фильтра. С одной стороны, это ведет к росту самопоглощения и снижению эффективности счета, с другой стороны, большой слой пыли плохо удерживается на поверхности фильтра (особенно однослойного), что приводит к потере активности за счет осыпания пыли.

Для определения количества оседающей на фильтр пыли фильтры № 6 и 7 были взвешены на аналитических весах до прокачивания и через несколько суток после прокачивания. Вес навески пыли оказался равным 28,9 и 19,4 мг соответственно. Фильтр № 6 был двухслойным, а фильтр № 7 — однослойным.

Поверхностная плотность d осевшей пыли на фильтрах равна 3,0 и 2,1 мг/см² соответственно, что сравнимо с плотностью самих фильтров, равной 1,7 мг/см².

Представляет интерес оценить влияние такого слоя пыли на измерение активности фильтра.

По известной формуле [5]

$$P = \left(1 - e^{-\frac{0,693d}{\Delta_{1/2}}}\right) / \frac{0,693}{\Delta_{1/2}} \quad (7)$$

можно оценить в (1) фактор самопоглощения P β -излучения в слое пыли, осевшей на фильтре.

В формуле (7) приняты следующие обозначения: d — толщина слоя пыли в мг/см², $\Delta_{1/2}$ — слой половинного ослабления β -излучения в мг/см² в алюминии.

Как известно, в состав долгоживущей составляющей β -активности, осевшей на фильтрах, могут входить продукты распада естественной радиоактивности RaD²¹⁰, RaE²¹⁰ [2] и осколочные продукты Sr⁹⁰, Nb⁹⁵, Ru¹⁰⁶, Ce¹⁴⁴, Pm¹⁴⁷ [4], которые еще остаются нераспавшимися спустя год и более после деления.

Значения коэффициента P для указанных продуктов рассчитаны при толщине слоя пыли, осевшей на фильтр, $d=3$ мг/см² и представлены в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициенты самопоглощения для осколочных продуктов

№ п/п	Элемент	E Мэв	$\Delta_{1/2}$ мг/см ²	P_i
1	Sr ⁹⁰	0,61	24,4	0,952
2	Nb ⁹⁵	0,16	2,8	0,721
3	Ru ¹⁰⁶	0,039	0,6	0,281
4	Ce ¹⁴⁴	0,3	7,0	0,868
5	Pm ¹⁴⁷	0,22	~3,0	0,722
6	RaD ²¹⁰	0,018	~0,28	0,135
7	RaE ²¹⁰	1,17	~68	0,967

Относительная активность этих продуктов изменяется во времени в связи с процессами распада [3].

По известным значениям P_i и относительной активности нетрудно оценить самопоглощение излучения смеси осколочных продуктов.

В том случае, когда препарат состоит из смеси различных радиоактивных элементов, активность фильтра можно определить по формуле (1). Например, для смеси продуктов деления через два года после распада из формулы (1) по данным табл. 5 и относительным активностям продуктов деления урана-235 [3] получаем, что при $\epsilon = \omega = \delta = K_i = q_i = 1$

$$\eta = P_1 S_1 + P_2 S_2 + \dots + P_5 S_5 = 0,952 \times 0,092 + 0,721 \times 0,018 + 0,281 \times 0,067 + 0,868 \times 0,584 + 0,722 \times 0,239 = 0,799.$$

Таким образом, в результате неучета самопоглощения имеет место заметное занижение результатов измерений. В данном примере имеем занижение действительной активности на 20%.

Самопоглощение RaD²¹⁰ и RaE²¹⁰ в данном примере не учитывалось, так как RaE, имеющий полупериод распада 5 дней, является дочерним продуктом RaD, имеющего полупериод распада 22 года, поэтому его вклад в излучение ничтожен. Сам RaD имеет очень большой фактор самопоглощения, поэтому он практически полностью поглощается навеской пыли в 3 мг и не оказывает заметного влияния на измеряемую активность.

В ходе работы было исследовано влияние размеров фильтра на эффективность счета. Для этой цели наряду с круглыми фильтрами площадью 9,6 см² использовались прямоугольные фильтры площадью 98,0 см².

Результаты обсчета прямоугольных фильтров № 10 и 11, представленные в табл. 6, и сравнение их с данными табл. 4 свидетельствуют о том, что увеличение поверхности фильтров и обсчет их с помощью пакета счетчиков приводят к росту эффективности счета.

Кроме того, увеличение поверхности фильтра при сохранении постоянства объема фильтруемого воздуха приводит к уменьшению толщины слоя пыли d , оседающей на фильтре, и, следовательно, к уменьшению самопоглощения.

Особенно заметно различие эффективности счета на прямоугольных и круглых фильтрах при сравнении кривых распада естественной радиоактивности.

На рис. 4 и 5 представлены кривые распада естественной радиоактивности на прямоугольном фильтре № 10 и круглом фильтре № 9 соответственно, зарегистрированные с помощью одного и того же ра-

диометра [1], снабженного самописцем Н-372/2, при одном и том же интервале времени между окончанием фильтрации и началом отсчета.

Из сравнения превышения начальных активностей n над фоном n_{ϕ} по кривым рис. 4 и 5 видно, что скорость счета от прямоугольного фильтра приблизительно в 1,7 раза больше, чем от круглого фильтра.

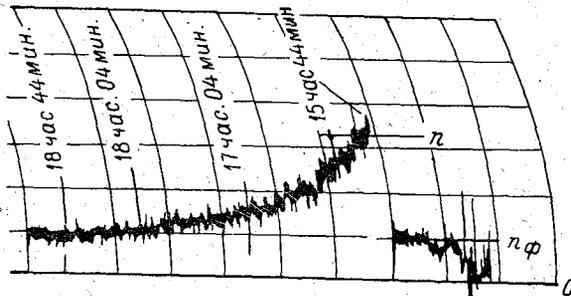


Рис. 4. Кривая распада на фильтре № 10.

Это происходит несмотря на уменьшение удельной скорости фильтрации до $1,6 \text{ л/мин.см}^2$ и применение цилиндрических счетчиков СТС-5 со стальным катодом, которые непригодны для измерения β -излучений с $E < 0,4 \text{ Мэв}$.

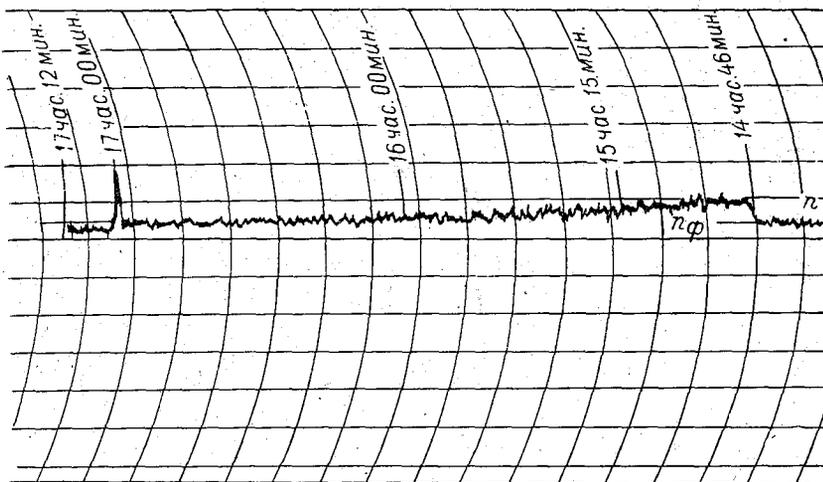


Рис. 5. Кривая распада на фильтре № 9.

Очевидно, что повышение скорости счета связано с повышением эффективности счета в результате применения пакета счетчиков и увеличенной поверхности фильтров, что создало условия счета из телесного угла, близкого к 2π .

Измеряемые небольшие значения концентрации активности в воздухе — около $2,6 \cdot 10^{-16}$ кюри/л, которые можно назвать фоновыми, свидетельствуют об относительной чистоте атмосферы во время проведения измерений. Это подтверждается данными планшетных измерений, которые велись параллельно с фильтрацией. Результаты в пределах ошибки планшетного метода не показали наличия заметной радиоактивности в осадениях.

Таблица 6

Результаты обсега прямоугольных фильтров, $S=98,0 \text{ см}^2$

№ фильтра	Дата		Время фильтрации, час. мин.	Объем фильтруемого воздуха $v \text{ м}^3$	Скорость счета фильтра n_p имп/мин.	$\delta_n \%$
	снятия фильтра	обсега фильтра				
10	11/ХП	14/ХП	12 00	109,2	2,1	30
11	15/ХП	16/ХП	19 10	172,76	5,0	14
11	15/ХП	17/ХП	19 10	172,76	2,6	25

В январе 1961 г. были продолжены измерения концентрации радиоактивных аэрозолей с помощью описанной выше установки. Одновременно велись такие же измерения с помощью аналогичной установки, но с одним каналом фильтрации в точке № 2. Время фильтрации во всех измерениях было равно 12 час., так как невозможно было обеспечить круглосуточную бесперебойную работу фильтро-вентиляционных установок. Это обстоятельство сказалось на точности результатов измерений. В среднем погрешности измерений составляли 100—150% (табл. 7).

Таблица 7

Данные об активности фильтров и концентрации активности в воздухе

Дата	Пункт 1						Пункт 2						
	№ фильтра		Объем $v \text{ м}^3$	Скорость счета n_p имп/мин.		Погрешность $\delta_n \%$	Концентрация $Q \cdot 10^{-16}$ кюри/л		№ фильтра	Объем $v \text{ м}^3$	Скорость счета n_p имп/мин.	Погрешность $\delta_n \%$	Концентрация $Q \cdot 10^{-16}$ кюри/л
	однослойного	двухслойного		однослойный фильтр	двухслойный фильтр		однослойный фильтр	двухслойный фильтр					
2/1	—	—	—	—	—	—	—	3	61,2	0,50	128	1,44	
3/1	—	—	—	—	—	—	—	4	61,8	0	—	0	
4/1	—	—	—	—	—	—	—	5	61,5	0,67	92	1,92	
5/1	1	—	74,6	0,59	—	81	1,39	6	60,6	0	—	0	
6/1	7	—	62,4	0,41	—	158	1,15	—	—	—	—	—	
7/1	9	—	62,2	1,62	—	42	4,58	11	51,9	0	—	0	
8/1	—	—	—	—	—	—	—	14	60,3	1,29	62	3,76	
9/1	—	12	48,4	—	0	—	—	15	63,3	0,16	438	0,45	
10/1	16	—	59,0	0,74	—	94	2,00	—	—	—	—	—	
11/1	—	18	48,9	—	0,81	86	—	17	60,5	1,96	36	5,70	
12/1	21	—	54,1	0	—	—	0	20	61,0	0	—	0	
13/1	—	24	50,0	—	0,53	186	—	23	62,3	0,47	146	1,33	
14/1	27	—	72,4	0,49	—	184	1,20	—	—	—	—	—	
15/1	—	—	—	—	—	—	—	39	60,8	0	—	0	
16/1	—	30	52,0	—	0,24	406	—	32	67,7	0,55	93	1,43	
17/1	33	—	71,0	1,10	—	64	2,72	—	—	—	—	—	
Среднее	—	—	—	—	—	—	1,86	1,39	—	—	—	1,33	

Если рассматривать средние величины за период измерений, результат, полученный в 1961 г., в пределах ошибок измерений совпадает с результатом, полученным в 1959 г., как по однослойным фильтрам, так и по двухслойным (табл. 8).

Таблица 8

Сравнение измеренных концентраций

Год	Концентрация $Q \cdot 10^{-16}$ кюри/л		
	точка № 1		точка № 2
	однослойные фильтры	двухслойные фильтры	однослойные фильтры
1959	2,55	1,54	—
1961	1,86	1,39	1,33

Хотя среднее значение концентрации, полученное для точки № 2, и ниже на 29%, чем для точки № 1 по однослойным фильтрам, полученная разность значений концентрации лежит в пределах точности измерений. Поэтому результаты, полученные в точках № 1 и 2, дают, во-первых, некоторое среднее фоновое значение концентрации ($1,6 \times 10^{-16}$ кюри/л) и, во-вторых, свидетельствуют о том, что за период наблюдений не было больших отклонений от фонового значения концентрации.

Несмотря на большие погрешности измерений, полученные результаты дают возможность сделать выводы и рекомендации по разработке метода и установки для измерения концентрации радиоактивных аэрозолей.

1. Фильтро-вентиляционная установка с производительностью 4,5—9,0 м³/час и рекомендуемыми удельными скоростями фильтрации воздуха 7,5—10 л/мин.см² при времени, затрачиваемом на отбор пробы $t_{пр}=36$ час., и времени обсчета фильтра t и фона $t_{ф}$ около 100 мин. позволяет обнаружить концентрации долгоживущей активности порядка 10^{-16} кюри/л с помощью торцовых счетчиков (СБТ-7). При этом статистическая ошибка достигает 25—30% (при $n_{\beta}=2$ имп/мин.).

Установка подобного типа пригодна для измерения концентрации аэрозолей от 10^{-15} кюри/л и выше при $t_{пр}=36$ час. и времени обсчета t и $t_{ф}$ 140 и 90 мин. соответственно со статистической погрешностью около 5% (при $n_{\beta}=10$ имп/мин.).

2. Поскольку фоновые концентрации активности в настоящее время могут достигать значений 10^{-17} кюри/л, то аппаратура для измерения их концентрации должна обладать начальной чувствительностью 10^{-17} кюри/л. При достижении счетности n_{β} , соответствующей этой концентрации, около 10 имп/мин. статистическая погрешность измерений может быть доведена до 5% при $t=140$ мин. и $t_{ф}=96$ мин.

Для получения счетности 10 имп/мин. объем фильтруемого воздуха должен достигать 8000 м³.

При производительности вентилярующих устройств 9 м³/час для отбора проб потребуется время, равное 889 час. Такая продолжительность фильтрации неизбежно приводит к засорению фильтров. Поэтому при разработке аппаратуры необходимо или снижать начальную чувствительность до 10^{-16} кюри/л, или довольствоваться статистическими точностями измерения 10% и более, что уменьшает необходимое время фильтрации в 10 раз.

Эти данные относятся к обычно применяемым фильтрам с рабочей поверхностью около 10 см².

3. При применении фильтров с рабочей поверхностью 100—250 см² удельные скорости фильтрации воздуха снижаются в 10—25 раз, что

позволяет повысить производительность вентиляционных устройств до 90—225 м³/час и тем самым снизить необходимое время фильтрации до 90—35 час.

Однако для сохранения достаточно высокой эффективности счета необходимо применять или пакет цилиндрических счетчиков (СТС-5, СТС-6), или плоские счетчики с большой поверхностью типа СБТ-10 ($S \cong 270 \text{ см}^2$), или сцинтилляционные пленки с соответствующим светопроводом и фотоэлектронным умножителем с максимальным диаметром фотокатода.

4. Сокращение времени фильтрации до 4 или 24 час. при условии сохранения рекомендуемых сравнительно невысоких удельных скоростей фильтрации возможно лишь при увеличении рабочей поверхности фильтров до 0,34 и 0,06 м² соответственно.

Применение фильтров с такими большими поверхностями приводит к необходимости вводить предварительную обработку фильтров путем их озонения или растворения с последующим приготовлением стандартных мишеней для обсчета на счетных устройствах.

5. Для определения и контроля эффективности счета счетной установки целесообразно использовать образцовые источники излучения Sr⁹⁰—Y⁹⁰ активностью 2, 50 и 500 имп/см²мин. соответственно для фильтров с рабочей поверхностью 250, 100 и 10 см². Это позволяет уменьшить статистическую погрешность определения эффективности счета n от 10%, получаемую при использовании образцового препарата из KCl, до 1,5%.

Образцовые источники излучения целесообразно приготавливать из применяемых чистых фильтров, пропитывая их раствором соли соответствующей активности при последующем высушивании и закреплении поверхности фильтра целлулоидной пленкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Н. Н. Полевой радиометр для измерения относительной концентрации радиоактивной примеси в воздухе. Труды ГГО, вып. 83, 1958.
2. Баранов В. И. Радиометрия. Изд-во АН СССР, М., 1956.
3. Гедеев Л. И. Радиоактивные загрязнения атмосферы. Атомная энергия, т. 2, № 3, 1957.
4. Гусаров И. И., Ляпидевский В. И. Методика измерений естественной радиоактивности воздуха по продуктам распада радона. Санитария и гигиена, № 10, 1958.
5. Гусев Н. Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. Медгиз, М., 1956.
6. Кеирим-Маркус П. Б., Львова М. А. Метод абсолютных измерений активности источников β -излучения. Сб. «Исследования в области дозиметрии ионизирующих излучений». Изд-во АН СССР, М., 1957.
7. Сборник радиохимических и дозиметрических методик. Под ред. Н. Г. Гусева и др. Медгиз, М., 1959.
8. Спицын В. И. и др. Методы работы с применением радиоактивных индикаторов. Изд-во АН СССР, М., 1955.
9. Стýро Б. И. Вопросы ядерной метеорологии. Изд. АН Лит. ССР, Вильнюс, 1959.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРОВ ФПП-15

Дается оценка эффективности захвата фильтров ФПП-15, которая при удельной скорости фильтрации, равной 7,5 л/мин.см², равна 0,7.

В настоящее время сведений об эффективности фильтров, применяемых при аспирационном методе, еще недостаточно. Многие авторы [1, 7, 10] считают, что фильтры из искусственного волокна, в частности фильтры ФПП-15, обладают эффективностью захвата аэрозолей, близкой к 100%. Отмечается также, что эффективность захвата сильно зависит от удельной скорости фильтрации. Причем одни авторы [7] считают, что максимальная эффективность захвата достигается при удельной скорости фильтрации 1 л/мин.см² и что значительное повышение ее приводит к уменьшению эффективности захвата на 10—20%.

Другие авторы [3, 5] применяют удельные скорости фильтрации 7,5—10 л/мин.см² и указывают, что эффективность фильтров ФПП-15 составляет 83,7—91,8%, а фильтров удвоенной толщины — 99,9%.

Кроме того, некоторые авторы [9] считают, что эффективность захвата естественной радиоактивности меньше, чем искусственной, так как искусственная радиоактивность связана с более крупными аэрозолями.

Ввиду того что имеющиеся сведения об эффективности фильтров несколько противоречивы, представляет интерес оценить эффективность фильтров, применяемых при аспирационном методе [2], при удельной скорости фильтрации 7,5 л/мин.см².

С этой целью было проведено сравнение результатов измерений, полученных в [2] при фильтрации воздуха через однослойные фильтры ФПП-15 и через двухслойные, полученные сложением двух обыкновенных фильтров собирающими поверхностями навстречу друг другу. Результаты измерений представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Концентрация активности $Q \cdot 10^{-16}$ кюри/л в воздухе в декабре 1959 г.

Фильтр	2/XII		4/XII		9/XII	Среднее
ФПП-15 (однослойный) . . .	—	—	3,1	2,0	2,6	2,57
ФПП-15 (двухслойный) . . .	2,5	0	—	—	2,1	1,53

Как видно из табл. 1, результаты измерений, полученные с помощью двухслойных фильтров, отличаются более низкими значениями, чем результаты, полученные с помощью однослойных фильтров. То же самое можно сказать и о результатах, полученных в 1961 г. (табл. 2).

Таблица 2

Концентрация активности $Q \cdot 10^{-16}$ кюри/л в воздухе в январе 1961 г.

Фильтр	5/I	6/I	7/I	9/I	10/I	11/I	12/I	13/I	14/I	16/I	17/I	Среднее
ФПП-15 (однослойный)	1,4	1,2	4,6	—	2,0	—	0	—	1,2	—	2,7	1,87
ФПП-15 (двухслойный)	—	—	—	0	—	2,9	—	1,9	—	0,8	—	1,4

Такое занижение результатов для двухслойных фильтров может быть обусловлено поглощением мягких компонентов β -излучения подложкой из марли, так как одна из подложек двухслойного фильтра оказывается между накопленной на фильтре β -активностью и окном торцового счетчика.

Степень ослабления β -излучения в подложке можно оценить, используя выражение для определения коэффициента прозрачности слоя [6, 8] и данные для относительной активности продуктов деления U^{235} , например, в возрасте двух лет [4], представленные в табл. 3. Коэффициент прозрачности для суммы продуктов деления представим в виде

$$K = \sum_i S_i K_i = \sum_i S_i e^{-\frac{0,693 d}{\Delta_{1/2}^i}}, \quad (1)$$

где S_i — вероятность распада i -того частичного спектра, K_i — частичный коэффициент прозрачности подложки из марли толщиной $d = 3 \div 5$ мг/см², $\Delta_{1/2}^i$ — слой половинного поглощения в алюминии β -частиц i -того частичного спектра.

По формуле (1) и данным табл. 3 получены значения коэффициента прозрачности 0,647 и 0,512 для $d = 3$ мг/см² и $d = 5$ мг/см² соответственно. Следовательно, подложка на двухслойных фильтрах действительно может занижать значения измеряемой концентрации активности на величины до 35—50%, если не учитывать поглощение.

Таблица 3

Значения S_i и K_i для продуктов деления U^{235}

Элемент	Sr ⁹⁰	Nb ⁹⁵	Ru ¹⁰⁶	Ce ¹⁴⁴	Pm ¹⁴⁷
S_i	0,092	0,018	0,067	0,584	0,239
K_i ($d = 3$ мг/см ²)	0,919	0,476	0,031	0,743	0,500
K_i ($d = 5$ мг/см ²)	0,868	0,291	0,003	0,647	0,215

Из полученных результатов следует, что при измерении активности двухслойных фильтров необходимо удалять подложку с той стороны фильтра, на которую собирается активность из воздуха при его фильтрации. Только после этого можно производить сравнение эффективности однослойного и двухслойного фильтров. Поэтому у каждого двухслойного фильтра были осторожно, чтобы не повредить его, уда-

лены подложки с соответствующей стороны. После этого каждый фильтр подвергался повторному измерению активности. Следует отметить, что на удаленных подложках активность обнаружена не была.

Результаты измерений представлены в табл. 4, из которой видно, что в большинстве случаев Q_1 больше, чем Q_2 , но меньше, чем Q_2' . Наблюдаемые в некоторых случаях отклонения от этого обусловлены только статистическим характером распада, так как измерялась одна и та же действительная концентрация активности.

Таблица 4

Концентрация активности, измеренная с помощью однослойных, двухслойных и двухслойных с удаленной подложкой фильтров в январе 1961 г.

Фильтр и концентрация активности	5/1	6/1	7/1	9/1	10/1	11/1	12/1	13/1	14/1	16/1	17/1	Среднее
Однослойный, $Q_1 \cdot 10^{-16}$ кюри/л	1,4	1,2	4,6	3,2	2,1	0	0	0,6	1,2	2,4	2,7	1,76
Погрешность $\delta\%$	94	171	55	132	107	—	—	435	197	113	77	
Двухслойный, $Q_2 \cdot 10^{-16}$ кюри/л	0,9	1,1	0	0	0	2,9	1,7	1,9	4,1	0,8	0,6	1,27
Погрешность $\delta\%$	168	266	—	—	—	99	187	139	97	419	461	
Двухслойный с удаленной подложкой, $Q_2' \cdot 10^{-16}$ кюри/л	1,8	4,0	2,2	1,8	1,5	1,4	2,5	2,8	2,8	4,7	2,2	2,5
Погрешность $\delta\%$	238	97	229	152	370	170	211	86	147	92	206	

Измеряемая фоновая концентрация активности не имела резких изменений ото дня ко дню. Поэтому отношение средних концентраций активности в табл. 4 является отношением эффективностей счета.

Основываясь на данных [5] о том, что эффективность двухслойных фильтров F_2 равна 0,999, приводим полученные значения Q_1 и Q_2 к эффективности 100% при помощи следующих соотношений:

$$f_1 = \frac{\bar{Q}_1}{0,999 \bar{Q}_2} = 0,7, \quad f_2 = \frac{\bar{Q}_2}{0,999 \bar{Q}_2} = 0,5;$$

отсюда

$$Q_{1\text{ пр}} = \frac{Q_1}{f_1} = \frac{Q_1}{0,7}, \quad Q_{2\text{ пр}} = \frac{Q_2}{f_2} = \frac{Q_2}{0,5},$$

где $Q_{1\text{ пр}}$ и $Q_{2\text{ пр}}$ — приведенные значения концентрации активности по однослойным и двухслойным фильтрам, а \bar{Q}_1 , \bar{Q}_2 и \bar{Q}_2' — средние значения концентрации активности из табл. 4.

Полученные приведенные значения концентрации активности, а также средние из трех значений приведенных концентраций представлены в табл. 5.

Таблица 5

Приведенные концентрации активности

Концентрация активности	5/1	6/1	7/1	9/1	10/1	11/1	12/1	13/1	14/1	16/1	17/1
$Q_{1\text{ пр}} \cdot 10^{-16}$ кюри/л	2,0	1,7	6,6	4,6	3,0	0	0	0,9	1,7	3,3	3,9
$Q_{2\text{ пр}} \cdot 10^{-16}$ кюри/л	1,8	2,2	0	0	0	5,8	3,4	3,8	8,2	1,6	1,2
$Q_2' \cdot 10^{-16}$ кюри/л	1,8	4,0	2,2	1,8	1,5	1,4	2,5	2,8	2,8	4,7	2,2
$\bar{Q}_{\text{ пр}}$ кюри/л	1,9	2,6	2,9	2,1	1,5	2,4	2,0	2,4	4,2	3,1	1,8

При сравнении кривых $Q_{1\text{пр}}$, $Q_{2\text{пр}}$ и Q_2' с $Q_{\text{пр}}$ (рис. 1), построенных по табл. 5, видно, что кривая Q_2' довольно хорошо совпадает с кривой $Q_{\text{пр}}$. Кривая $Q_{\text{пр}}$ как среднее из приведенных значений концентраций

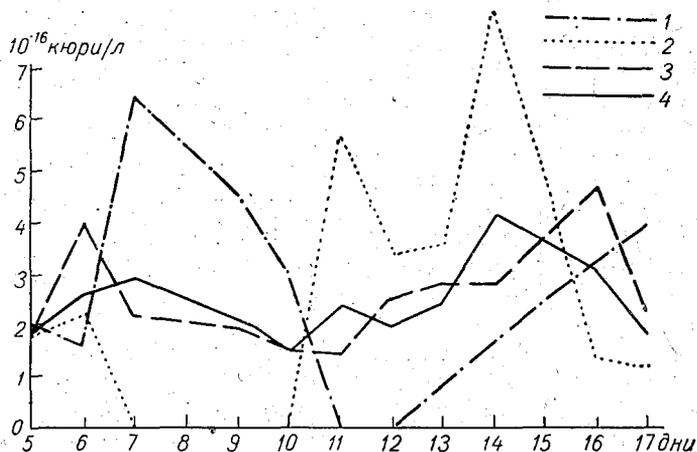


Рис. 1. Ход приведенной концентрации активности.
1 — для однослойных фильтров, 2 — для двухслойных фильтров,
3 — для двухслойных фильтров с удаленной подложкой, 4 — среднее
из трех значений.

наиболее достоверно отражает действительный ход концентрации активности. Отсюда следует, что найденные значения коэффициентов $f_1=0,7$ и $f_2=0,5$ при удельной скорости фильтрации $7,5 \text{ л/мин.см}^2$ можно принять за коэффициенты эффективности F_1 и F_2 для однослойных и двухслойных фильтров соответственно, если для двухслойного фильтра с удаленной подложкой принято значение эффективности захвата $F_2'=0,999$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аглинцев К. П. Дозиметрия ионизирующих излучений. Гостехиздат, М., 1957.
2. Александров Н. Н. Возможности аспирационного метода измерения радиоактивности атмосферы (см. наст. сборник).
3. Белоусов А. З. и др. Методика определения естественного радиоактивного фона атмосферного воздуха, обусловленного аэрозолями. Санитария и гигиена, № 10, 1958.
4. Гедеев Л. И. Радиоактивные загрязнения атмосферы. Атомная энергия, т. 2, № 3, 1957.
5. Гусаров И. И., Ляпидевский В. И. Методика измерения естественной радиоактивности воздуха по продуктам распада радона. Санитария и гигиена, № 10, 1958.
6. Кеирим-Маркус П. Б., Львова М. А. Метод абсолютных измерений активности источников β -излучения. Сб. «Исследования в области дозиметрии ионизирующих излучений». Изд-во АН СССР, М., 1957.
7. Сборник радиохимических и дозиметрических методик. Под ред. Н. Г. Гусева и др. Медгиз, М., 1959.
8. Спицын В. И. и др. Методы работы с применением радиоактивных индикаторов. Изд-во АН СССР, М., 1955.
9. Стыро Б. И. Вопросы ядерной метеорологии. Изд. АН ЛитССР, Вильнюс, 1959.
10. Энтон Н. Разработка и конструирование серии точных детекторов для измерения радиоактивных аэрозолей и применение их в целях дозиметрического контроля. Сб. «Дозиметрия ионизирующих излучений». Гостехиздат, М., 1956.

Н. Н. АЛЕКСАНДРОВ, С. И. ЗАЧЕК

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ РАЗНОСТИ СРЕДНИХ СКОРОСТЕЙ СЧЕТА ИМПУЛЬСОВ, СТАТИСТИЧЕСКИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ

Рассматриваются способы измерения и регистрации малых разностей скоростей счета случайных величин с помощью сравнивающего и пересчетного устройств на декатронах и дифференциального электромеханического регистратора со ступенчато-скользящим осреднением.

Часто в измерительной практике приходится сталкиваться с измерением разности скоростей поступления импульсов на вход измерительного устройства от каких-либо двух источников импульсов. Например, при градиентных измерениях средней скорости ветра с помощью контактных анемометров необходимо определять разность средних скоростей счета импульсов от датчиков, расположенных на разных уровнях.

В тех случаях, когда требуется определять небольшие разности средних скоростей счета импульсов при значительной величине самих сравниваемых скоростей счета, для уменьшения статистической погрешности измерения увеличивают время измерения этих величин.

На практике бывает удобнее регистрировать разность сравниваемых величин, чем регистрировать каждую из этих величин и затем брать их разность. Но при этом возникают дополнительные трудности, связанные со случайным распределением во времени сравниваемых величин.

Для измерения разности двух величин используются дифференциальные методы. Обычно эти методы реализуются с помощью симметричных усилителей постоянного тока, на выходе которых получается разность токов, пропорциональная разности интенсивностей импульсов, поступающих на два входа устройства [3, 8], или с помощью кольцевых реверсивных счетчиков [1, 7].

Первые обладают всеми недостатками усилителей постоянного тока, что существенно при измерении малых разностей. Кольцевые реверсивные схемы, как правило, пригодны для измерения разностей периодически следующих импульсов, действующих соответственно на два входа не одновременно, а через некоторый интервал времени, превышающий разрешающее время схемы.

При измерении разности скоростей счета импульсов от случайных процессов или периодических, когда может иметь место одновременное поступление импульсов на два входа, эти схемы непригодны из-за просчетов. Поэтому для измерения малых разностей скоростей счета импульсов дифференциальным методом необходимо применять сравнивающие устройства, работающие надежно при любом интервале времени между импульсами, поступающими на вход этого устройства.

Такое сравнивающее устройство может быть построено:

а) на коммутаторном декатроне, работающем в реверсивном режиме с последующим пересчетным устройством или регистратором с большой постоянной времени, осуществляющим скользящее осреднение, — электронный вариант;

б) на дифференциальном электромеханическом счетчике, управляемом импульсными двигателями или электромагнитами с последующим регистратором, осуществляющим ступенчато-скользящее осреднение, — электромеханический вариант.

Электронный вариант сравнивающего устройства

Известно, что декатроны с двухимпульсным управлением, включенные в реверсивную схему на выходе, выдают разность количества импульсов, поступивших соответственно на первый и второй входы схемы [6], независимо от интервала времени между импульсами. Если средние скорости счета импульсов, поступающих на первый и второй входы схемы, равны, то в среднем их разность должна быть равна нулю. Но в силу случайного характера распределения сравниваемых величин в каждый данный момент их разность тоже будет случайной величиной [9, 10, 11] и поэтому может отличаться от нуля.

Рассмотрим два значения числа отсчетов:

$$n_1 = \frac{N_1}{t_1} \quad \text{и} \quad n_2 = \frac{N_2}{t_2}, \quad (1)$$

где N_1 и N_2 — количество импульсов, сосчитанных соответственно за время t_1 и t_2 .

Если N_1 и N_2 достаточно велики, то можно предположить, что они подчиняются гауссовскому распределению. Тогда стандартная ошибка разности $n_1 - n_2 = \Delta n > 0$ определяется выражением

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{N_1}{t_1^2} + \frac{N_2}{t_2^2}} = \sqrt{\frac{n_1}{t_1} + \frac{n_2}{t_2}} \quad (2)$$

или

$$\delta_n = \frac{\sigma_n}{\Delta n} = \frac{1}{\Delta n} \sqrt{\frac{n_1}{t_1} + \frac{n_2}{t_2}} \quad (3)$$

При $t = t_1 = t_2$ имеем

$$\delta_n = \frac{\sqrt{n_1 + n_2}}{\Delta n \sqrt{t}} \quad (4)$$

Если $\Delta n > 3\sigma_n$, то вероятность того, что правильное значение Δn равно нулю или отрицательно [11], меньше, чем 0,0014.

Определим длительность периода осреднения, чтобы измерить разность между скоростями счета n_1 и n_2 . Пусть их отношение равно

$$\frac{n_1}{n_2} = 1 + h, \quad (5)$$

где $h \geq 0$.

Для того чтобы установить существование разности $n_1 - n_2 = \Delta n$, мы должны иметь, согласно (4) и (5),

$$\delta_n = \frac{\sigma_n}{\Delta n} = \frac{\sqrt{2+h}}{h \sqrt{n_2 t}} \approx \frac{\sqrt{2}}{h \sqrt{n_2 t}} < \frac{1}{3}.$$

Таким образом, время, необходимое для наблюдения, определяется из выражения

$$t \geq \frac{18}{n_2 h^2}. \quad (6)$$

Для значения $n_2 = 25$ имп/мин. и заданных значений Δn необходимое для наблюдения время t представлено в табл. 1.

Таблица 1

Время, необходимое для наблюдения, если $n_2 = 25$ имп/мин.										
Δn имп/мин.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
t мин.	450	112,5	50	27	18	12,5	9,2	7,2	5,5	4,5

Как видно из данной таблицы, время, необходимое для надежного определения существования разности между сравниваемыми скоростями счета, увеличивается с уменьшением самой разности.

Поскольку в сравнивающее устройство непрерывно поступают две последовательности импульсов с мгновенными интенсивностями $n_1(t)$ и $n_2(t)$, то на выходе выдается мгновенная разность $n(t) = n_1(t) - n_2(t)$, которая, как уже отмечалось, в силу случайного характера распределения сравниваемых величин может значительно отличаться от среднего значения.

Например, если имеем средние скорости счета двух сравниваемых последовательностей импульсов, равные 1,1 и 1,0 имп/сек. соответственно, то через 100 сек. на выходе сравнивающего устройства мы должны иметь разность $110 - 100 = 10$ имп. Это означает, что разрядное свечение в декатроне должно пройти последовательно все 10 катодов, совершив полный оборот, вернуться на нулевой катод. Но, хотя через каждые 10 сек. среднее значение разности будет увеличиваться на единицу, разрядное свечение в силу случайного характера процесса будет колебаться возле очередного катода в направлении прямого и обратного счета, что вызывает ошибку отсчета.

Рассмотрим колебания разрядного свечения возле нулевого катода, с которого выдается выходной сигнал, как только на нем появляется разрядное свечение. Очевидно, что выходной сигнал выдается независимо от направления перехода разрядного свечения через нулевой катод.

Предполагаем, что вероятности переходов разрядного свечения с каждого катода в прямом и обратном направлениях одинаковы и равны $1/2$. Разобьем ошибку измерения на m одинаковых элементарных ошибок δ , равных 1 имп/сек.

В этом случае вероятность того, что разрядное свечение будет перенесено через $(m - n)$ катодов в направлении прямого счета и через n катодов в направлении обратного счета и что результирующий отсчет x_n равен $(m - 2n) \delta$, будет [9]

$$p_n = \frac{m(m-1) \dots (m-n+1)}{n!} \left(\frac{1}{2}\right)^m,$$

где m — полное число отсчетов по декатрону.

Допустим, что в течение 10 сек. может произойти $m = 10$ рассматриваемых переносов разрядного свечения, для которых соответствующие значения x_n и p_n представлены в табл. 2.

Средняя разность скоростей счета, по существу, является ее математическим ожиданием и равна

$$\bar{X} = \sum_{n=0}^m x_n p_n,$$

где x_n — результирующий отсчет, p_n — вероятность появления отсчета x_n .

В данном случае имеем математическое ожидание центрированной случайной величины, которое равно нулю. Но если рассматривать вероятное число переходов разрядного свечения через нулевой катод независимо от их направления, то его можно оценить через математическое ожидание числа переходов при условии, что каждому результирующему отсчету x_n соответствует максимально возможное число переходов x'_n .

В этом случае вероятное число переходов через нулевой катод может быть определено по соотношению

$$\bar{X}' = \sum_{n=0}^m x'_n p_n.$$

Результат расчета по этой формуле приведен в последней графе табл. 2.

Таблица 2

Связь между числом переходов разрядного свечения, результирующим отсчетом и вероятностью

Число переходов разрядного свечения в направлении		Результирующий отсчет x_n	Возможное число переходов через нулевой катод x'_n		Вероятность результирующего отсчета p_n	$x'_n p_n$
прямого счета m	обратного счета n		минимальное	максимальное		
10	0	10 δ	1	1	0,00098	0,00098
9	1	8 δ	0	2	0,0098	0,0196
8	2	6 δ	0	3	0,0441	0,1323
7	3	4 δ	0	4	0,1170	0,4680
6	4	2 δ	0	5	0,2060	1,0300
5	5	0	0	5	0,2470	1,2350
4	6	-2 δ	0	5	0,2060	1,0300
3	7	-4 δ	0	4	0,1170	0,4680
2	8	-6 δ	0	3	0,0441	0,1323
1	9	-8 δ	0	2	0,0098	0,0196
0	10	-10 δ	1	1	0,00098	0,00098

$$\bar{X}_{\text{пер}} = \Sigma = 4,53676$$

Полученное вероятное максимальное число переходов, равное 4,5, означает, что на выходе сравнивающего устройства получается около пяти ложных отсчетов на один полезный переход разрядного свечения в прямом направлении.

Это обстоятельство не позволяет использовать непосредственно сравнивающее устройство на декатроне для определения разности мгновенных значений скоростей счета, так как вероятность регистрации ложных импульсов, кратных десяти, велика. Но если между датчиком и сравнивающим устройством поместить осредняющее устройство с большой постоянной времени, то точность определения разности су-

ущественно повышается. Например, если время осреднения выбирается согласно табл. 1, то искомая разность может определяться с погрешностью, не превышающей $3\sigma_n$.

Роль осредняющих устройств, расположенных соответственно перед каждым из входов сравнивающего устройства, могут выполнять пересчетные устройства. Последние осуществляют выравнивание интервалов между регистрируемыми импульсами [4].

Известно, что для случайных величин, распределенных по закону Пуассона, средний интервал между двумя последовательными событиями равен

$$\bar{t} = \frac{1}{n},$$

дисперсия равна

$$D_t = \frac{1}{n^2}$$

и относительная флуктуация интервала оказывается очень большой:

$$\delta_t = \frac{\sqrt{D_t}}{\bar{t}} = 1. \quad (7)$$

Это означает, что длительность интервала между последовательными импульсами довольно часто отличается от своего среднего значения в несколько раз в ту или другую сторону.

При очень больших коэффициентах пересчета k наблюдается практическое постоянство интервалов между последовательными отсчетами [4]. Относительная флуктуация интервалов на выходе пересчетного устройства в \sqrt{k} раз меньше, чем на его входе,

$$\delta_{t'} = \frac{\sqrt{kD_t}}{k\bar{t}} = \frac{1}{\sqrt{k}} \delta_t. \quad (8)$$

При переходе к статистике отсчетов в течение времени, если $n\tau$ велико [4], имеем относительную флуктуацию отсчетов

$$\delta_n = \frac{1}{\sqrt{kn\tau}}.$$

Соответственно флуктуация разности по (4) равна

$$\delta_n = \frac{\sqrt{n_1 + n_2}}{\Delta n \sqrt{k\tau}},$$

что при значениях $\tau=1$ мин., $n_1=26$ имп/мин. и $n_2=25$ имп/мин. дает флуктуацию, равную

$$\delta_n = \pm \frac{\sqrt{51}}{1\sqrt{10}} = \frac{7,15}{3,16} = \pm 2,27 \quad (\text{или } 227\%)$$

вместо $\pm 7,15$ при $k=1$. Следовательно, вероятность определения разности $\Delta n=1$ имп/мин. с ошибкой, превышающей $\sigma = \pm 2,27$, составляет 0,31, а с ошибкой, превышающей $3\sigma = \pm 6,81$, — всего 0,0027.

Таким образом, флуктуация отсчетов при применении пересчетной схемы для выравнивания интервалов настолько уменьшается, что вероятность ложных отсчетов в сравниваемом устройстве становится ничтожной.

Блок-схема сравнивающего устройства с пересчетной схемой представлена на рис. 1.

Пересчетные схемы могут быть собраны в зависимости от необходимого коэффициента пересчета на одном или нескольких двухимпульсных счетных декатронах типа ОГ-5.

Применение декатронов в счетных установках позволяет в 2—4 раза снизить общее число ламп, сопротивлений и емкостей, а следовательно, уменьшить их габариты.

Для получения разности двух последовательностей импульсов применена схема реверсивного счетчика на декатроне [6], сравнивающая эти последовательности одновременно.

Само сравнивающее устройство состоит из двух управляющих устройств на лампах L_1 и L_2 и двухимпульсного реверсивного декатрона типа А-101, осуществляющего реверсивный счет импульсов (рис. 2). Выходные точки обоих управляющих устройств подключены к кольцам первого и второго подкатодов через диоды D_{1-4} .

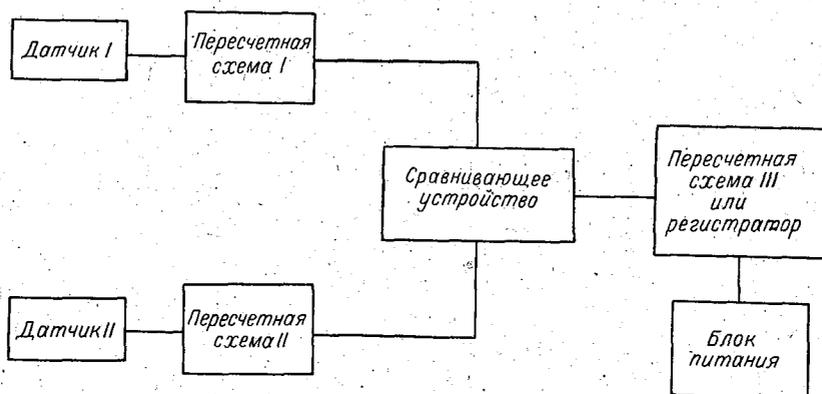


Рис. 1. Блок-схема сравнивающего устройства с пересчетной схемой.

Декатрон представляет собой многоэлектродную газонаполненную лампу, состоящую из дискового анода и расположенных вокруг него 10 проволочных катодов и 20 подкатодов, разбитых в свою очередь на 10 первых подкатодов и 10 вторых подкатодов.

При подаче входных импульсов тлеющий разряд, горящий между анодом и одним из катодов, направленно перемещается вдоль кольца катодов с помощью управляющего устройства, создающего два последовательных импульса.

Если первый импульс попадает на кольцо первых подкатодов, а второй — на кольцо вторых подкатодов, то в декатроне создаются условия для переноса разряда в одном направлении.

Если же, наоборот, первый импульс попадает на кольцо вторых подкатодов, а второй — на кольцо первых подкатодов, то перенос разряда будет осуществляться в противоположном направлении.

В случае одновременной подачи управляющих импульсов от разных источников на оба входа направление и скорость перемещения разрядного свечения будут зависеть от соотношения частот обоих источников. Было экспериментально подтверждено, что даже при очень небольшом различии входных частот декатрон работает без ошибок при условии, что импульсы обоих управляющих схем идентичны [6]. Благодаря этому свойству реверсивные счетчики на декатронах выгодно отличаются от реверсивных счетчиков на тиратронах с холодным катодом типа РСК-1, созданных Я. Л. Блоком и Л. И. Кораблевым [1].

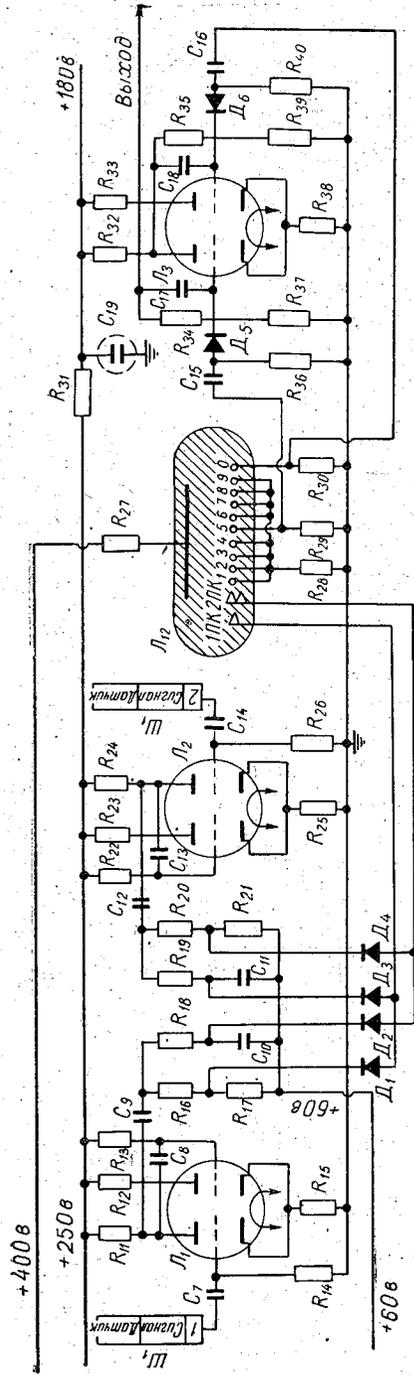


Рис. 2. Принципиальная схема сравнивающего устройства на коммутаторном декадроне с ключом.

Благодаря применению пересчетных схем, выравнивающих интервалы между импульсами, флуктуация разности сравниваемых скоростей счета в \sqrt{k} раз меньше первоначальной. Но все же она достаточно велика, чтобы вызывать ложные отсчеты на выходе сравнивающего устройства, если разрядное свечение колеблется возле нулевого катода, с которого выдается электрический импульс.

Чтобы избавиться от всех ложных импульсов, сравнивающее устройство строится на коммутаторном декатроне типа А-101 и снабжается ключом, с помощью которого система реагирует только на первый рабочий импульс. В качестве ключа используется триггер с двумя положениями устойчивого равновесия (рис. 2).

Триггер работает следующим образом. Пусть в исходном состоянии правая часть лампы L_3 заперта, а левая проводит ток. В этот момент приходит первый импульс с нулевого индикаторного катода декатрона на сетку правой половины лампы L_3 . Триггер опрокидывается, т. е. правая половина лампы открывается, и на выходе получается импульс. Все последующие импульсы, поступающие с нулевого индикаторного катода, не изменяют состояния триггера, так как все они действуют на сетку уже открытой правой половины лампы. Состояние триггера не изменится и после того, как импульсы перестанут поступать с нулевого индикаторного катода. Для нового опрокидывания триггера необходимо подать импульс на сетку левой половины триггера. На этот вход подключается пятый штырек индикаторного катода. Только после того, как разряд перейдет на пятый катод, получается импульс, который возвращает триггер в исходное положение, и схема вновь будет подготовлена для выдачи следующего импульса на последующее пересчетное устройство или регистратор.

Вычитающее устройство с пересчетными схемами на двух входах и электронным ключом на выходе позволяет при достаточно большом времени осреднения измерять малые разности скоростей счета с точностью 30% и меньше.

Таким образом, рассматриваемый дифференциальный прибор для измерения средней разности двух скоростей счета импульсов, случайно распределенных во времени, имеет:

а) два независимых входа, с которых импульсы поступают на устройства, выравнивающие интервалы между импульсами и построенные на счетных декатронах с коэффициентом пересчета 10^k (где k — число декатронов);

б) сравнивающее устройство, построенное на коммутаторном декатроне и выдающее на выходе величину, равную

$$\Delta N = \frac{N_1 - N_2}{10^k + 1} \text{ имп.,}$$

где N_1 и N_2 — количество импульсов, поступающих на первый и второй входы прибора соответственно;

в) электронный ключ, представляющий собой триггер с двумя положениями устойчивого равновесия, подавляющий ложные импульсы, вызванные флуктуациями разности возле нулевого катода в декатроне сравнивающего устройства;

г) пересчетное устройство, построенное на счетных декатронах с коэффициентом пересчета $10^{k'}$ (где k' — число декатронов в данном пересчетном устройстве), которое выдает окончательную величину

$$\Delta N = \frac{\Delta N}{10^{k'}} = \frac{N_1 - N_2}{10^{(k+k'+1)}} \text{ имп.,}$$

или регистратор с заданным интервалом скользящего осреднения, выдающий окончательную величину

$$n = \frac{\Delta N}{t} = \frac{N_1 - N_2}{t \cdot 10^{k+1}} \text{ имп/мин.},$$

где t — интервал осреднения.

При достаточно большом времени осреднения t , т. е. при $k'+1 \gg k$, для получения окончательного результата не нужно учитывать разность показаний устройств, выравнивающих интервалы, так как они дают мгновенные значения разности двух случайных величин.

Электромеханический вариант сравнивающего устройства с регистратором скорости счета со ступенчато-скользящим осреднением

Принцип действия прибора основан на методе ступенчато-скользящего осреднения скорости счета статистически распределенных импульсов, который состоит в том, что устройство, вырабатывающее среднюю скорость счета, выдает ее значения не в любой момент, а через определенные промежутки времени, меньшие интервала осреднения t , т. е.

$$\overline{n(t)} = \frac{1}{\tau} \int_{n \frac{\tau}{k}}^{n \frac{\tau}{k} + \tau} n(t) dt,$$

где $\overline{n(t)}$ — средняя скорость счета импульсов, $n(t)$ — мгновенная скорость счета, k — число промежутков времени, через которые за время τ устройство выдает среднее значение скорости счета.

Ниже описывается схема, которая в электромеханическом варианте реализует метод ступенчато-скользящего осреднения для измерения разности скоростей счета импульсов, поступающих на входы прибора от двух источников.

Электромеханический регистратор скорости счета содержит (рис. 3):

1) дифференциальный электромеханический счетчик, состоящий из импульсных двигателей $ИД_1$, $ИД_2$ и механического дифференциала $Д_1$;

2) устройство для смещения нуля, позволяющее получать среднюю скорость счета обоих знаков и содержащее в качестве основного узла механический дифференциал $Д_2$;

3) узел выработки средней скорости счета по методу ступенчато-скользящего осреднения;

4) лентопротяжный механизм;

5) приводной механизм.

Прибор в целом функционирует следующим образом. Из последовательности импульсов, поступающих на вход I с интенсивностью $n_1(t)$ с помощью механического дифференциала, вычитается последовательность импульсов интенсивности $n_2(t)$, поступающая на вход II .

Результат вычитания в виде угловой скорости $\omega(t)$, пропорциональной $[n_1(t) - n_2(t)]$, является тоже случайной величиной.

Угловая скорость $\omega(t)$ поступает на вход дифференциала $Д_2$ и в зависимости от знака разности $[n_1(t) - n_2(t)]$ может быть как положительной, так и отрицательной. Этот дифференциал осуществляет

сложение угловой скорости сателлита дифференциала Δ_1 с некоторой постоянной во времени скоростью ω_0 , чтобы обеспечить искусственное смещение нуля регистратора и получить возможность записывать разности скоростей счета импульсов обоих знаков. Сумма угловых скоростей, получаемая на выходе дифференциала Δ_2 и пропорциональная

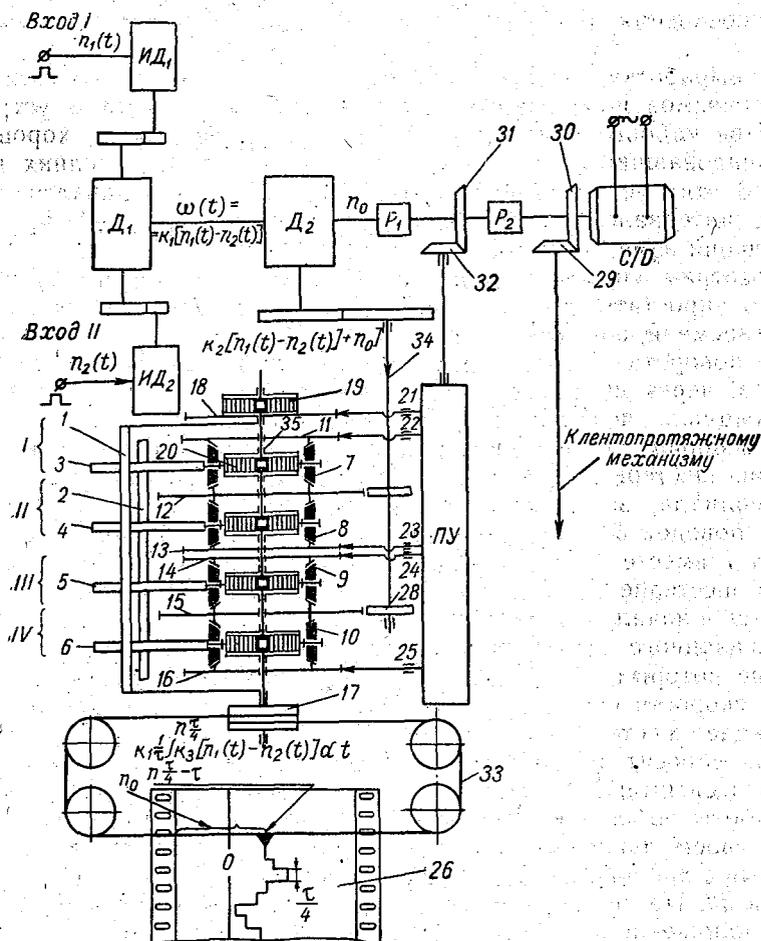


Рис. 3. Электромеханический вариант сравнивающего устройства и регистратора со ступенчато-скользящим осреднением.

$k_2[n_1(t) - n_2(t)] + \omega_0$, осредняется узлом выработки средней скорости счета и регистрируется на ленте 26. Ордината записи с учетом смещенной нулевой линии пропорциональна

$$\frac{1}{\tau} \int_{n \frac{\tau}{4} - \tau}^{n \frac{\tau}{4}} k_3 [n_1(t) - n_2(t)] dt,$$

т. е. средней скорости счета. Значение средней скорости счета за время τ выдается через каждую четверть интервала осреднения $\frac{\tau}{4}$.

Электромеханический вариант сравнивающего устройства не нуж-

дается в предварительном выравнивании интервалов между импульсами, так как на выходе он выдает разность с учетом ее знака. Поскольку в дальнейшем осуществляется скользящее осреднение этой разности за длительности промежутков времени, то на выходе регистратора средней скорости получается измеряемая средняя разность скоростей счета со стандартной ошибкой, определяемой выбранным интервалом осреднения и средними значениями сравниваемых скоростей счета.

Узел выработки средней скорости счета состоит из четырех наборных механизмов и кулачкового программно-управляющего устройства. В качестве наборного механизма выбран дифференциал, хорошо себя зарекомендовавший в ряде устройств для получения средних величин [5; 12]. В этих устройствах результат осреднения выдавался в конце каждого интервала, что приводит к искажению хода изменений средних значений измеряемого параметра.

Рассмотрим сначала работу лишь одного наборного механизма. С целью упростить ход объяснений возьмем за интервал осреднения отрезок времени, равный 10 мин.

Угол поворота оси за 10 мин. 34, пропорциональный средней скорости счета, через шестеренку 27 передается на ведущую шестерню 12 дифференциала первого наборного механизма. Сателлит 7, установленный в обойме 35 с возвратной пружиной спирального типа 20, при вращении шестерни 12 обкатывается по другой крайней шестерне 11 дифференциала, заторможенной с помощью собачки 12. На обойме имеется поводок 3. Если собачка 22 будет отведена от колеса 11, то сателлит 7 вместе с обоймой 35 под действием пружины 20, обкатываясь по шестерне 12, будет поворачиваться до тех пор, пока поводок 3 не упрется в начальный упор 2.

Из сказанного выше ясно, что угол поворота поводка 3 за 10 мин., в течение которых собачка 22 тормозит шестерню 11, пропорционален средней скорости счета. По истечении 10-минутного интервала собачка освобождает шестерню 11 и поводок 3 падает до упора 2, т. е. наборный механизм сбросит величину набранной средней скорости счета за прошедшую десятиминутку до нуля. В последующие 10-минутные интервалы цикл работы наборного механизма периодически повторяется.

При своем движении поводок 3 поворачивает ведомый поводок 1, связанный с храповым колесом 18 и пером регистратора через колесо 17 и тросик 33. По истечении 10 мин., когда поводок 3 вернется в свое исходное положение, храповое колесо 18, будучи заторможенным собачкой 21, останется вместе с пером самописца в том положении, до которого повернул его поводок 3. В этом положении поводок 1 остается в течение 10 мин. (в случае устройств, выдающих среднюю скорость только через каждые 10 мин.).

После того как поводок 3 вернется к исходному положению и собачка 22 затормозит шестерню 11, обойма дифференциала вновь начнет в течение 10 мин. поворачиваться. При этом возможны три случая.

1. Средняя скорость счета в последующую десятиминутку будет равна скорости за предыдущую десятиминутку. В этом случае поводок 3 по истечении 10 мин. повернется на угол, равный углу поворота за предыдущую десятиминутку, коснется ведомого поводка 1 и затем вновь «сбросится до нуля», оставив поводок 1 (а с ним и перо самописца) в прежнем положении.

2. Средняя скорость счета за последующие 10 мин. будет меньше, чем за предыдущие. В этом случае поводок 3 по истечении 10 мин. не дойдет до поводка 1. Для того чтобы ведомый поводок 1 (а с ним и перо)

изменил свое положение до вновь набранного значения средней скорости счета, собачка 21 за 8 сек. до конца каждой десятиминутки отпускает храповое колесо 18, которое под действием пружины 19 двигается до соприкосновения поводков 1 и 3; на соответствующее расстояние переместится и перо. Спустя 3 сек. собачка 21 вновь затормозит храповое колесо 18. Через 2 сек. собачка 22 отпустит шестерню 11, произойдет сброс наборного механизма и начнется новый цикл выработки средней скорости счета импульсов.

3. Средняя скорость счета в последующие 10 мин. больше, чем за предыдущую десятиминутку. В этом случае поводок 3 еще до конца десятиминутки подхватит поводок 1 и до конца 10-минутного интервала они будут поворачиваться вместе в сторону увеличения средней скорости счета. На соответствующее расстояние переместится перо.

Такова работа осредняющего устройства с одним наборным механизмом.

Очевидно, для того чтобы получать значения скорости счета, осредненные за 10 мин., например через каждые 2,5 мин., необходима система, состоящая из четырех наборных механизмов, подобных рассмотренному, и работающая по определенной программе. Эта программа предусматривает следующий порядок работы:

1) наборные механизмы должны начинать набор средней скорости счета со сдвигом во времени, равным 2,5 мин.;

2) собачка 21 должна освобождать храповик через каждые 2,5 мин. с тем, чтобы согласовать положение поводка 1 с соответствующим по времени поводком (одним из четырех — 3, 4, 5, 6).

Выполнение этих требований программы обеспечивается программным механизмом ПУ, который последовательно управляет собачками 21, 22, 23, 24 и 25.

Рассмотрим последовательности выработки средней скорости счета при ступенчато-скользящем осреднении. Пусть вначале поводки 3, 4, 5, 6 и 1 находятся в исходном состоянии, т. е. на упоре 2. Ось 34 начинает посредством шестеренок 27 и 28 вращать ведущие шестерни 12 и 15 двух пар дифференциалов наборных механизмов. До конца первых 2,5 мин. собачка 21 на короткое время освобождает храповик 18, и затем производится сброс в исходное положение поводка 4 (поводки 3, 5, 6 продолжают свое движение). После этого сброса наборный механизм II начинает набор со сдвигом во времени (2,5 мин.) по отношению к наборному механизму I. По истечении следующих 2,5 мин. то же самое произойдет с наборным механизмом III. Он начнет набор средней скорости со сдвигом на 2,5 мин. уже по отношению к наборному механизму II. После следующих 2,5 мин. и 7,5 мин. после начала цикла произойдет сброс наборного механизма IV, и он начнет набор со сдвигом 2,5 мин. по отношению к наборному механизму III. Заметим, что перед каждым сбросом наборных механизмов происходит освобождение храповика 18. К концу первых 10 мин. происходит сброс наборного механизма I, который сразу же начнет набор средней скорости счета. Значение средней скорости счета, набранной этим механизмом за 10 мин., сохраняется в течение 2,5 мин., после чего производится согласование поводка 1 с наборным механизмом II и т. д. Таким образом, мы будем получать значения скорости счета, осредненной за 10 мин., через 2,5 мин.

Изменив передаточное число редуктора P_2 , можно увеличить интервал осреднения до 1 часа при выдаче средней скорости счета через каждые 15 мин.

В заключение необходимо отметить, что вместо электрического двигателя СД в схеме можно применить пружинный двигатель (часы). Это

приводит лишь к изменению программного устройства, которое в этом случае будет представлять собой систему электромагнитов, управляемых часовым контактным устройством.

Преимуществами рассмотренного варианта измерителя средней скорости счета являются:

- 1) высокая надежность благодаря применению механических устройств;
- 2) устойчивость нулевого положения;
- 3) невысокие требования к форме и длительности входных импульсов;
- 4) возможность измерять положительные и отрицательные разности скоростей счета;
- 5) в приборе используются опробованные практикой и нашедшие применение в приборах М-12 и М-45 детали и узлы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блок Я. Л., Кораблев Л. И. Изобретение № 112084 кл. 21 g. 18, 1956.
2. Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. Гостехиздат, М., 1954.
3. Бреслав В. И. Дифференциальные ионизационные камеры для измерения периодов полураспада. Труды Ин-та физики АН ЛатвССР, IX, 1956.
4. Гольданский В. И. и др. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. Физматгиз, М., 1959.
5. Карпуша В. Е. и др. Самописец М-45 для регистрации средней скорости и направления ветра. Труды ГГО, вып. 103, 1960.
6. Липкин В. М. Декатроны и их применение. Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
7. Справочник по дозиметрическим, радиометрическим и электронно-физическим приборам, счетчикам, спинцилляторам и фотоумножителям. Атомиздат, М., 1959.
8. Стернзат М. С. Станционный электромеханический самописец ветра М-12. Труды ГГО, вып. 52 (114), 1955.
9. Уорсинг А., Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. ИЛ, М., 1953.
10. Фюнфер Э., Нейерт Г. Счетчики излучений. Атомиздат, М., 1961.
11. Яносси Л. Космические лучи. ИЛ, М., 1949.
12. E w a n s. App. fort Determ. of Minute Quan. of Ra, Tn in Sol, Lig, Gases. Rw. Sc. Instr., 6, 99—112, 1935.

ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ РАССЕЯНИЯ ТУМАНА

На основании анализа данных регистрации прозрачности, температуры и влажности воздуха в тумане устанавливается условие рассеяния тумана.

Приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования ослабления солнечной радиации в тумане. Дается решение системы уравнения тепло- и влагообмена в приземном слое воздуха при наличии тумана.

На основании полученных результатов предлагается метод прогноза времени рассеяния тумана.

До настоящего времени в работах по изучению туманов основное внимание обычно уделялось выяснению условий их образования. Причины рассеяния тумана исследовались весьма мало.

Одни из первых результатов в данном направлении были получены Б. В. Кирюхиным [2]. На основании обработки опытных данных он предложил в качестве условия рассеяния тумана положить равенство значений точки росы в вечернее время и в утренние часы после восхода солнца. Однако такое условие для практических целей часто недостаточно. Оно основано на предположении, что в течение ночи абсолютная влажность воздуха почти не изменяется, а это обычно не выполняется. Поэтому значения точки росы в вечерние и утренние часы могут существенно различаться между собой — разница между ними достигает нескольких градусов. На основании общих соображений можно полагать, что значения абсолютной влажности и точки росы во время рассеяния тумана примерно совпадают с соответствующими значениями в момент образования тумана. Действительно, в ночное время при образовании тумана в результате понижения температуры водяной пар, содержащийся в воздухе, частично конденсируется и переходит в жидкую или твердую фазу. После восхода солнца температура воздуха повышается. Это приводит к постепенному испарению капель или кристалликов тумана и после их полного испарения к рассеянию тумана.

Так же как до наступления минимальной температуры воздуха, в период образования тумана вместе с падением температуры понижается влажность воздуха, в утренние часы одновременно с нагреванием воздуха происходит повышение абсолютной влажности его. При этом точка росы в тумане остается примерно равной температуре, или, что то же самое, относительная влажность сохраняется почти постоянной и равной примерно 100%.

На поверхности почвы в период существования тумана также имеет место насыщение воздуха влагой. Систему, содержащую водяной пар и

капли тумана, можно рассматривать как замкнутую. Отсюда следует, что к моменту рассеяния тумана, когда капли тумана испаряются, точка росы должна примерно достигать своего значения в момент образования тумана.

Для проверки этого положения был подвергнут анализу опытный материал наблюдений на АМСГ, а также результаты наблюдений оптической лаборатории ГГО на ст. Кирполье, которые в настоящее время являются наиболее совершенными для решения поставленной задачи. На ст. Кирполье измерения производились с помощью регистратора прозрачности, позволявшего достаточно точно фиксировать появление

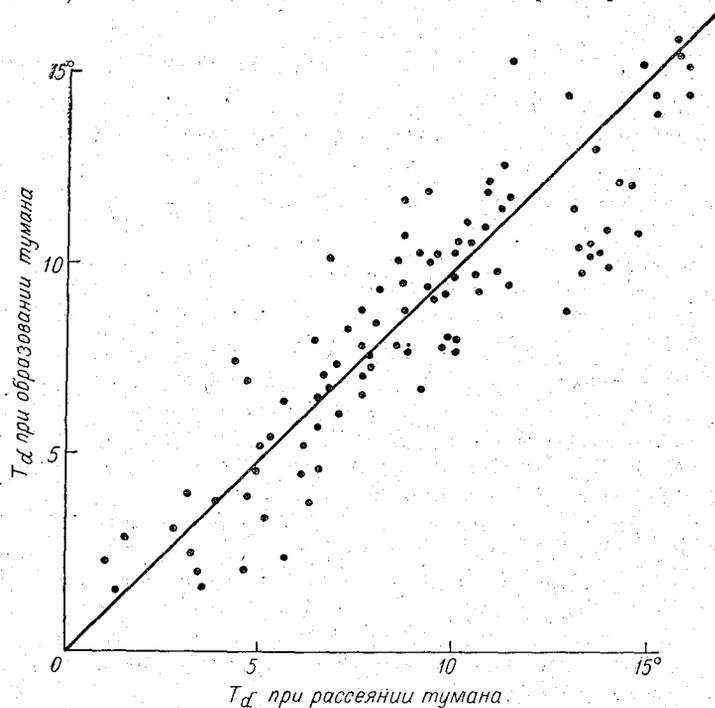


Рис. 1. Взаимосвязь точек росы при образовании и рассеянии тумана.

и рассеяние тумана. Одновременно производилась регистрация влажности и температуры воздуха. Результаты сопоставления полученных значений точки росы T_d представлены на рис. 1.

Таким образом, можно принять, что рассеяние тумана наступает в момент, когда температура воздуха достигает значения точки росы в момент образования тумана. Это позволяет свести задачу о прогнозе продолжительности тумана после восхода солнца к предсказанию повышения температуры в утренние часы. Однако, прежде чем переходить к последнему вопросу, необходимо предварительно остановиться на расчете солнечной радиации, поступающей к подстилающей поверхности в утренние часы, ибо она определяет нагревание воздуха.

Теория суточного хода суммарной радиации при безоблачном небе была предложена в работе [1]. Сопоставление данных расчетов с наблюдениями показало удовлетворительное согласование. Это позволяет перейти к обобщениям полученных результатов для случая наличия туманов.

В качестве исходных уравнений используем уравнения распределе-

ния коротковолновой радиации в сложной среде, состоящей из слоя тумана высотой H и выше лежащего слоя воздуха.

Введем прямолинейные потоки, направленные сверху вниз A и снизу вверх B . Изменения A и B с высотой z определяются системой уравнений:

$$\frac{dA}{dz} = \rho(\alpha'' m'' A - \alpha' m' B),$$

$$\frac{dA}{dz} = \frac{dB}{dz},$$
(1)

где ρ — плотность рассеивающей субстанции, m' и m'' — осредненные по направлениям величины секанса зенитного угла для восходящей и нисходящей радиации, α' и α'' — соответствующие коэффициенты рассеяния радиации в сторону, противоположную направлению ее распределения.

В качестве граничных условий служат следующие соотношения.

На верхней границе атмосферы при $z \rightarrow \infty$ $A = S_0 \sin h_{\odot}$, где S_0 — солнечная постоянная, h_{\odot} — высота солнца.

На подстилающей поверхности при $z=0$ $B = aA$, где a — альbedo подстилающей поверхности.

В соответствии с результатами работы [1] по определению суммарной радиации в случае безоблачного неба для слоев воздуха, расположенных выше слоя тумана ($z > H$), можно приближенно принять $m' = m'' = m_0$, где $m_0 = \operatorname{cosec} h_{\odot}$, $\alpha' = \alpha'' = \alpha$. Для слоя тумана ($z \leq H$), оптическая плотность которого достаточно большая, $m' = m'' = \bar{m}$, где $\bar{m} = 2$ и $\alpha' = \alpha''$. Это позволяет положить в (1) $m' = m'' = m$, $\alpha' = \alpha'' = \alpha$, считая при этом m и α разными в слое тумана и над ним.

Введем в (1) вместо z новую переменную

$$\tau = \int_0^z \alpha \rho m dz.$$

Тогда, интегрируя уравнения (1) по τ , получим

$$A - B = C$$

и

$$A + B = 2C\tau + D,$$

где C и D — постоянные интегрирования.

Удовлетворив далее граничные условия, найдем C и D . В результате получим, что суммарная радиация, достигающая поверхности земли, $I = A|_{z=0}$ определяется следующей формулой:

$$I = \frac{S_0 \sin h_{\odot}}{1 + (1-a)\tau_{\infty}},$$
(2)

где $\tau_{\infty} = \int_0^{\infty} \alpha \rho m dz$.

Аналогично суммарная радиация на верхней границе $I_H = A|_{z=H}$ выражается формулой

$$I_H = S_0 \sin h_{\odot} \frac{1 + (1-a)\tau_H}{1 + (1-a)\tau_{\infty}},$$

где $\tau_H = \int_0^H \alpha \rho m dz$.

Из полученных выражений непосредственно следует соотношение между суммарной радиацией на нижней и верхней границах тумана

$$I = \frac{I_H}{1 + (1-a)\tau_H}.$$

Обозначим значения α и ρ для слоя тумана ($z \leq H$) через α_1 и ρ_1 , а для выше лежащих слоев ($z \geq H$) — через α_2 и ρ_2 . Тогда

$$\tau_H = m \int_0^H \alpha_1 \rho_1 dz$$

и

$$\tau_\infty = m \int_0^H \alpha_1 \rho_1 dz + m_0 \int_H^\infty \alpha_2 \rho_2 dz.$$

На основании оценок значений τ_H и $\tau_\infty - \tau_H$ нетрудно убедиться, что для случаев, когда высота солнца не очень низкая и туманы не очень плотные, суммарная радиация на верхней границе тумана I_H по своей величине примерно равна суммарной радиации I_0 , достигающей земной поверхности при отсутствии тумана и сохранении всех прочих равных условий.

Величина I_0 в соответствии с (2) определяется формулой

$$I_0 = \frac{S_0 \sin h_\odot}{1 + f m_\odot}, \quad (3)$$

где $f = (1-a) \int_0^\infty \alpha_2 \rho_2 dz$.

Тогда аналогично запишем

$$I \approx \frac{I_0}{1 + f_\tau m}, \quad (4)$$

где $f_\tau = (1-a) \int_0^H \alpha_1 \rho_1 dz$.

Согласно (2) и (4), влияние тумана на ослабление солнечной радиации выражается в увеличении оптической толщины атмосферы. Чем более плотный туман и чем больше коэффициент рассеяния, тем меньше значение суммарной радиации, достигающей земной поверхности.

Соотношение (4) можно записать также в форме $I = \eta I_0$, где $\eta = \frac{1}{1 + f_\tau m}$.

Отсюда следует, что изменение I со временем t в тумане обусловлено зависимостью I_0 от t . Для определения ее следует воспользоваться соотношением

$$\sin h_\odot = M + N \cos \omega t,$$

где $M = \sin \varphi \sin \delta$, $N = \cos \varphi \cos \delta$, $\omega = \frac{2\pi}{T^*}$, $T^* = 24$ часа, φ — широта места, δ — склонение солнца. При этом в момент восхода солнца $\sin h_\odot = 0$.

Результаты расчетов показывают, что зависимость I_0 от t при изменении t в пределах нескольких часов, выраженная формулой (4), практически достаточно строго представляется линейной функцией. Это

позволяет значительно упростить расчеты измерения I в утреннее время. Известные трудности имеются лишь в определении характеристик ослабления радиации f_T или η .

Для определения η целесообразно использовать результаты опытных данных. Наиболее подходящими здесь могут быть материалы измерения солнечной радиации на сети балансовых станций.

С этой целью были выбраны данные, приводимые в актинометрических таблицах ТМ-12 для 17 станций, расположенных в различных климатических зонах, за теплый период 1957, 1958 гг. в случаях, когда

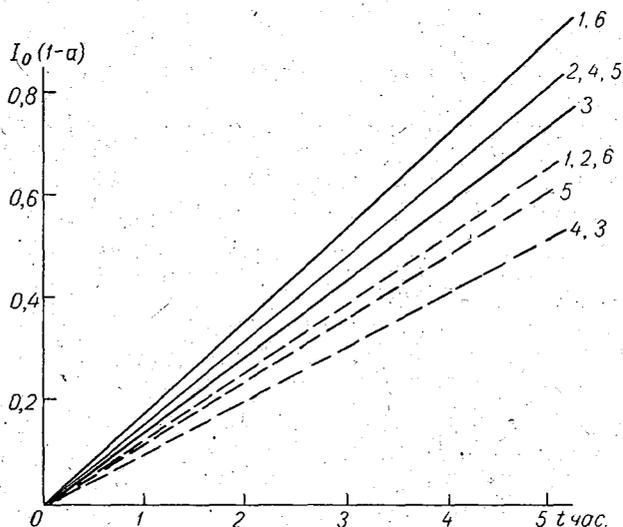


Рис. 2. Изменение $I_0(1-a)$ со временем для различных месяцев теплого полугодия и широт 50° (сплошные кривые) и 60° (пунктирные кривые) при $a=0,2$.
1 — апрель, 2 — май, 3 — июнь, 4 — июль, 5 — август, 6 — сентябрь.

в утренний срок наблюдений (обычно в 6 час. 30 мин.) отмечался туман. В общей сложности было отобрано 70 случаев.

Полученные для этих случаев значения суммарной радиации в тумане I сопоставлялись с возможными значениями суммарной радиации I_0 при тех же условиях, но без тумана. Для нахождения последней можно было воспользоваться результатами расчетов по формуле (3), в частности тем, что в первые несколько часов после восхода солнца возрастание I_0 со временем описывается линейной функцией. Это позволяет по данным измерения в утренний срок (в 9 час. 30 мин.), после того как рассеялся туман, рассчитать значения I_0 в срок 6 час. 30 мин., считая, что после восхода солнца значение I_0 линейно возрастает со временем.

Далее вычисляется степень ослабления радиации в тумане $\eta = \frac{I}{I_0}$.

В результате обработки указанных данных получены примерные значения η для туманов различной плотности. Оказалось, что η равно для плотного тумана 0,4, для умеренного — 0,5 и для слабого — 0,6.

На рис. 2 представлены результаты расчетов изменения $I_0(1-a)$ со временем для различных месяцев теплого полугодия и широт 50 и 60° при $a=0,2$.

Степень возрастания суммарной радиации в утренние часы, естественно, увеличивается с переходом от весенних к летним месяцам, а также с уменьшением широты и убывает с переходом к осенним месяцам.

Остановимся теперь на расчете изменений температуры после восхода солнца.

За начальный момент здесь удобно принять время восхода солнца, когда достигается минимум температуры. Тогда понадобится расчет изменения температуры всего на несколько часов. Нагревание воздуха в утренние часы связано с быстрым ростом радиационного баланса подстилающей поверхности

$$B = (1 - a) I(t) - E$$

(где E — эффективное излучение) за счет прихода солнечной радиации $I(t)$.

Это позволяет свести нашу задачу к определению отклонений температуры от начальных значений по отклонениям радиационного баланса. Поскольку эффективное излучение E до и после восхода солнца приблизительно одинаково, отклонение радиационного баланса примерно равно $(1 - a) I(t)$.

При наличии тумана поверхность почвы всегда покрыта росой, поэтому следует учесть ее испарение в утренние часы.

Тогда для определения отклонения температуры τ_i и влажности q_i в утренние часы в соответствии с [1] получим систему уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\kappa_0 + k_1 z) \frac{\partial \tau_1}{\partial z} = 0 \quad (0 \leq z \leq h),$$

$$\frac{\partial \tau_2}{\partial t} = k_2 \frac{\partial^2 \tau_2}{\partial z^2} \quad (h \leq z \leq \infty),$$

$$\frac{\partial \tau_3}{\partial t} = k_3 \frac{\partial^2 \tau_3}{\partial z^2} \quad (z \leq 0),$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\kappa_0 + k_1 z) \frac{\partial q_1}{\partial z} = 0 \quad (0 \leq z \leq h),$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} = k_2 \frac{\partial^2 q_2}{\partial z^2} \quad (h \leq z \leq \infty)$$

при граничных условиях для $z=0$ $\tau_1 = \tau_3$, $-c_p \rho \kappa \frac{\partial \tau_1}{\partial z} + \lambda_3 \frac{\partial \tau_3}{\partial z} = (1 - a) I(t)$, $q_1 = \mu_0 \tau_1$.

Здесь $\kappa_0 + k_1 z$ и k_2 — коэффициенты обмена соответственно при $z < h$ и $z > h$, k_3 и λ_3 — теплопроводность почвы, c_p и ρ — теплоемкость и плотность воздуха, $\mu_0 \approx 0,079 q_0$, q_0 — среднесуточное значение влажности.

Кроме того, ставятся условия сопряжения решений при $z=h$ и однородные начальные условия.

Применим к данной системе уравнений и краевых условий преобразования Лапласа

$$\bar{\tau} = \int_0^{\infty} e^{-pt} \tau dt.$$

Решение уравнений функций изображения дает

$$\bar{\tau}_1 = (1 - a) \bar{I}(p) \left[\frac{A + \sqrt{p}}{\Delta_3 p^{3/2} (a' + \sqrt{p})} - \frac{A \Delta_2 \ln \frac{y}{x_0}}{\Delta_3 c_p \rho k_1 p (a' + \sqrt{p})} \right],$$

где $\Delta_2 = c_p \rho \sqrt{k_2}$, $\Delta_2' = (c_p + L \mu_0) \rho \sqrt{k_2}$, $\Delta_3 = \frac{\lambda_3}{\sqrt{k_3}}$, $A = \frac{k_1}{\sqrt{k_2} \ln k_2 / x_0}$,
 $a' = A \left(1 + \frac{\Delta_2'}{\Delta_3} \right)$, L — скрытая теплота испарения.

Удобно воспользоваться тем обстоятельством, что $I(t)$ хорошо аппроксимируется линейной функцией и $I(t) \approx It$.

Применяя для нахождения начальной функции известные таблицы операционного исчисления и обозначая $\tau_1 = \Delta T$, получим

$$\Delta T = \frac{(1 - a) I}{\Delta_3 a'} \left\{ \frac{4A \sqrt{t}}{3 \sqrt{\pi}} t \left(\frac{a' - A}{a'} - \frac{\ln \frac{y}{x_0}}{\ln \frac{k_2}{x_0}} \right) \left[1 - \frac{2}{a' \sqrt{t \pi}} + \frac{r(a' \sqrt{t})}{a' \sqrt{t}} \right] \right\},$$

где $r(a' \sqrt{t}) = e^{a'^2 t} \operatorname{erfc} a' \sqrt{t}$.

Результаты расчетов величины $\frac{\Delta T}{\eta}$, которая, с другой стороны, представляет собой повышение температуры воздуха при отсутствии тумана в случае ясного неба и малых скоростей ветра, даны в табл. 1 (соответственно для широт 50 и 60°).

Если имеются данные, указывающие на то, что после восхода солнца туман будет сопровождаться наличием облачности с показателем n_n для нижнего яруса, n_c — среднего яруса и n_v — верхнего яруса, то полученные величины ΔT для ясного неба нужно умножить на коэффициент

$$G = 1 - (0,8n_n + 0,6n_c + 0,2n_v).$$

Для прогноза времени рассеяния тумана следует сначала вычислить необходимое повышение температуры ΔT_n . Согласно сделанным выше выводам, $\Delta T_n = T_T - T_0$, где T_T — температура воздуха или точки росы в момент образования тумана, а T_0 — температура в момент восхода солнца. Затем из табл. 1 для соответствующих значений входных параметров легко находится время, в течение которого температура воздуха повысилась на $\frac{\Delta T_n}{\eta}$. Это время и определяет срок рассеяния тумана.

Необходимые для расчетов данные могут быть получены и на основании прогноза в вечернее время. Поэтому предварительный прогноз продолжительности тумана возможен по результатам вечерних наблюдений. Обычно же для оперативных целей предсказание рассеяния тумана важно выполнить уже после того, как туман образовался.

Проверка прогноза по указанному методу была выполнена по данным наблюдений ряда АМСГ СЗ УГМС и ст. Кирполье. Всего было рассмотрено примерно 100 случаев. Ошибка в прогнозе времени рассеяния тумана составляет в среднем по модулю около 1 часа и в среднем с учетом знака отклонения +15 мин.

Из полученных формул нетрудно сделать ряд общих выводов о характере влияния основных факторов на прогноз времени рассеяния тумана.

Все факторы, способствующие повышению температуры в утренние часы, понятно, благоприятствуют ускорению рассеяния тумана. По этой

Таблица I

Время после восхода солнца, часы	Сухая почва			Увлажненная почва			Время после восхода солнца, часы	Сухая почва			Увлажненная почва		
	Абсолютная влажность, мб.							Абсолютная влажность, мб.					
	2-5	6-10	12-15	2-5	6-10	12-15		2-5	6-10	12-15	2-5	6-10	12-15
$\varphi = 50^\circ$							$\varphi = 60^\circ$						
Апрель							Апрель						
1	1,8	1,7	0,9	1,3	1,2	1,2	1	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8
2	5,1	4,6	4,1	3,8	3,6	3,4	2	3,5	3,2	2,8	2,6	2,5	2,4
3	9,5	8,6	7,5	7,2	6,7	6,4	3	6,8	6,2	5,4	5,1	4,8	4,6
4	14,6	13,2	11,4	11,2	10,3	9,9	4	10,4	9,4	8,2	8,0	7,4	7,0
Май							Май						
1	1,7	1,6	1,4	1,2	1,2	1,2	1	1,3	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9
2	4,8	4,4	3,9	3,6	3,4	3,3	2	3,8	3,4	3,0	2,8	2,6	2,6
3	9,0	8,1	7,1	6,8	6,3	6,0	3	7,0	6,3	5,5	5,3	4,9	4,7
4	13,8	12,4	10,8	10,7	9,8	9,4	4	10,8	9,7	8,4	8,2	7,6	7,2
Июнь							Июнь						
1	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1	1,0	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7
2	4,3	3,9	3,4	3,2	3,0	2,9	2	2,9	2,6	2,3	2,1	2,1	2,0
3	8,0	7,2	6,3	6,0	5,6	5,4	3	5,4	4,8	4,2	4,0	3,7	3,6
4	12,3	11,1	9,6	9,4	8,7	8,3	4	8,1	7,2	6,3	6,9	6,4	6,1
Июль							Июль						
1	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,2	1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7
2	5,0	4,6	4,0	3,7	3,5	3,4	2	3,1	2,8	2,5	2,3	2,2	2,1
3	9,3	8,4	7,3	7,0	6,6	6,2	3	5,8	5,2	4,6	4,3	4,0	3,8
4	14,2	12,8	11,1	10,9	10,0	9,6	4	9,0	8,0	7,0	6,9	6,4	6,1
Август							Август						
1	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,1	1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8
2	4,7	4,4	3,8	3,4	3,3	3,2	2	3,4	3,1	2,7	2,5	2,3	2,3
3	8,8	7,9	6,9	6,6	6,2	5,8	3	6,3	5,6	4,9	4,7	4,4	4,2
4	11,3	9,6	8,5	9,1	8,4	7,2	4	9,8	8,8	7,6	7,6	7,0	6,6
Сентябрь							Сентябрь						
1	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,1	1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8
2	4,7	4,4	3,8	3,4	3,3	3,2	2	3,2	3,0	2,6	2,4	2,2	2,2
3	8,7	7,8	6,8	6,5	6,1	5,8	3	6,1	5,5	4,8	4,6	4,3	4,1
4	13,2	11,9	10,3	10,2	9,4	9,0	4	9,4	8,5	7,4	7,4	6,7	6,4

причине при прочих равных условиях летние туманы рассеиваются быстрее весенних и осенних, в южных областях продолжительность тумана после восхода солнца меньше, чем в северных. При этом следует иметь в виду, что с ростом влажности воздуха и увлажнения почвы замедляется повышение температуры. Увеличение ветра, с одной стороны, приводит к замедлению нагревания воздуха, с другой стороны, способствует рассеянию тумана из-за усиленного турбулентного перемешивания и горизонтального переноса воздуха.

Время рассеяния тумана будет тем больше, чем интенсивнее происходит понижение точки росы от начала образования тумана к моменту восхода солнца. Это естественно, ибо в данном случае образуется более мощный туман и для испарения капель требуется большее повышение температуры. Более плотные туманы рассеиваются медленнее, и вследствие того, что они интенсивнее ослабляют солнечную радиацию, степень нагрева воздуха уменьшается.

Этим объясняется и то, что существует определенная корреляция между продолжительностью тумана до и после восхода солнца. В среднем при небольших скоростях ветра (до 3 м/сек. по флюгеру) туманы, образовавшиеся за 1—2 часа, продолжают после восхода солнца в среднем 1,5 часа; более плотные туманы, возникшие за 2—4 часа до восхода солнца, рассеиваются через 1,5—2,5 часа после восхода солнца. В тех случаях, когда утром наблюдается значительная облачность, а также в поздние осенние месяцы, когда мал приток солнечной радиации, время рассеяния тумана после восхода солнца возрастает и может достигать 4—5 час., а иногда и больше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Гидрометеоздат, Л., 1961.
2. Кирюхин Б. В. Об интенсивности и продолжительности радиационных туманов. Труды НИУ ГУГМС, сер. 1, вып. 28, 1946.

БЕСКОНТАКТНЫЙ ДВОИЧНЫЙ РЕВЕРСИВНЫЙ СЧЕТЧИК

Предложен бесконтактный двоичный реверсивный счетчик, отличающийся тем, что как при сложении, так и при вычитании входные импульсы поступают на вход первой ячейки счетчика и используется только один вид связи между ячейками счетчика, а вычитание импульсов осуществляется путем инвертирования кода числа, записанного на счетчике, и сложения импульсов с полученным обратным кодом.

Двоичные электронные счетчики широко используются во многих областях цифровой техники. Для решения многих задач необходимо иметь счетчик, позволяющий осуществлять счет импульсов в прямом и обратном направлениях, т. е. осуществлять сложение или вычитание числа приходящих импульсов с кодом, записанным на счетчике, в зависимости от управляющего сигнала.

В настоящее время существует два основных варианта схем двоичных реверсивных электронных счетчиков. Структурная схема первого варианта реверсивного счетчика приведена на рис. 1 а. В этой схеме $T_1 \div T_n$ — триггерные ячейки счетчика, $\mathcal{Э}K_1 \div \mathcal{Э}K_{2(n-1)}$ — электронные ключи, TU — управляющая триггерная ячейка.

Триггерная ячейка TU управляет шинами сложения и вычитания, обеспечивая открывание электронных ключей с четными или нечетными индексами. Таким образом, в данном варианте реверсивного счетчика имеют место оба вида связи триггерных ячеек между собой (на сложение и на вычитание), которые управляются (замыкаются или размыкаются) электронными ключами $\mathcal{Э}K_1 \div \mathcal{Э}K_{2(n-1)}$. Последняя триггерная ячейка счетчика T_n служит для фиксации знака числа, записанного на счетчике. Сигналы сложения и вычитания подаются на управляющую триггерную ячейку TU в виде управляющих импульсов.

Главным недостатком схемы первого варианта реверсивного счетчика (рис. 1 а) является ее сложность. Такой счетчик требует осуществления обоих видов связи между триггерными ячейками и $2(n-1)$ электронных ключей, где n — число ячеек в счетчике, считая со знаковой.

На рис. 1 б приведена схема второго варианта двоичного электронного счетчика. Управляющая триггерная ячейка TU с помощью электронных ключей $\mathcal{Э}K_1$ и $\mathcal{Э}K_2$ осуществляет переключение входного импульса на вход «сложение» или «вычитание». При сложении счетчик работает как обычно, при вычитании входной импульс через разделительные диоды $D_1 \div D_n$ подается одновременно на входы всех триггерных ячеек, осуществляя прибавление числа 1, 1111...11, (т. е. дополнительного кода числа 1), что равносильно вычитанию единицы. Первый разряд, отделенный запятой, является разрядом знака. Линии задержки

$LZ_1 \div LZ_{n-1}$ необходимы для осуществления сложения с учетом импульсов переноса, возникающих при перебросе триггерных ячеек при прибавлении кода 1, 111...111. Главным недостатком схемы второго варианта реверсивного счетчика (рис. 1 б) является понижение быстродействия реверсивного счетчика вследствие введения линий задержки. В худшем случае время срабатывания счетчика увеличивается на величину порядка nt_3 , где t_3 — время задержки каждой ЛЗ.

Ниже предложен вариант реверсивного счетчика, обладающего рядом преимуществ по сравнению с описанными. Блок-схема такого счетчика

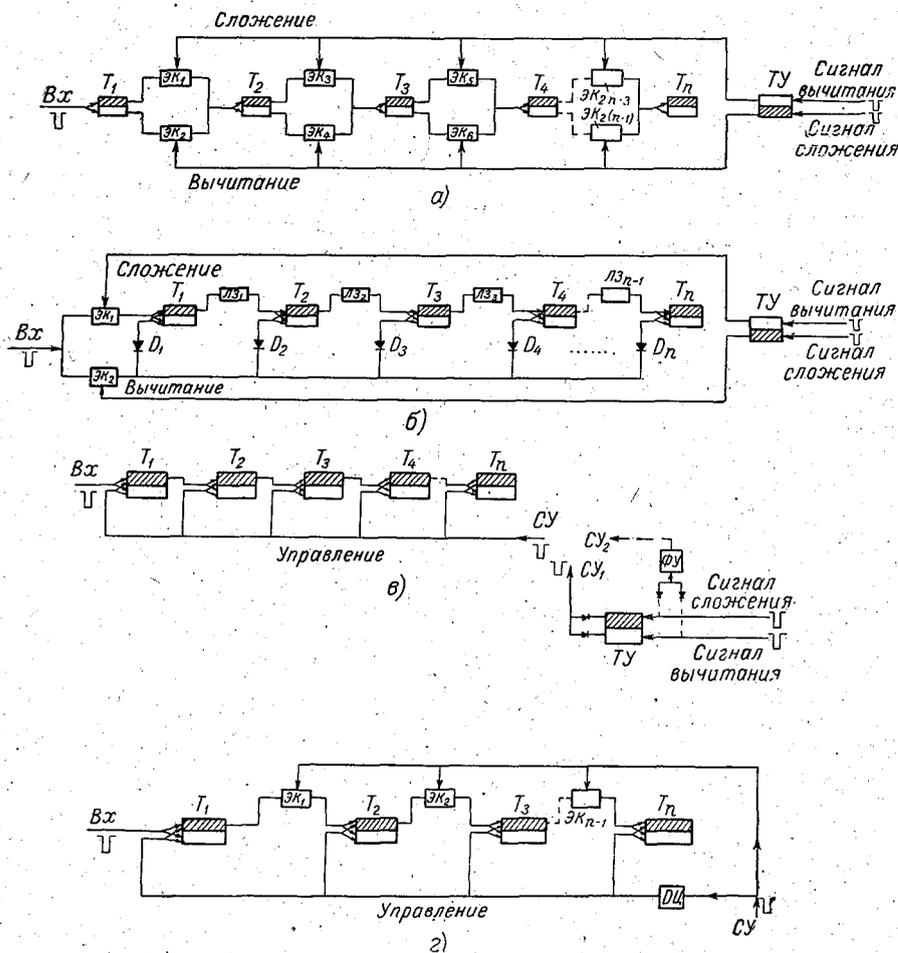


Рис. 1. Структурные схемы реверсивных счетчиков.

приведена на рис. 1 в. Как видно из схемы, предлагаемый реверсивный счетчик лишь незначительно отличается от обычного нереверсивного двоичного счетчика (для сложения). В приведенной схеме реверсивного счетчика как для сложения, так и для вычитания двоичные ячейки соединены между собой одинаково и входные импульсы поступают на вход первой ячейки. Переключение счетчика на вычитание осуществляется при поступлении на шину «управление» импульса сигнала управления $SУ$. Этот импульс осуществляет переброс всех ячеек счетчика, благодаря чему на счетчике записывается обратный код. В дальнейшем счетчик, как обычно, осуществляет сложение числа приходящих импуль-

сов с обратным кодом, записанным на счетчике, что эквивалентно вычитанию числа приходящих импульсов из прямого кода. Запись числа на счетчике прямым кодом осуществляется при приходе следующего импульса управления (сигнала сложения).

Два возможных варианта формирования сигнала управления, при которых используется формирование непосредственно сигналов сложения и вычитания или импульсов с выхода ячейки TU , приведены на рис. 1 в. Ячейка TU служит для индикации того, каким кодом — прямым или обратным — записано число на счетчике. Последняя ячейка счетчика T_n , так же как и в схемах рис. 1 а и б, является знаковой.

Предложенный принцип построения реверсивных счетчиков (по блок-схеме рис. 1 в) особенно целесообразно использовать в счетчиках на магнитных элементах, что связано с простотой и надежностью инвертирования кода в таких счетчиках. Подобный принцип может быть использован также в триггерных счетчиках на лампах или полупроводниковых триодах. В этом случае необходимо, чтобы импульсы переноса, возникающие при перебросе триггерных ячеек от сигнала управления, не вызывали вторичного срабатывания триггерных ячеек; это понижает надежность работы схемы и предъявляет определенные требования к стабильности амплитуды и длительности сигнала управления и к параметрам цепей связи триггеров.

Для повышения надежности работы счетчика и уменьшения требований к стабильности параметров импульсов управления в цепи связи триггерных ячеек могут быть включены диодные ключи, запираемые при действии сигнала управления. Для этого достаточно в шину управления диодными ключами подавать несколько затянутый импульс с триггера TU или с формирующего устройства $\PhiУ$. Блок-схема такого реверсивного счетчика приведена на рис. 1 г. Дифференцирующая цепочка $ДЦ$ служит для формирования коротких управляющих импульсов из затянутых импульсов сигнала управления $СУ$. Схема такого счетчика по сравнению со счетчиком на рис. 1 в несколько усложняется, однако и в этом случае предлагаемый реверсивный счетчик будет проще существующих.

При снятии показаний счетчика следует иметь в виду, что если триггерная ячейка TU находится в положении «0», то на счетчике записан прямой код числа, а если в положении «1» — то обратный код. Если при использовании реверсивного счетчика считывание его показаний осуществляется после окончания счета импульсов, то перед считыванием на вход TU «сигнал сложения» должен подаваться импульс, что обеспечивает считывание числа всегда прямым кодом.

Следует отметить, что в ряде устройств, например в цифровых следящих системах, код, записанный в счетчике, преобразуется в аналоговую величину (обычно в напряжение) не после окончания счета импульсов, а непосредственно в процессе счета. В этом случае при приходе сигнала вычитания аналоговая величина меняется скачком, так как код в счетчике меняется на обратный.

Если преобразователь кода в напряжение построен по принципу суммирования напряжений или токов, то последняя, знаковая триггерная ячейка счетчика T_n управляет в преобразователе своей цепью, подключая отрицательное напряжение или ток, соответствующие коду 2^{n-1} . Несложно показать, что в этом случае при изменении кода в счетчике на обратный напряжение на выходе преобразователя возрастает на величину, соответствующую единице кода, и меняет свою полярность. Поэтому для исключения скачков напряжения на выходе преобразователя триггерная ячейка TU также должна управлять своей цепью в пре-

образователе кода в напряжение, обеспечивая в положении «1» подключение напряжения или тока, соответствующего единице кода, и инвертирование выходного напряжения преобразователя.

Из сравнения реверсивных счетчиков по схемам рис. 1 *в* и *г* со счетчиками, представленными на рис. 1 *а* и *б*, можно сделать вывод, что предлагаемые схемы счетчиков имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими. Главным преимуществом предлагаемых схем по сравнению со схемой на рис. 1 *а* является использование только одной связи между триггерными ячейками и исключение или уменьшение вдвое числа электронных ключей. Главным преимуществом предлагаемых схем по сравнению со схемой на рис. 1 *б* является высокое быстродействие и простота (импульсы и при сложении, и при вычитании подаются на вход первой ячейки; отсутствуют линии задержки). Поэтому в ряде случаев использование подобных счетчиков является наиболее предпочтительным. Особенно целесообразно использование подобных счетчиков в тех случаях, когда считывание показаний счетчика осуществляется после окончания счета импульсов и при построении счетчика на магнитных элементах.

Н. Н. АЛЕКСАНДРОВ, О. Т. ИВАНОВ

МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПРИМЕРЗАНИЕМ МАРЛИ ПРИ ПЛАНШЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Рассматриваются физико-химические поверхностные явления между металлической поверхностью планшета и мокрой марлей при использовании смазочных материалов. На основании проведенных экспериментальных исследований даются конкретные рекомендации по применению различных смазочных материалов, уменьшающих адгезию между поверхностями планшета и марли со льдом.

В настоящее время для исследования содержания пыли и ее химического состава в атмосферных осадках широко используются планшеты. Для удержания пыли на поверхности планшета и для использования ее в дальнейших анализах поверхность планшета покрывается марлей.

В переходные периоды, особенно осенью и весной, наблюдаются случаи примерзания марли к металлической поверхности планшета в результате изменения температуры от 1—2 до —5, —10° или небольших колебаний ее около нуля при наличии на планшете гидрометеоров.

Прочное примерзание к металлической поверхности планшета марли со льдом происходит вследствие большой адгезии (прилипания) между поверхностями планшета и льда. В этих случаях марлю очень трудно снять с планшета и использовать в последующих анализах.

Для исключения примерзания марли к планшету в Главной геофизической обсерватории проводились опыты по применению различных смазочных материалов, уменьшающих смачивание планшета водой и прилипание льда к металлической поверхности при планшетных наблюдениях.

В качестве смазочных материалов в опытах использовались антифризы — водо-этиленгликолевые смеси (30% воды, 70% этиленгликоля), водо-глицериновые смеси (30% воды, 70% глицерина), коллоидные суспензии глицерина и технического масла с графитом и чистый графит.

Рассмотрим физико-химические поверхностные явления, наблюдаемые в случае применения антифризов и коллоидно-графитовых смазок.

Действие водных растворов этиленгликоля и глицерина, а также коллоидных суспензий антифризов с графитом основано на понижении точки плавления льда при соприкосновении с тонким слоем жидкой фазы антифриза [4, 5]. Выделение кристаллов льда и этиленгликоля и образование насыщенных растворов этиленгликоль—вода удобнее всего проследить на рис. 1.

Прибавляемая к чистому этиленгликолю вода снижает температуру замерзания $t_{зам}$ раствора максимально до —75° в эвтектической точке, отвечающей составу смеси 33,3% H_2O и 66,7% $C_2H_4(OH)_2$ (в весовых

процентах). Процессы, происходящие в водо-глицериновых смесях, подобны процессам, наблюдаемым в водо-этиленгликолевых смесях. Однако вода, прибавляемая к чистому глицерину, снижает температуру замерзания раствора максимально до -40° в эвтектической точке, отвечающей составу смеси 30% H_2O и 70% $C_3H_5(OH)_3$ (в весовых процентах).

Таким образом, вследствие понижения точки плавления льда антифризами лед вблизи жидкой фазы водных растворов $C_2H_4(OH)_2$ и $C_3H_5(OH)_3$ оттаивает и марля со льдом легко снимается с поверхности планшета.

Прекрасным смазочным действием обладает твердый графит как в сухом виде, так и при добавлении к антифризам. В последнем случае

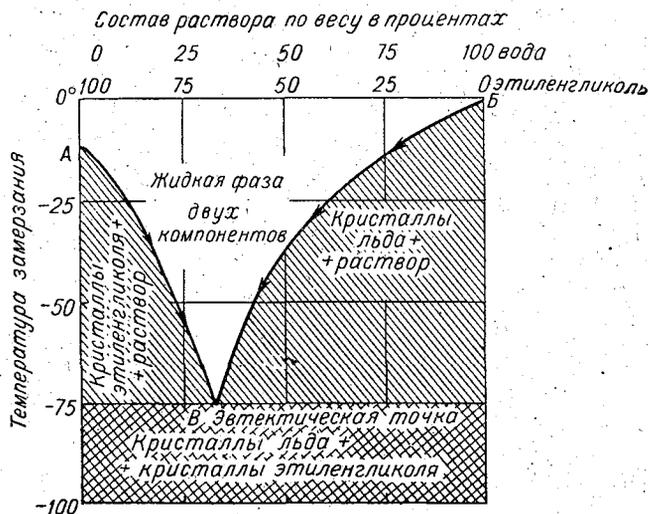


Рис. 1. Процессы кристаллизации воды и этиленгликоля.

образуются коллоидные суспензии графита, которые широко применяются в качестве смазочных материалов [1, 2].

Структура графита представляет собой плоские и параллельные слои, атомы в которых расположены в виде гексагонального паркета, находящиеся на расстоянии $1,41 \text{ \AA}$ и образующие сетку жестких атомных связей. В решетке графита комбинируется два типа связей — валентные и вандерваальсовы. Плоские слои обладают большой прочностью, так как в каждой сетке насыщаются все четыре валентности углерода с образованием сопряженных двойных связей. В то же время соседние слои слабо связаны друг с другом (расстояние $3,36 \text{ \AA}$), так как между слоями действуют слабые межмолекулярные силы типа вандерваальсовых. Слабые связи между слоями углерода определяют известные свойства графита распадаться на отдельные атомные монослои [3].

Таким образом, графит чрезвычайно легко раскалывается параллельно этим слоям и представляет собой тонкие чешуйки, имеющие тенденцию прилипать к металлическим поверхностям и ориентироваться параллельно им. Размеры этих чешуек, по-видимому, достаточны, чтобы они полностью закрывали большинство выступов поверхностей, касаясь при этом отчасти и их склонов. Чешуйки графита прочно прилипают к поверхностям металлов. Благодаря малой адгезии между слоями графита разрыв перешейков, возникающих между поверхностями, в боль-

шинстве случаев происходит в графите, а вероятность сцепления между поверхностями металла и льда с марлей практически исчезает и марля легко отстает от поверхности планшета [1].

Методика проведения опытов

Опыты проводились при температурах от 1—2 до -20° следующим образом.

1. Поверхность планшета смазывалась тонким слоем антифриза или коллоидной суспензией антифриза с графитом. Планшет покрывался марлей и заливался водой.

2. На сухую поверхность планшета наносился тонкий слой графита в виде тонко измельченного порошка, тщательно и равномерно растирался по всей поверхности, а затем наносился тонкий слой глицерина или технического масла. Планшет покрывался марлей и заливался водой.

3. На сухой поверхности планшета тщательно и равномерно растирался марлевым тампоном чистый графит. Планшет покрывался марлей и заливался водой.

Всего было проведено 15 экспериментов. Все опыты дали хорошие результаты и практически исключили прилипание льда с марлей к планшету. Наилучшие результаты дают опыты, проводимые по второй методике, где используется комбинированное сочетание чистого графита и водных растворов этиленгликоля ($t_{\text{зам}} = -70^{\circ}$) и глицерина ($t_{\text{зам}} = -40^{\circ}$). Однако как средство для борьбы с примерзанием марли к планшету мы рекомендуем использовать чистый графит в виде тонко измельченного порошка с последующим растиранием по всей металлической поверхности, как наиболее доступный и дешевый смазочный материал.

Последний вариант с использованием чистого графита в качестве смазочного материала дал хорошие результаты и в практике планшетных наблюдений в течение месяца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адам А. К. Физика и химия поверхностей. Гостехиздат, М.—Л., 1947.
2. Ботвинкин О. К., Маринина В. Г. Применение коллоидно-графитовых смазок в стекольной промышленности. Гизлегпром, М.—Л., 1946.
3. Касаточкин В. И., Пасынский А. Г. Физическая и коллоидная химия. Медгиз, М., 1960.
4. Кротова Н. А. О склеивании и прилипании. Изд-во АН СССР, М., 1956.
5. Солодов С. Н. Антифризы. Воениздат, М., 1943.
6. Льюис У., Скуайрс Л., Брутон Дж. Химия коллоидных и аморфных веществ. ИЛ, М., 1948.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, В. П. Ложкина, Р. И. Оникул. Численное решение уравнения турбулентной диффузии и расчет загрязнения атмосферы вблизи промышленных предприятий	3
Б. Б. Горошко, В. П. Грачева, Г. П. Расторгуева, Б. В. Рихтер, Г. А. Федорова. Метеорологические наблюдения при исследовании промышленных загрязнений приземного слоя воздуха	18
М. Е. Берлянд. К теории турбулентной диффузии	31
Л. Г. Семенова, И. И. Соломатина. Некоторые результаты микроклиматических съемок в условиях пересеченного рельефа	38
Н. Н. Александров. Возможности аспирационного метода измерения радиоактивности атмосферы	42
Н. Н. Александров, В. Г. Волох. Об эффективности фильтров ФПП-15	56
Н. Н. Александров, С. И. Зачек. К вопросу об измерении разности средних скоростей счета импульсов, статистически распределенных во времени	60
М. Е. Берлянд, Г. А. Панфилова. Прогноз времени рассеяния тумана	73
С. М. Персии. Бесконтактный двоичный реверсивный счетчик	82
Н. Н. Александров, О. Т. Иванов. Методы борьбы с примерзанием марли при планшетных наблюдениях	86

Редактор *А. И. Вайцман*
Техн. редактор *М. И. Брайнина*
Корректор *А. В. Хюркес*

Сдано в набор 18/IV-63 г. Подписано к печати 26/VIII-63 г.
Бумага 70×108¹/₁₆. Бум. л. 2,88. Печ. л. 7,87. Уч.-изд. л. 7,01.
Тираж 770 экз. М-19398. Индекс МЛ-72.
Гидрометеорологическое издательство. Ленинград, В-53,
2-я линия, д. № 23. Заказ № 264. Цена 49 коп.

Типография № 8 УЦБ и ПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Прачечный пер., д. № 6.