

## Методы расчета и прогнозирования радиоактивного загрязнения приземного слоя атмосферы выбросами из труб АЭС

АРТЕМОВА Н. Е.

УДК 551.510.72

При выборе площадки для любой реакторной установки в первую очередь принимается во внимание уровень возможной опасности облучения как для населения в целом, так и для отдельных людей, проживающих вблизи объекта, так как радиационное воздействие на население должно быть настолько низким, насколько это возможно. Это может главным образом обеспечиваться высоким качеством проектирования, конструирования и эксплуатации АЭС. Однако не последнюю роль играет также место расположения АЭС, при выборе которого должны учитываться характерные для района предполагаемого строительства все особенности метеорологического разбавления радиоактивных продуктов, поступающих в атмосферу при работе атомной электростанции.

Опыт действующих атомных электростанций показывает, что основные критерии и физические предпосылки, положенные в основу оценки атмосферной диффузии в районе действия АЭС, являются справедливыми. Рассеяние поступающей в атмосферу примеси происходит, как известно, в результате увлечения ее турбулентными воздушными вихрями различных масштабов, причем интенсивность турбулентности определяется термодинамическим состоянием приземного слоя атмосферы. Направление переноса примеси зависит от преобладающего направления ветра. Все случаи рассеяния примеси могут быть классифицированы для нескольких категорий термодинамической устойчивости, обуславливающих характер переноса примеси к земле и формирование поля приземных концентраций. Для каждого класса устойчивости атмосферы наблюдаются и могут быть рассчитаны определенные величины максимальных приземных концентраций примесей и определенные расстояния их локализации от источника.

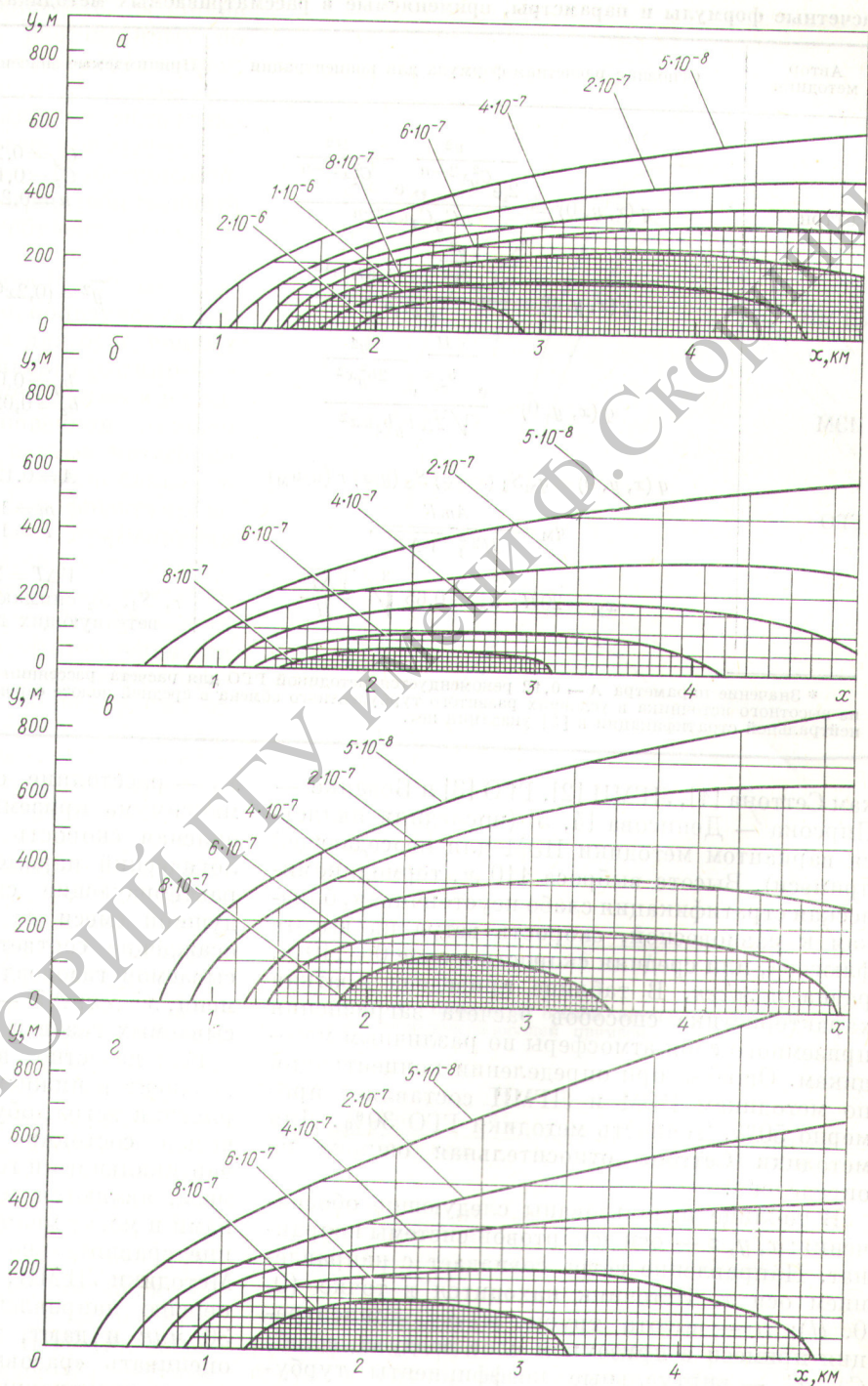
В настоящее время известно большое количество работ, посвященных способам оценки степени загрязнения атмосферы выбросами того или иного вида источников. Однако, если говорить об экспрессных, пригодных для практического использования методиках расчета загрязнения атмосферы, снабженных необходимыми номограммами и графиками, следует назвать две такие группы методик.

1. Методики Сеттона и Пасквилла. Последняя в дальнейшем была развита Мидом, Битти и Брайант, внедрена ими в практику Комиссии по атомной энергии Великобритании и рекомендована Всемирной метеорологической организацией в качестве методики для расчета рассеивания выбросов атомных реакторов.

2. Методики расчета промышленных загрязнений атмосферы, разработанные в СССР в Главной геофизической обсерватории (ГГО), в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ЛГМИ) и в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ), проверенные на большом экспериментальном материале и успешно применяемые для проектных и прогностических оценок.

Эти две группы методик основываются на двух различных подходах к описанию атмосферной диффузии: статистическом и полуэмпирическом, использующем аналогию с молекулярной диффузией (а в некоторых случаях на сочетании того и другого подхода). Каждая имеет определенные достоинства и недостатки. Различие между ними заключается главным образом в том, что статистическая теория основывается на изучении флюктуаций как статистической совокупности и рассматривает их влияние на характер всего поля, в том числе и на средний поток, а полуэмпирическая теория принимает средний поток установившимся и исследует его особенности и влияние на другие свойства. Использование для расчетов приземной концентрации примеси той или иной методики приводит к идентичным результатам, если учесть при этом период осреднения применяемого комплекса метеорологических параметров и точность каждой методики. Наилучшая сходимость с экспериментальными данными и, следовательно, наибольшая точность получаются при расчете рассеяния примеси в усредненных условиях, т. е. для тех категорий погоды, которые характеризуются условиями слабо развитой конвекции и равновесного (нейтрального) термодинамического состояния приземного слоя атмосферы.

В качестве примера на рис. 1 показано поле приземных концентраций невесомой долгоживущей примеси, рассчитанное для непрерывного выброса мощностью в одну единицу по методи-



Р и с. 1. Поле приземных концентраций невесомой долгоживущей примеси, рассчитанное по методикам Сеттона (а), ЛГМИ (б), ИЭМ (в) и ГГО (г).

Расчетные формулы и параметры, применяемые в рассматриваемых методиках

Автор методики	Основная расчетная формула для концентрации	Принимаемые значения параметров	Время осреднения концентрации
Сеттон	$q(x, y, 0) = \frac{\frac{y^2}{2_1 e^{C_y^2 x^{2-n}}} \frac{H^2}{e^{C_z^2 x^{2-n}}}}{\pi C_y C_z u x^{2-n}}$	$C_y = 0,21$ $C_z = 0,12$ $n = 0,25$	2—3 мин (мгновенное)
ЛГМИ	$q(x, y, 0) = \frac{\frac{y^2}{54 e^{2\bar{y}^2}} e^{-14,5H^{1,18}}}{u x^{1,9}}$	$\bar{y}^2 = (0,2x^{0,9})^2$	20—30 мин (разовое)
ИЭМ	$q(x, y, 0) = \frac{\frac{H}{e^{b_y x}} \frac{y^2}{2b_z^2 x^2}}{\sqrt{2\pi} b_y b_z u x^2}$	$b_y = 0,08$ $b_z = 0,024$	от 10 до 40 мин
ГГО	$q(x, y, 0) = q_m S_1(x/x_m) S_2(y/x) r(u/u_m)$ $q_m = \frac{AmF}{H^2 \sqrt[3]{V\Delta T}}$ $x_m = 20H; u_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V\Delta T}{H}}$	$A = 0,12^*$ $m = 1$ $F = 1$ $V\Delta T = 280$ $r, S_1, S_2$ снимаются с соответствующих графиков [3]	20—30 мин (разовое)

\* Значение параметра  $A = 0,12$  рекомендуется методикой ГГО для расчета рассеяния примеси, выброшенной в атмосферу из высотного источника в условиях развитого турбулентного обмена в средней полосе европейской части СССР. Для условий нейтральной стратификации в [3] указаний нет.

кам Сеттона [1], ЛГМИ [2], ГГО [3] и Бозанке — Пирсона — Денисова [4, 5] (последняя является вариантом методики ИЭМ для неоседающей примеси). Высота выброса 110 м, термодинамическая стратификация слабо неустойчивая, близкая к равновесной, скорость ветра на высоте флюгера, или средняя скорость в слое 0—110 м, равна 5 м/сек. В таблице приведена краткая характеристика способов расчета загрязнения приземного слоя атмосферы по различным методикам. Ошибка при определении концентраций по методикам ИЭМ и ЛГМИ составляет примерно 50%. Точность методики ГГО 30%. Для методики Сеттона относительная ошибка не определена.

В таблице использованы следующие обозначения:  $x, y, z$  — оси декартовой системы координат. Направление ветра совпадает с направлением оси  $x$ . Источник находится в точке (0, 0, H); H — высота трубы, м;  $q$  — концентрация примеси в приземном слое воздуха,  $ед/м^3$ ;  $C_y, C_z$  — виртуальные коэффициенты турбулентной диффузии Сеттона,  $м^{n/2}$ ;  $u$  — скорость ветра, м;  $n$  — параметр стратификации Сеттона;  $\bar{y}^2$  — дисперсия примеси в направлении оси  $y$ ,  $м^2$ ;  $b_y, b_z$  — эмпирические константы;  $q_m$  — максимальная приземная концентрация;

$x_m$  — расстояние от основания источника до максимума приземной концентрации, м;  $u_m$  — опасная скорость ветра, м/сек; A — климатологический параметр;  $m, F$  — параметры, характеризующие скорость истечения газовой смеси из трубы и ее гравитационное осаждение соответственно; V — объем выбрасываемой газовой смеси в единицу времени,  $м^3/сек$ ;  $\Delta T$  — разность температур выбрасываемых газов и окружающего воздуха, град.

Как известно, вертикальный температурный градиент в нижнем слое атмосферы и характеристики ветра, обуславливающие термодинамическое состояние атмосферы и интенсивность вертикального и горизонтального переноса примеси, являются весьма непостоянными величинами и могут менять свои значения даже в течение сравнительно коротких отрезков времени. Методики ЛГМИ, ИЭМ и ГГО учитывают дисперсию направления ветра в пределах 20—30 мин и дают, таким образом, возможность оценивать «разовые» значения концентраций, т. е. концентрации, осредненные за 20—30 мин. Методика Сеттона предполагает постоянным направление ветра и, следовательно, позволяет рассчитывать мгновенные, т. е. осредненные за 2—3 мин значения концентраций примеси.

Этим главным образом и объясняется различие в величинах концентраций, рассчитанных по Сеттону и по методикам с разовым осреднением. Кроме того, при расчете приземных концентраций для больших расстояний от источника методика Сеттона может привести к существенным погрешностям вследствие необоснованности принятой схемы пространственного изменения коэффициентов турбулентной диффузии.

Методика Пасквилла — Мида [6—8] дает возможность сравнительно просто, пользуясь таблицами и графиками Пасквилла для осредненных значений бокового и вертикального расширения струи, определять концентрации примеси в приземном слое воздуха при мгновенном, разовом и непрерывном выбросе для разных категорий устойчивости атмосферы и достаточно большого расстояния от источника. Модель флюктуирующей струи Гиффорда [9], широко применяемая при рассмотрении особенностей горизонтального рассеяния струи от непрерывно действующего источника, позволяет отождествлять время работы источника конечной продолжительности (мгновенной, разовой) с временем забора пробы или временем осреднения концентраций от непрерывно действующего источника. Следовательно, методика Пасквилла — Мида может применяться также для оценки мгновенных, разовых и среднегодовых концентраций примеси от непрерывно действующего источника. Ошибка при определении концентрации по методике Пасквилла — Мида составляет примерно 100%. На рис. 2 показано изменение осевой приземной концентрации при мгновенном (кривая 1), разовом (2) и среднегодовом (3) осреднении, рассчитанное по методике Пасквилла — Мида для непрерывного выброса одной единицы количества невесомой долгоживущей примеси в секунду на высоте 110 м в условиях равновесной стратификации атмосферы при средней скорости ветра 5 м/сек. Для сравнения пунктиром показаны изменения осевой концентрации от непрерывно действующего источника, рассчитанные по методике Сеттона при мгновенном осреднении (кривая 4), по методике ГГО и ЛГМИ для разового осреднения (5 и 6), и при среднегодовом осреднении в случае круговой розы ветров по способу ИПГ (7), изложенному в [10]. Ниже приведены расчетные формулы Пасквилла — Мида:

$$q_{\text{мгн}} = \frac{168 e^{-2,303 \frac{H^2}{h^2}}}{\theta_p h x u} \quad (\text{мгновенный источник});$$

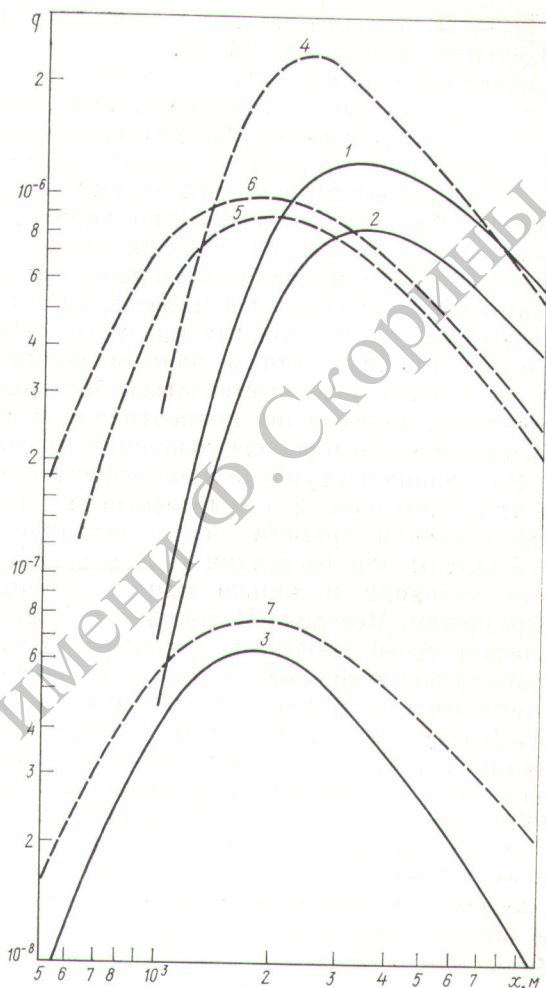


Рис. 2. Изменение осевой приземной концентрации невесомой долгоживущей примеси.

$$q_{\text{раз}} = \frac{168 e^{-2,303 \frac{H^2}{h^2}}}{\theta_p h x u} \quad (\text{источник продолжительного действия: от 20—30 мин до нескольких часов});$$

$$\bar{q} = \frac{e^{-2,303 \frac{H^2}{h^2}}}{1,16 \pi h x u} \quad (\text{непрерывный источник}).$$

Здесь  $H$  — высота трубы, м;  $h$  — вертикальное расширение струи, м;  $\theta$  — боковое расширение струи в случае мгновенного выброса, град;  $x$  — расстояние от источника, м;  $\theta_p$  — боковое расширение струи в случае продолжительного выброса, град;  $u$  — скорость ветра, м/сек.

Параметры  $\theta$ ,  $\theta_p$ ,  $h$  взяты для разных расстояний от источника для категории погоды D

и  $C - D$  в соответствии с рекомендациями Пасквилла и Браунинга [6, 8].

Анализ рис. 1 и 2 показывает, что в пределах точности, указанной авторами методик, результаты расчета приземных концентраций примеси выбрасываемой из трубы непрерывно работающего предприятия, при одинаковых периодах осреднения сходятся достаточно хорошо. Следовательно, любая из методик может быть использована при оценке возможного или существующего загрязнения атмосферы от источника выброса радиоактивных продуктов. Однако следует помнить, что в каждом конкретном расчете надо руководствоваться необходимой точностью определения концентраций и типичными для данного района условиями рассеяния.

Коэффициенты турбулентной диффузии, полученные Сеттоном и применяемые в расчетах концентраций примеси по его методике, действительны для рассеяния только в нейтральных условиях и только при 2—3-минутном осреднении. Методика Пасквилла — Мида привлекает своей простотой, однако определения концентрации по этой методике, по признанию самих авторов, в крайних условиях стабильности (сильно развитая неустойчивость и умеренная и сильная устойчивость) могут дать ошибки на несколько порядков величины. Методика ГГО применима в основном для расчета рассеяния примеси в условиях развитого конвективного обмена и определения разовых (20—30-минутных) концентраций. Методика ЛГМИ в общем виде (для различных условий стабильности) использует ряд труднодоступных для измерения параметров и трудоемких расчетов, требующих определенной подготовки. Методика ИЭМ приспособлена в основном для определения плотности осадка выпадающей примеси.

Существует много экспериментальных данных, полученных в Советском Союзе и за рубежом [1, 5], показывающих, что величины приземных концентраций примеси, осредненные за разные периоды времени, связаны с величинами периодов их осреднения. Эта зависимость выражается соотношением

$$\frac{q_1}{q_2} = k (\tau_2/\tau_1)^{0,2},$$

где  $q_1, q_2$  — приземные концентрации примеси;  $\tau_1, \tau_2$  — соответствующие периоды их осреднения;  $k$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий устойчивость основных параметров, определяющих диффузию примеси, главным образом устойчивость направления ветра;

для короткопериодных концентраций (с осреднением до суток)  $k = 1$ .

Приведенное соотношение достаточно универсально и может быть использовано, например, для прогностических оценок возможного среднегодового загрязнения приземного слоя воздуха вокруг работающего предприятия по замерам с конечной продолжительностью пробоотбора. При этом величина коэффициента  $k$  определяется показателем вытянутости среднегодовой розы ветров  $n/n_0$ , где  $n_0$  — повторяемость любого направления восьмирумбовой розы ветров при условии равномерности всех направлений, равная 0,125;  $n$  — фактическая повторяемость преобладающего направления ветра (в этом случае  $k = \frac{1}{2} n/n_0$ ). На рис. 3

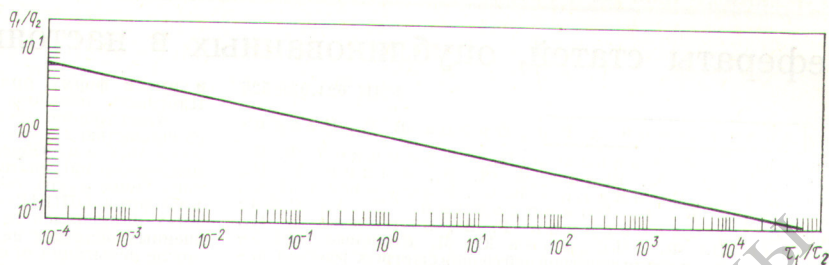
приведенное соотношение представлено в графическом виде для  $k = 1$ .

Данное соотношение позволяет использовать наиболее простые и эффективные методики расчета приземных концентраций примеси для оценки прогностических величин загрязнения атмосферы при любом периоде действия источника и для любого периода сбора метеорологической информации.

Поскольку нормы радиационной безопасности регламентируют среднегодовое предельно допустимое поступление радиоактивных изотопов в организм человека и среднегодовой предел дозы внешнего облучения, есть основания оценивать возможное загрязнение атмосферы, возникающее при нормальной работе АЭС, по среднегодовым метеорологическим характеристикам данного района. Имея справочные сведения за многолетний период о повторяемости различных типов устойчивости атмосферы и преобладающем среднегодовом ветре в конкретном районе, можно, как показано в [10], а также другими способами определить вероятное среднегодовое загрязнение атмосферы и рассчитать возможное внешнее облучение человека и поступление радиоактивных изотопов в организм через органы дыхания.

Сравнение расчетных среднегодовых приземных концентраций с предельно допустимыми среднегодовыми концентрациями является основанием для нормирования величины выброса АЭС или установления параметров вентиляционной трубы. Однако подобные расчеты могут быть выполнены только в тех случаях, когда справедливы предпосылки, заложенные в схему расчета (в первую очередь, равнинный однообразный рельеф местности в районе расположения источника выбросов и однородность

Рис. 3. Зависимость отношения концентраций, осредненных за разные периоды времени  $q_1$  ( $\tau_1$ )/ $q_2$  ( $\tau_2$ ), от отношения периодов их осреднения  $\tau_1/\tau_2$ .



вертикального термодинамического строения приземного слоя атмосферы). Особенности рельефа (горы, глубокие долины), большая повторяемость неблагоприятных метеорологических условий, которые наблюдаются при образовании приподнятых инверсий на высоте выброса, или сочетание тех и других условий (что бывает довольно часто) являются чрезвычайно нежелательными для района размещения АЭС.

Таким образом, при обсуждении проекта расположения АЭС с точки зрения обеспечения радиационной безопасности населения на окружающей территории при нормальной работе станции необходимо знать следующее:

1. Данные проектируемой АЭС: мощность и тип реактора, состав продуктов выброса и их количество, высота, скорость и объем выброса, температура выбрасываемой газовой смеси.

2. Климатологические данные: среднегодовая роза ветров, скорость ветра по градациям с соответствующей среднегодовой повторяемостью, среднегодовая скорость ветра (желательно также по румбам), среднегодовая повторяемость приподнятых инверсий (на высоте выброса), среднегодовая повторяемость штилей, туманов, их средняя и максимальная продолжительность, среднегодовая дневная и максимальная температура воздуха в теплый период.

Повторяемость приподнятых инверсий на высоте выброса может быть получена из материалов температурно-ветрового зондирования в пунктах на расстоянии не более 100—150 км от места расположения АЭС. Остальные данные могут быть взяты из наблюдений метеостанций стандартной сети, расположенных возможно ближе к предполагаемому месту размещения АЭС и не далее 40 км, если рельеф местности ровный, равнинный. Если местность холмистая, изрезанная долинами рек, следует найти наиболее представительную метеостанцию, чтобы не использовать данные тех метеостанций, которые расположены в местах со специфической микроструктурой ветрового режима (например,

в долинах рек). Расстояние до опорной метеостанции в этом случае не более 20 км.

При рассмотрении вопросов, связанных с оценкой возможного загрязнения атмосферного воздуха радиоактивными продуктами при работе АЭС, необходим также план (карта-схема) района размещения АЭС радиусом не менее 200 высот трубы (20—50 км), на котором должна быть представлена топография района и нанесены местонахождение и абсолютные отметки опорных метеостанций, ближайшие населенные пункты, жилой поселок АЭС и промплощадка. Следует отметить, что при необходимости размещения АЭС в районах со сложными рельефом и температурно-ветровым режимом должны быть организованы и проведены предварительные 4—5-летние метеонаблюдения на месте предполагаемого строительства с обязательным температурно-ветровым зондированием 200—300-метрового слоя атмосферы (высота зондирования определяется высотой вентиляционной трубы).

Поступила в Редакцию 11/IV 1973 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метеорология и атомная энергия. Перев. с англ. Под ред. Н. А. Бызовой и К. П. Махонько. М., Гидрометеиздат, 1972.
2. Лайтман Д. Л., Гисина Ф. А., Каплан С. Н. «Тр. Ленингр. гидрометеоролог. ин-та». Изд. ЛГУ, 1963, вып. 15, с. 37—47.
3. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий (СН 369—67). Л., Гидрометеиздат, 1967.
4. Денисов А. И. «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1957, № 6, с. 834—837.
5. Бызова Н. Л. «Тр. Ин-та эксперим. метеорологии». М., Гидрометеиздат, 1970, вып. 15.
6. Pasquill F. Meteorological magazine, 1961, v. 90, № 1063.
7. Mead P. S. WMO — № 97, TP41, 1960.
8. Bryant P. UKAEA, Rep. ANSB (RP) R42, 1964.
9. Гиффорд Ф. В сб.: Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. Перев. с англ. Под ред. А. С. Монина. М., Изд-во иностр. лит., 1962, с. 143—165.
10. Артемова Н. Е., Тевловский Е. Н. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 6, с. 573.