

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ И НЕУПРАВЛЯЕМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ВРЕДНОГО ВЕЩЕСТВА

7.2. Особенности моделирования и системного анализа процесса высвобождения и распространения энергии и вредного вещества

Оценка меры возможности и масштабов загрязнения окружающей природной среды побочными продуктами производственной деятельности людей представляет собой важную часть исследований, направленных на обеспечение безопасности населения и сохранности среды обитания. При этом нельзя не учитывать того, что объем соответствующей информации, полученной по ретроспективным данным об имевших место вредных выбросах, является недостаточным. Вместе с тем нельзя предугадать заранее все обстоятельства и условия, при которых такие выбросы могут произойти в последующем.

Это указывает на необходимость заблаговременной проработки возможных сценариев вредных выбросов энергии и вещества из техносферы, а затем и в выборе из них наиболее правдоподобных. Своевременное использование подобной информации позволит не только оценить масштабы вероятных потерь людских, материальных и природных ресурсов, но и снизить их за счет повышения осведомленности и подготовленности персонала производственных объектов и проживающих вблизи людей. Однако получение такой информации невозможно без разработки соответствующих методик.

При создании таких методик в общем случае следует исходить из необходимости моделирования процесса высвобождения и распространения как аварийных потоков энергии и вещества, так их непрерывного либо систематического истечений из технологического оборудования производственных предприятий. Дело в том, что непрерывные энергетические выбросы являются неизбежным (по законам термодинамики) и побочным результатом их функционирования, а их размеры зависят от эффективности (коэффициента полезного действия) используемых ныне технологических процессов. Поэтому нельзя ограничиваться учетом одних лишь аварийных выбросов и игнорировать ущерб от систематических.

Последнее обстоятельство накладывает определенные *требования* к моделям и методам качественного и количественного системного анализа процесса высвобождения и распространения энергии и вредного вещества в техносфере. В частности, с помощью такого инструментария необходимо уметь прогнозировать процесс их истечения и из мгновенных: и непрерывно или эпизодически действующих источников. Кроме этого, надо научиться прогнозировать размеры образуемых при этом зон поражения и характер распределения в них полей концентрации соответствующих факторов, в том числе и с учетом возможной «подпитки» последних новыми порциями порождающих их веществ.

Что касается других требований к рассматриваемым здесь моделям и методам исследования техногенного ущерба, то необходимо отметить следующее. Прежде всего, данный инструментарий должен быть удобным для априорной оценки параметров этих процессов. Хотелось бы, чтобы основанная на нем методика а) была достаточно простой и понятной не только пользователю, но и заказчику, б) базировалась на ограниченном объеме доступной исходной информации, в) позволяла проводить прогноз со сравнительно малыми вычислительными затратами, приемлемой точностью, а иногда и параллельно с возникшей чрезвычайной ситуацией, т. е. в реальном масштабе времени.

Кроме того, при выборе или разработке новых моделей и методов следует исходить из приемлемости заложенных там исходных гипотез и других предположений, а также учитывать сферу применимости полученных с их помощью результатов. В этой связи весьма важно удовлетворение таких дополнительных требований к их работоспособности:

1) истекающие и распространяемые в техносфере потоки энергии и вредного вещества должны представлять собой не только ионизирующие излучения, движущиеся микро-и макротела, но также различные газы и их всевозможные смеси с другими веществами;

2) источники выбросов подобных веществ могли бы характеризоваться одно-, двух- и трехмерными параметрами пространства, а также импульсным, непрерывным или случайным (по времени и интенсивности) режимом работы;

3) новая, или несущая (для распространяющихся потоков), среда может бы атмосферой, гидросферой и литосферой, которые характеризуются своей плотностью, скоростью перемещения, геометрией (рельефом подстилающей поверхности), а также отражающей либо адсорбирующей способностью по отношению к потокам энергии или вредного вещества.

Минимальный объем *входной* информации, необходимой для прогноза интенсивности или количества высвободившихся энергии вредного вещества, а также параметров распределения их мощности или концентрации в зонах рассеяния, должен включать следующие сведения:

а) координаты местоположения, энергетические потенциалы, масса и термодинамические параметры вредного вещества, содержащегося в их аккумуляторе либо генераторе, а также геометрия поверхности истечения из них;

б) мощность истекающего потока энергии и физико-химические характеристики аварийно-опасного или иного вредного вещества, определяющие их агрессивность либо инертность по отношению к новой среде;

в) геометрия и динамика параметров этой среды, определяющие ее сопротивление истечению, распространению или рассеянию в ней потоков энергии и вредного вещества.

Наконец, объем *выходной* информации, получаемой с помощью моделей и методов прогноза характеристик, рассматриваемых здесь этапов причинения

техногенного ущерба, должен включать следующее:

1) количество заполнивших новую среду вредных веществ или уровни потенциала потоков энергии в различных точках соответствующего пространства;

2) геометрические характеристики зоны загрязнения этими веществами или вредного воздействия такой энергией, а также динамика ее размеров;

3) локальные характеристики концентрационного поля в точках этой зоны, включая изолинии или изоповерхности потенциалов энергии и токсонагрузок вредного вещества.

Анализ только что сформулированных требований свидетельствует о сложности их одновременного удовлетворения в общем случае, т. е. путем создания какой-либо одной, универсальной модели. Это указывает на целесообразность разработки набора различных моделей и методов целевого предназначения, что и подтверждается накопленным к настоящему времени опытом в этой области. Проиллюстрируем многообразие возможных моделей и методов на примере следующей, довольно общей системы классификации и кодирования по признакам, существенным для исследуемого здесь процесса истечения и распространения вредного вещества.

Все модели этого типа удобно *классифицировать* по следующим признакам:

а) теоретический базис: 1 – модели диффузионного обмена, 2 – модели дисперсионного обмена;

б) размерность источника загрязнения: 0 – точечный, 1 – линейный, 2 – площадной;

в) временной режим работы источника выбросов: 1 – практически мгновенно, 2 – неустановившийся (переменная интенсивность в течение исследуемого времени t), 3 – установившийся: $t \rightarrow \infty$ и 4 – эпизодические залповые выбросы вредного вещества;

г) размерность загрязняемой зоны: 1 – одномерная, 2 – двумерная, 3 – трехмерная;

д) активность вещества: 0 – инертное, 1 – неинертное, подверженное химическим или фазовым превращениям;

е) условия на границах зоны рассеяния: 0 – нулевая концентрация при большом удалении от источника выброса, 1 – полное отражение и 2 – поглощение вредного вещества на границе.

К сожалению, сделанный ранее (см. разд. 8.2) обзор известных моделей и методов прогноза параметров рассматриваемой стадии процесс а причинения техногенного ущерба указывает, что не все они удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Действительно, ряд нынешних методик, предназначенных для априорной количественной оценки последствий непрерывных и аварийных выбросов вредного вещества, не только громоздки, но и страдают другими существенными *недостатками*.

Например, в методике, известной специалистам как ОНД – 86*, ряд основополагающих математических соотношений не совпадают по размерности учитываемых параметров. Не лишена ряда недостатков и более

поздняя нормативная методика [20], которая содержит неточности в написании нескольких формул и не учитывает зависимость дисперсии от времени. Последняя ошибка приводит к нарушению условия сохранения массы вредного вещества и чревата неточностями вывода формул для концентрационного поля, образуемого непрерывно действующим источником его выбросов.

Во-вторых, в этой же методике имеются и менее «прозрачные» ошибки. Так, при выдаче рекомендаций о порядке оценки параметров концентрационного поля от кратковременно «работающего» источника выбросов, не выделены два интервала: время его функционирования и период после этого. Дело в том, что формируемая в эти промежутки времени токсонагрузка выражается разными математическими соотношениями, и игнорирование этого различия приводит к неверным прогнозам. О способе устранения данного недочета официальной методики, будет изложено в разд. 9.2.

Наконец, авторы данной методики не совсем корректно устранили тот известный недостаток используемой ими гауссовой модели, который приводит к бесконечно высокой концентрации вредного вещества в момент его мгновенного выброса из точечного источника. Для этого они внесли поправку на размеры облака в начальный момент, но забыли сделать подобное в компонентах дисперсии, входящих в показатели экспонент второго сомножителя данного уравнения. В итоге, их «поправка» также нарушила материальный баланс и исказила за счет этого прогноз параметров рассчитываемого концентрационного поля.

Говоря об особенностях моделирования процесса истечения вредного вещества и априорной оценки высвободившейся при этом его массы, подчеркнем принципиальную невозможность заблаговременного и точного прогноза соответствующих количественных параметров для всех реально возможных ситуаций. По этой причине, на практике приходится пользоваться ограниченным числом расчетных сценариев, а для их количественного анализа применять математические соотношения, обоснованные как теоретически, так и эмпирически.

Чаще всего, при оценке массы или объема утечки аварийно опасных и других вредных веществ, находящихся в каком-либо сосуде в газообразном или жидком состоянии, рекомендуется рассматривать по два наиболее вероятных сценария [20]: 1) высвобождение всего их количества K по причине полного разрушения сосуда; 2) частичное опустошение емкости или магистрали вследствие нарушения их герметичности. В первом случае, например, количество высвободившегося газообразного вредного вещества равно всей его массе, а если она неизвестна, то рассчитывается по формуле:

$$K = \mu VP / [R(T + 273,15)], \quad (9.1)$$

где μ – молярная масса вредного вещества, кг/моль; V , P , T – соответственно его объем (м^3), давление (Па) и температура ($^{\circ}\text{C}$); R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(К • моль).

Подобным, но более громоздким способом определяется, и объем

пролитого жидкого вещества. Последнее связано с необходимостью учета части вредного вещества, частично находящегося в газообразной фазе, а затем и его испарения в момент и после аварийного высвобождения жидкости из емкости.

В данном случае интенсивность высвобождения газообразного вредного вещества из-за частичной разгерметизации емкости q (кг / с) следует оценивать по наименьшему значению правой части следующей формулы:

$$q = 0,8S_{\min} \left[2\gamma P_{\rho_2} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\gamma+1/\gamma} \right] / (\gamma - 1) \right]^{1/2};$$

$$[P_{\rho_2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}]^{1/2},$$
(9.2)

где S_{\min} – площадь отверстия, приведшего к разгерметизации емкости, м²; P , P_0 – давления соответственно внутри и за пределами емкости, Па; ρ_2 – плотность вредной смеси, кг/м³; γ – показатель адиабаты.

В тех случаях, когда рассматривается трубопровод диаметром D , в котором образовалось отверстие площадью S , то скорость истечения из него жидкости (кг/с) с учетом ее возможного вскипания определяется таким образом [20]:

$$Q = 0,6S \sqrt{2Hg\rho_{ж}^2 + 2\rho_{ж}[P - p_H(T)] + \frac{1}{\nu} \frac{\Delta H_{кип}^2 \rho^2 [T p_H(T)]}{c_p (T_{кип} + 273,15)}} \quad (9.3)$$

$$U = \begin{cases} \frac{\Delta Q_{кип}^2 \rho^2 [T p_H(T)]}{2\rho_{ж}[p_H(T) - P_0]c_p (T_{кип} + 273,15)} + \frac{L}{30D}, & 0 \leq L \leq 30D; \\ 1,18, & 30D < L \leq 50D; \\ 1,33, & 50D < L \leq 100D; \\ 1,54, & 100D < L \leq 200D; \\ 1,82, & 200D < L \leq 400D; \\ 2,1, & 400D < L, \end{cases}$$

где H – высота столба жидкости над уровнем отверстия; $\rho_{ж}$ плотность, кг/м³; L – длина трубопровода от начала до места разгерметизации, м; $Q_{кип}$ – теплота испарения жидкости, Дж/кг; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг град); $p_H(T)$ – давление насыщенных паров при температуре жидкости в емкости, Па; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; $\rho [T p_H(T)]$ – плотность, кг/м³, газовой фазы при температуре T и давлении $p_H(T)$; $T_{кип}$ – температура, кипения жидкости, °С.

Подобным образом может быть определено время процесса истечения жидкостного или газообразного вредного вещества из емкости или трубопровода. Так, при известном количестве K (кг) вредного вещества в емкости продолжительность истечения t (с) должна рассчитываться делением K на q , а при отсутствии этой информации

$$\tau = \mu VP / [R(T + 273,15)] q. \quad (9.4)$$

Заметим также, что в работе [1] и методике [20] имеются и другие математические соотношения, необходимые для прогноза параметров

рассматриваемого здесь процесс истечения вредного вещества. При этом предполагается, что входящие в них параметры могут быть найдены в конструкторско-технологической документации на конкретное технологическое оборудование либо оценены по статистическим данным аналогов.

Что касается особенностей высвобождения и перемещения потоков энергии, то ситуация с исследованием и прогнозом количественных параметров данного процесса не вызывает значительных трудностей. В большинстве случаев здесь можно ограничиться известными физическими соотношениями для кинетической, тепловой, электрической и ядерной энергии, динамика потоков которых досконально изучена. Столь же хорошо известна экранирующая способность конструкционных и природных материалов либо сопротивление различных сред перемещению только что упомянутых потоков.

Завершая изложение особенностей моделирования и системного анализа процесса истечения и распространения энергии и вредного вещества в техносфере, еще раз обратим внимание на погрешности действующих ныне официальных методик. Это свидетельствует о необходимости либо тщательного анализа таких моделей и методов на предмет пригодности для конкретной цели, либо их соответствующей коррекции или модификации. Некоторые конкретные рекомендации рассматриваются в следующих двух параграфах данной главы.

7.2. Модели и методы прогнозирования зон неуправляемого распространения потоков энергии и вредного вещества

В соответствии с принятой ранее логикой априорной оценки техногенного ущерба представляет интерес прогнозирование тех зон распространения вредного вещества и энергии, в которых параметры их потоков могут оказать разрушительное воздействие на находящиеся там ресурсы. Поэтому рассмотрим способы предварительной оценки размеров таких зон и тех действующих в них поражающих факторов, которые обусловлены вредными энергетическими и материальными выбросами из близлежащих объектов техносферы.

Иначе говоря, сделаем количественный прогноз параметров, необходимых для определения входящих в формулу (8.25) площадей достоверного P_{kd} и вероятного P_{kq} причинения ущерба людским, материальным и природным ресурсам. К таким параметрам относятся энергетические потенциалы и/или концентрации $c(r, t)$ вредных веществ, используемые (совместно с характеристиками конкретных ресурсов) также и для последующего определения вероятностей Q_{kq} и размеров причиняемого им техногенного ущерба Y_{kq} , Y_{kd} . При изложении соответствующих моделей и методов, помимо рассмотренных выше особенностей и общих положений, будем учитывать и специфику конкретных поражающих факторов и ресурсов.

Кроме того, исходя из невозможности рассмотрения всех потенциальных

жертв и вредных факторов, здесь ограничимся лишь прогнозом наиболее характерных зон их поражения. Сделаем это последовательно для таких *трех случаев*: 1) аварийное высвобождение и неконтролируемое распространение потоков энергии сопутствующих механическому воздействию движущихся тел, 2) физико-химические превращения взрывопожароопасных веществ и 3) распространение в атмосфере токсичных парогазовых и мелкодисперсных смесей. Основное внимание при этом будет уделено моделированию и системному анализу термодинамических Процессов, сопровождающихся образованием и неконтролируемым распространением соответствующих поражающих факторов, а также исследованию геометрии распределения их параметров.

Что касается *первой* ситуации, т.е. прогноза зон распространения аварийных потоков механической энергии, то здесь подразумевается рассмотрение эффектов, связанных с а) инерционными силами движущихся тел или их осколков и б) потенциальной энергией, накопленной ими до начала перемещения. В первом случае обычно имеется в виду кинетическая энергия \mathcal{E}_K и работа так называемой центробежной силы $F_{цб}$; во втором – энергия, накопленная под влиянием тяготения Земли (вследствие разницы положения предмета относительно ее центра) или обусловленная упругостью газа, который находится в объеме V (м³), под давлением P (Па).

Энергия и силы, порожденные инертностью массы движущихся тел, рассчитываются по таким соотношениям классической физики:

$$\mathcal{E}_K = MW^2/2; F_{цб} = MW^2/R, \quad (9.5)$$

а количество потенциальной энергии: $\mathcal{E}_{п.т}$ – тяготения и $\mathcal{E}_{п.г}$ сжатых газов по соотношениям:

$$\mathcal{E}_{п.т} = MgB; \mathcal{E}_{п.г} = PV\gamma[(P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma}]/(\gamma - 1), \quad (9.6)$$

где W, R – скорость (м/с) и радиус (м) траектории криволинейного движения тела в данный момент; M, B – масса (кг) и высота (м) относительно другого расположенного ниже предмета; P, P_0 давление газа соответственно до и после расширения; γ – показатель адиабаты, Па; g – ускорение свободного падения.

Для определения размера области пространства, в пределах которого может проявиться вредный эффект рассмотренных выше видов механической энергии, помимо ее величины, необходимо знать и сопротивление, оказываемое соответствующим телам со стороны других тел или несущей среды. В общем случае путь разрушительного распространения потоков такой энергии определяется как частное от совершаемой ею работы и противодействующей этому силы. Применительно к движению в атмосфере величина аэродинамического сопротивления $F_{a.c}$ оценивается, например, по такому математическому соотношению:

$$F_{a.c} = k_{л.с}(\rho W^2/2)S_{л.с}, \quad (9.7)$$

где $k_{л.с}$ – коэффициент лобового сопротивления тел различной формы, учитывающий снижение соответствующей силы из-за неполного разрежения

потока после их обтекания; P – плотность атмосферы, кг/м^3 ; W – скорость тела или потока воздуха, м/с ; $S_{\text{л.с}}$ – площадь лобового сопротивления тела, т. е. того его сечения, которое перпендикулярно скорости движения тела или направлению обтекающего его потока, м^2 .

Приведенные аналитические зависимости свидетельствуют о том, что область неуправляемого распространения потока механической энергии однозначно определяется величиной, как самой этой энергии, так и противодействующей ей силы. Это проявляется, например, в том, что при столкновении твердых тел возникают большие силы, а совершаемая ими работа завершается разрушением или изменением положения тел в пространстве. В то же время взаимодействие неупругих тел приводит к их взаимному нагреву и деформации.

Вторая рассматриваемая здесь ситуация будет касаться процесса зарождения облака топливозвоздушной смеси и распространения тех потоков энергии, которые обусловлены ее взрывом и интенсивным горением. В частности, речь ниже пойдет главным образом об априорной оценке соответствующих областей, а также действующих в них фугасных эффектов воздушной ударной волны и разрушительного воздействия потоков теплового излучения. Как и ранее, сделаем это последовательно и, конечно же, лишь для наиболее характерных сценариев их распространения.

В частности, размеры тех зон, которые ограничивают в горизонтальном и вертикальном направлениях область концентрации $S_{\text{н.к.пр}}$, превышающей нижний концентрационный предел распространения пламени, можно оценить по следующим полуэмпирическим соотношениям:

для наиболее широко применяемых горючих газов

$$X_{\text{н.к.пр}} = 14,6 \left(\frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} S_{\text{н.к.пр}}} \right)^{0,33}; \quad Z_{\text{н.к.пр}} = \left(\frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} S_{\text{н.к.пр}}} \right)^{0,33};$$

для паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей

$$X_{\text{н.к.пр}} = 3,2 \sqrt{T} \left(\frac{F_{\text{ж}}}{S_{\text{н.к.пр}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}}} \right)^{0,33};$$

$$Z_{\text{н.к.пр}} = 0,12 \sqrt{T} \left(\frac{F_{\text{ж}}}{S_{\text{н.к.пр}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}}} \right)^{0,33}; \quad T = \tau/3600,$$

где $X_{\text{н.к.пр}}$, $Z_{\text{н.к.пр}}$ – соответственно диаметр и высота области цилиндрической формы (для безветренной погоды); $m_{\text{г}}$, $m_{\text{ж}}$ – масса соответственно газов и паров, поступающих в открытое пространство, кг ; $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность соответственно газов и паров при расчетной температуре и атмосферном давлении, $\text{кг}\cdot\text{м}^3$; $P_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара легковоспламеняющейся жидкости при расчетной температуре жидкости, кПа ; τ – продолжительность поступления в открытое пространство.

При прогнозе зон фугасного поражения различных ресурсов, целесообразно исходить из того, что основным поражающим фактором

является избыточное давление на фронте воздушной волны ΔP_ϕ , обычно определяемое по выражению (8.23). Поскольку оно дает большие погрешности на очень малом и большом удалении от точки взрыва, то в последнее время рекомендуется использовать более точное выражение этой же зависимости [22]:

$$\Delta P_\phi = [((1,60 + 0,9X_\phi)/X_\phi)^{2-1}]P_0; X_\phi = X_\phi/\Xi_T^{1/3}. \quad (9.8)$$

Напомним, что под символами X_ϕ и Ξ_T здесь подразумеваются расстояние от центра взрыва (м) и тротильный эквивалент взорванного вещества (кг), включая топливовоздушную смесь, тогда как P_0 означает стандартное атмосферное давление, равное 103,32 кПа. Считается также, что приведенные математические соотношения пригодны для прогноза избыточного давления, ожидаемого и за пределами диапазона $[4 < X_\phi < 10]$.

Попутно заметим, что подобные выражения рекомендуются и официальной методикой [19], где наравне с безразмерным удалением X_ϕ также используются три импульса давления, (Па·с): I – безразмерный для фазы сжатия и два обычных: $I+$ – для фазы сжатия и $I-$ – разрежения. Физический смысл и значения двух последних интегральных параметров могут быть уяснены с помощью рис. 9.1, где они показаны заштрихованными площадями.

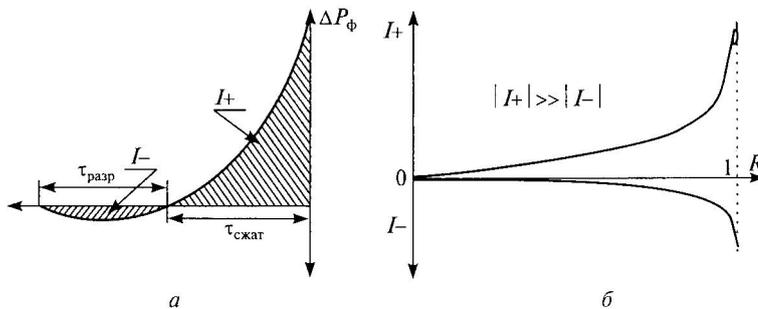


Рис. 9.1. Факторы и параметры воздушной ударной волны:
a – давление и импульсы; *б* – импульсы (биоэффект)

Обратим внимание на то, что, несмотря на заметно большие значения параметров фазы сжатия (рис. 9.1, *a*), существенным разрушительным эффектом для живых организмов обладает и фаза разрежения воздушной ударной волны. На рис. 9.1, *б*, представляющем зависимость «доза импульса – риск (вероятность) их поражения», это обстоятельство отражено разными тангенсами $(\Delta I+/\Delta R)$ и $(\Delta I-/\Delta R)$ угла наклона соответствующих кривых в начале и в конце диапазона возможных значений риска причинения этим жертвам конкретного ущерба. Причина тому – неготовность живого организма к парированию «отрицательного» (по сравнению с внутренним) давления атмосферы.

Приведенные выше соотношения справедливы не только для прогнозирования зон поражения от взрыва соответствующего количества, конденсированного вещества (дополнительные сведения об этом можно

почерпнуть в фундаментальном двухтомнике [31]), но и облака парогазовой или мелкодисперсной смеси горючего вещества с воздухом. Тем более что в силу значительных пространственных объемов данного физико-химического превращения и последующего их «схлопывания» параметры фазы разрежения воздушной волны оказываются здесь более разрушительными. Не зря, поэтому *объемные* взрывы этого типа иногда отождествляют с так называемыми вакуумными бомбами, предназначенными для массового поражения личного состава противника, особенно если он находится в каких-либо укрытиях ограниченного объема.

Для априорной же оценки последствий подобных взрывов топливовоздушной смеси, также может быть использован изложенный выше подход к прогнозированию избыточного давления на фронте воздушной ударной волны. При этом обычно применяют два типа возможных моделей и методов, основанных на аналитическом моделировании и количественном анализе процесса распространения этого поражающего фактора в атмосфере.

В первом случае используется формула (8.23) или ее модификация (9.5) в предположении о возможности расчета тротилового эквивалента \mathcal{E}_T (кг) соответствующего облака *горючего газа* по следующей полуэмпирической зависимости:

$$\mathcal{E}_T = 0,044 k_{Г.В} \beta_0 \nu_0 K_{Г.В} / 4,52, \quad (9.9)$$

где $k_{Г.В}$ – доля участвующего во взрыве газа; β_0 – коэффициент, корректирующий его удельную энергоемкость относительно какой – либо эталонной смеси; ν_0 – параметр, учитывающий возможность усиления избыточного давления за счет отражения воздушной ударной волны (для наземного взрыва $\nu_0 = 2$); $K_{Г.В}$ – количество (масса) горючего газа в топливовоздушной смеси, кг [3]. В случае же прогноза избыточного давления ΔP_ϕ от взрыва распыленного в помещении *мелкодисперсного* твердого вещества (чаще всего – это пылинки зерна, муки и сахара размером до 2 мк) рекомендуется применять такую полуэмпирическую формулу :

$$\Delta P_\phi = K_{д.п} Q_{д.п} P_0 k_{y\%} / (V_{д.с} \rho_0 C_0 T_0 K_{на}), \quad (9.10)$$

где $K_{д.п}$ – количество дисперсного продукта, кг; $Q_{д.п}$ – удельная теплота сгорания дисперсного продукта, (Дж/кг); $k_{y\%}$ – доля его участия во взрывном физико-химическом превращении, %; $V_{д.с.}$ – объем помещения, заполненного данной топливовоздушной смесью, м³; P_0 , ρ_0 и T_0 – соответственно начальное давление (МПа), плотность (кг/м³) и температура (К) смеси; C_0 – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг К); $K_{на}$ – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процессов в нем.

В качестве комментария к двум последним формулам, обратим внимание на следующее [1, 3, 19]: а) величину параметра $k_{Г.В}$ следует выбирать из отрезка [0,1 ...0,5] с учетом того, что меньшие значения должны соответствовать открытым пространствам средние – замкнутым объемам, максимальные – водородным смесям; б) для определения коэффициента β_0

необходимо использовать справочные данные из табл. 8.3 или других источников; в) значение коэффициента $K_{на}$ в большинстве случаев можно принимать равным 3.

Априорная количественная оценка зон распространения *термического* поражающего фактора актуальна как для пожаров на объектах техносферы, так и для выброса значительного количества переохлажденных веществ. В последнем случае имеются в виду те криогенные жидкости и сжиженные горючие газы, которые способны выделять накопленную в них химическую энергию одним из следующих трех основных способов: а) факельное горение струи такого жидкого топлива или его парогазовой смеси; б) их поверхностное выгорание в пределах образовавшегося бассейна; в) испарение пролитых сжиженных газов и их вспышка в форме огненного шара (взрыв типа *BLBVE** Данная аббревиатура образована словами *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*, которые можно перевести как «взрыв облака пара, образовавшегося в результате вскипания жидкости», как правило, переохлажденной.).

Интенсивность термического излучения соответствующего источника ИФ ($Вт/м^2$) и плотность генерируемого им теплового потока q_t [$кДж/(м^2 \cdot ч)$] в общем случае рассчитываются с использованием следующих формул:

$$I_{\Phi} = \varepsilon_{\text{ч}} k_{CB} T_{п.ф}^4; q_t = k_{Х.Н} V_{м} \Pi_{п} Q_{сг} / (3,6 \Pi_{т.в}), \quad (9.11)$$

где $\varepsilon_{\text{ч}}$ – степень черноты; $T_{п.ф}$ – температура поверхности фронта распространения огня, К; k_{CB} – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,76 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²; $k_{Х.Н}$ – коэффициент химического недожога;

Таблица 9.1

Параметры распространения тепловых факторов, кВт/м²

Тепловой поток	Удаление, м								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Внеатмосферная погода	10	7,15	5,21 15,4	3,90 12,0	2,95 9,8	8,0	6,6	5,5	4,6
Внутри, 5 м/с	28,7		17,5 10		10,2	19	5,3		2,7 12

$V_{м}$ – массовая скорость, кг/(м² · ч); $Q_{сг}$ – теплота сгорания вещества или материала, кДж/кг; $\Pi_{п}$ – площадь пожара; $\Pi_{т.в}$ – суммарная поверхность тепловыделения, м².

Входящие в выражения (9.11) параметры, необходимые для прогноза разрушительного эффекта тепловых поражающих факторов, следует определять с помощью специальной литературы, например [1, 26] или других подобных изданий. Чаще всего там они представлены в виде расчетных формул, графиков, номограмм или таблиц. Одна из таких таблиц, содержащая сведения о теплофизических характеристиках наиболее распространенных веществ и конструкционных материалов, имеется также в приложении П.6.2.

Результаты же расчета по только что приведенным формулам радиусов

вредного воздействия термических факторов проиллюстрированы в табл. 9.1 применительно к изменению удельного теплового потока при удалении от центра очага пожара, вызванного горением большого количества легких углеводородов широкой фракции. Числители в строках табл. 9.1 соответствуют площади пожара с радиусом горения в 25 м, а знаменатели – в 50 м.

Оценка размеров огненного шара, образующегося при воспламенении паров криогенного или сжиженного углеводородного топлива либо в результате утечки большого количества природного газа, также проводится с помощью подобных математических соотношений, например формулы (8.22). В частности, для известного количества испарившегося углеводородного газа $K_{y.g}$ (т) экспериментально установлено, что диаметр такого шара $D_{o.ш}$ (м), излучаемая им мощность $E_{o.ш}$ (ГВт) и время его существования $\tau_{o.ш}$ (с) соответственно равны:

$$D_{o.ш} = 55K_{y.g}^{0,375}; E_{o.ш} = 12,3K_{y.g}^{2/3}; \tau_{o.ш} = 3,8K_{y.g}^{1/3} \quad (9.12)$$

Расчет же по вышеприведенным формулам для $K_{y.g} = 50$ т приводит, например, к таким результатам: $D_{o.ш} = 205$ м и $\tau_{o.ш} = 14$ с.

А вот интенсивность $q_{o.ш}$ теплового потока, излучаемого огненным шаром, определяют уже с помощью такой полуэмпирической формулы:

$$q_{o.ш} = \frac{k_{тн} E_{y.g} Q_{c.g}}{4\pi \left(\frac{D_{o.ш}}{2}\right)^2 \tau_{o.ш}} \quad (9.13)$$

где $k_{тн}$ – доля теплового излучения в общей энергии, выделяемой огненным шаром при сгорании углеводородного газа; $Q_{c.g}$ – удельное теплосодержание.

Для веществ, аварийный выброс которых чаще всего сопровождается образованием огненного шара, значение $Q_{c.g}$ рекомендуется [30] принимать равным 45-48 МДж/кг, доля же лучистой энергии $k_{тн}$ обычно равна 0,15-0,45. Заметим также, что величина обоих параметров растет при повышении давления паров данного вещества, поскольку разрушение соответствующей емкости всегда приводит к лучшему его перемешиванию, а стало быть к более интенсивному горению образовавшейся топливовоздушной смеси.

Что касается *третьей* из рассматриваемых здесь ситуаций, то оценку ее параметров можно провести с помощью формул (8.11)(8.14). При этом удобно оперировать понятиями «клуб облака» и «пятно загрязнению», понимая под ними соответственно геометрическое место точек $c(x, y, z, t)$ и $c(x, y, z=0, t)$, текущее значение концентрации внутри которых не меньше, чем некоторое ее пороговое значение c^* . Основным отличием этих областей служит то, что облако представляет собой объемное образование, а пятно – его плоскость, параллельную поверхности Земли и приподнятую над нею на $z = 1,5$ м.

Последовательно проиллюстрируем возможность прогноза формы и динамики этих двух фрагментов поля концентрации с помощью моделей (8.11)-(8.13). Начнем с клуба облака, для которого учтем поочередно

следующие три положения источника относительно подстилающей поверхности: 1) наземное ($z=0$); 2) очень высокое ($z \rightarrow \infty$); 3) не очень высокое ($0 < z < \infty$).

Так, для *первого* случая ($z = 0$) замена в уравнении (8.11) всех сомножителей на выражения (8.12) и (8.13), а также его последующие преобразования в предположении $c(x, y, Z, t = t^*) = c^*$, позволяют получить выражение для поверхности искомого клуба облака. Оказывается, что он представляет собой полуэллипсоид с центром в точке $z'(u_x t, 0, 0)$ и длиной главных полуосей $a_{x1}(t^*)$, $a_{y1}(t^*)$ и $a_{z1}(t^*)$, определяемых следующими формулами [13]:

$$a_{i1}^2(t^*) = 2\sigma_{(i)}^2(u_x t^*) \ln[d_1(t^*)]; \quad i = x, y, z; \quad d$$

$$d_1(t^*) = \frac{M_2 f_p(t^*) f_{0c}(t^*)}{c^* (2\pi)^{3/2} \sigma_x(u_x t^*) \sigma_y(u_x t^*) \sigma_z(u_x t^*)} \quad (9.14)$$

Аналогичным образом могут быть получены математические соотношения для поверхности клуба облака во *втором* случае, т. е. когда ($z \rightarrow \infty$). Для неограниченного пространства клуб будет представлять уже полный эллипсоид с центром в точке $r_2(u_x t, 0, z)$ и длиной главных полуосей $a_{x2}(t^*)$, $a_{y2}(t^*)$ и $a_{z2}(t^*)$. Эти параметры так же определяются по зависимостям (9.14) с тем единственным отличием, что в числителе выражения для $d_2(t^*)$ на сей раз отсутствует множитель 2, т.е. $d_2(t^*) = d_1(t^*)/2$, тогда как $a_{i2}(t^*) = a_{i1}(t^*)$.

Заметано сложнее обстоит дело в *третьем* и наиболее общем случае, что обусловлено «сдвоенностью» плотности $f(z)$ и подчиненностью ее параметра z уже усеченному закону нормального распределения этой случайной величины. Получив общее выражение для поверхности клуба облака (подобно первому случаю) и исследовав изолинии, образуемые ортогональными осям x, y, z плоскостями, можно прийти к следующим важным результатам, касающимся геометрии клуба облака вредного вещества для ($0 < z < \infty$).

Оказывается, что поверхность клуба имеет более сложную (чем эллипсоид) форму сечения которой горизонтальными плоскостями дает изолинии в форме эллипсов с центрами в точках $(u_x t^*, 0)$ и длинами полуосей $a_{x3}(t^*)$, $a_{y3}(t^*)$. При этом с увеличением высоты относительно сечения максимальных размеров длины обеих полуосей монотонно и пропорционально уменьшаются, вплоть до «обнуления» на некоторой высоте z_3 , т. е. при $z = z_3$ эллипс вырождается в точку. В то же время при снижении этих сечений относительно максимального значения его полуоси некоторое время сокращаются с постепенно уменьшающимися скоростями $\partial[a_{x3}(t^*)]/\partial z$ и $\partial[a_{y3}(t^*)]/\partial z$, а при $z = 0$ длина полуосей принимает конечные размеры.

Несколько другие результаты получаются при сечении клуба облака плоскостью, перпендикулярной оси X в данном случае для соответствующей изолинии были получены следующие соотношения:

$$y = \pm a_y(z, t^*) \sqrt{1 - \frac{(x_p - u_x t^*)^2}{a_x^2(z, t^*)}}, \left| \frac{x_p - u_x t^*}{a_x(z, t^*)} \right| \leq 1 \quad (9.15)$$

Соотношения, подобные (9.15), справедливы и для ортогональных оси Y сечений клуба облака с той разницей, что числители каждой из этих двух формул лишились вычитаемых $(u_x t^*)$, а уравнение для изолинии $x = \text{const}$ отличается от левой части системы (9.15) тем, что имеет дополнительный член $(u_x t^*)$, расположенный перед знаком « \pm ».

Только что приведенные результаты качественного анализа геометрии прогнозируемого клуба облака проиллюстрированы на рис. 9.2 для всех трех случаев. Так, на рис. 9.2, *а* изображены два клуба облака – соответствующий наземному источнику ($z = 0$), а вверху – неограниченному пространству ($z \rightarrow \infty$). На рис. 9.2, *б* показан общий вид клуба облака, формируемого при промежуточном расположении источника и напоминающего молодой гриб-дождевик (либо электролампочку). Изолинии пороговой концентрации вредного вещества, образуемые сечениям рассматриваемого клуба горизонтальными плоскостями представлены на рис. 9.2, *б*, а вертикальными – на рис. 9.2, *в*.

Вторая (после клуба облака) задача связана с подобным исследованием характера изменения геометрии того пятна загрязнения, которое может находиться на высоте органов дыхания человека ($z = 1,5$ м), а стало быть, определять его токсонагрузку в зоне распространения вредного вещества. Для получения аналитического выражения контурной линии этого пятна (иногда называемой изоплетой) правомерно воспользоваться только что изложенными результатами. В частности, соблюдение требования $c(x, y, 1,5) = c$ системой уравнений (8.11)-(8.13) при условии, что $(0 < z < \infty)$, т.е. для наиболее общего (третьего) случая, дает такое выражение для полуосей соответствующего эллипса [13]:

$$a_i^2(1,5, t^*) = 2\sigma_i^2(u_x t^*) \ln[d(1,5, t^*)], \quad i = x, y; \quad (9.16)$$

$$d(1,5, t) = \exp\left[-\frac{(1,5 - z_0)^2}{2\sigma_z^2(u_x t^*)}\right] \left\{ 1 + \exp\left[-\frac{3z_0}{2\sigma_z^2(u_x t^*)}\right] \right\} d_2(t^*)$$

где $d_2(t^*) = d_1(t^*)/2$ – параметр, рассчитываемый по второй формуле системы уравнений (9.16).

Как видно из данных математических соотношений положение центра пятна загрязнения (эллипса) соответствует координатам $(u_x t^*; 0; 1,5$ м), а размеры его полуосей равны $a_x(1,5 t^*)$ и $a_y(1,5 t^*)$, т. е. зависят от времени превышения концентрацией вредного вещества ее порогового значения c^* . Более того, первое из этих уравнений показывает, что при $d(1,5 t^*) = 1$, длина полуосей $a_x(1,5 t^*)$ и $a_y(1,5 t^*)$ пятна загрязнения становится равной нулю.

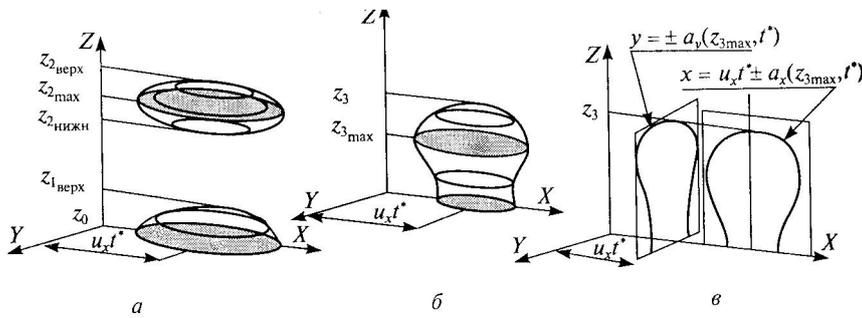


Рис. 9.2. Иллюстрация геометрии клуба облака вредного вещества

Кроме этого, анализ второго уравнения системы (9.16), при условии равенства его правой части единице, с учетом выражения для $d_2(t^*)$ из зависимостей (9.14), показал, что существуют два момента времени, один из которых связан с зарождением исследуемого здесь пятна, а другой – с его исчезновением.

Следовательно, можно утверждать о такой динамике токсонагрузки в процессе распространения вредного вещества. В конкретной точке, начиная с момента времени t_k^* , она поднимается до порогового значения (там образуется пятно загрязнения), затем его величина начинает расти. Достигнув же максимальной величины, размеры этого пятна постепенно сокращаются (имеет место снижение токсонагрузки), до вырождения пятна загрязнения в точку – в момент времени t_k^* . Началу и концу образования такого пятна соответствуют удаления от источника $x_H^* = u_x t_H^*$ и $x_K^* = u_x t_K^*$. Именно так и объясняется эллипсоидная форма зон заражения местности вредным веществом.

Физика же подобного изменения пятна загрязнения predeterminedена монотонно возрастающим характером зависимости дисперсии (σ_x^2 , σ_y^2 , σ_z^2) от времени, обусловленным турбулентностью несущей среды и сопутствующими этому двумя противоречивыми тенденциями. С одной стороны, турбулентное рассеивание вредного вещества приводит к росту размеров пятна загрязнения, с другой – количество этого, вещества внутри пятна постепенно истощается, так как загрязнитель его покидает. В итоге размеры пятна вначале растут, а затем падают согласно описанной выше схеме образования эллипса, показанной на рис. 9.3.

В завершение исследования геометрии и динамики распространения вредного вещества в атмосфере сделаем два *замечания*. Во-первых, возможно более детальное моделирование данного процесса с целью определения пространственно – временных характеристик зон опасного загрязнения (подробнее об этом см. в следующем параграфе и работе [13]). Во-вторых, неполнота полученной до сих пор информации не позволяет обоснованно судить о размерах зон вероятного и достоверного повреждения конкретных ресурсов.

Конкретные значения величины критической мощности $q_{кр}$ (кВт/м²) теплового воздействия на некоторые материалы и его предельно допустимая длительность в от начала прогрева до их воспламенения представлены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Критические тепловые потоки и длительности прогрева

Вещество или материал	q_b , кВт/м ²	τ_b , С		
		$q_{кр} = 50$	$q_{кр} = 100$	$q_{кр} = 200$
солома, хлопок-волокно	7,0-7,5	10,3	2,9	0,91
Х/б ткань темная	8,37	10,7	3,0	0,92
КаРТОН серый	10,8	11,85	3,1	0,94
Дре'весина сосновая	12,8	12,9	3,3	0,96
БИТУМ, резина, торф	7,0	10,2	3,4	0,97
Фанера крашенная	7,0	10,2	3,5	0,99

Таблица 9.2

Критические тепловые потоки и длительности прогрева

Вещество или материал	q_b , кВт/м ²	τ_b , с		
		$q_{кр} = 50$	$q_{кр} = 100$	$q_{кр} = 200$
Солома , хлопок-волокно	7,0—7,5	10,3	2,9	0,91
Х/б ткань темная	8,37	10,7	3,0	0,92
Картон серый	10,8	11,85	3,1	0,94
Древесина сосновая	12,8	12,9	3,3	0,96
Битум , резина, торф	7,0	10,2	3,4	0,97
Фанера крашенная	7,0	10,2	3,5	0,99

С помощью формул (9.8), (9.9) могут быть сделаны априорные оценки зон распространения воздушной ударной волны, сопутствующей взрывам топливоздушных смесей большой мощности. В табл. 9.3 приведены радиусы повреждения зданий и находящихся в ней людей фугасным эффектом такого взрыва, образуемого при почти мгновенном сгорании двух облаков нефтяных газов разной массы.

И наконец, приведем статистические данные [30], характеризующие процесс высвобождения вредного вещества и пригодные для проверки достоверности результатов соответствующего моделирования. Так, при прогнозах объема утечки перевозимых жидких аварийно-опасных веществ через отверстия, образуемые в результате потери соответствующими транспортными емкостям своей герметичности, например, целесообразно

руководствоваться следующими эмпирическими соотношениями:

- а) при пере возке топлива автоцистернами в 60 % случаев вытекает до 10 % их содержимого; в 20 % - до 30 % и в оставшихся 20 % - весь их объем;
- б) при железнодорожных перевозках в 50 % случаев теряется до 10 %, в 20 % - до 30 % и в 30 % вытекает все транспортируемое горючее вещество.

Таблица 9.3

Радиусы разрушительного распространения воздушной ударной волны, м

Степень повреждения	Избыточное давление, кПа	Масса облака нефтяных газов, кг	
		1000	10000
Тяжелые повреждения зданий и увечья людей	30...10	16	35
Полное разрушение стекол и контузии людей	10...3	54	117
Разрушение остекления (10 %) и ушибы людей	3...1	163	352

Таблица 9.3

Радиусы разрушительного распространения воздушной ударной волны, м

Степень повреждения	Избыточное давление, кПа	Масса облака нефтяных газов, кг	
		1000	10 000
Тяжелые повреждения зданий и увечья людей	30... 10	16	35
Полное разрушение стекол и контузии людей	10...3	54	117
Разрушение остекления (10 %) и ушибы людей	3... 1	163	352

В заключение же данного параграфа отметим, что приведенные здесь модели и методы прогнозирования зон неуправляемого распространения энергии и вредного вещества следует рассматривать лишь как часть того инструментария, который необходим для априорной оценки степени и вероятности повреждения ресурсов, оказавшихся под воздействием конкретных поражающих факторов. Еще одна часть данного инструмента излагается в заключительном параграфе этой главы.

7.3. Модели и методы прогнозирования полей концентрации вредных веществ в техносфере

Учитывая актуальность проблемы загрязнения атмосферы токсичными радиоактивными и другими вредными выбросами объектов техносферы, соизмеримыми по плотности с воздухом как несущей их средой, приведем дополнительные сведения о способах моделирования и системного анализа данного процесса. При выборе соответствующего инструментария учитывались как сильные и слабые стороны известных ныне подходов к решению данной задачи (см. разд. 9.2), так и целевое предназначение данной

работы как учебного пособия для студентов вузов.

Последнее обстоятельство способствовало тому, что в качестве наиболее подходящего способа моделирования было выбрано математическое, а основных моделей – более простые параметрические формулы гауссова типа. Принятые при их последующем использовании дополнительные *допущения* касались следующего: а) стационарность метеоусловий от начала загрязнения до спада вредной концентрации ниже порогового значения; б) малая пересеченность рельефа подстилающей поверхности; в) приемлемость результатов прогноза поля концентрации для удаления (0,110 км) от источника загрязнения, т.е. при практически неизменном направлении движения несущей среды на макроуровне.

Используемые в гауссовых моделях параметры рассеяния будут определяться либо по приведенным в разд. 8.2 эмпирическим формулам и их более совершенным аналогам, либо по соответствующим выражениям для вводимых ниже коэффициентов турбулентного обмена.

В качестве же базиса для получения выходных результатов предполагается применить явно выраженное аналитическое решение следующей полуэмпирической диффузионной модели турбулентности:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (u_i c)}{\partial r_i} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial r_i} \left(K_i \frac{\partial c}{\partial r_i} \right) + \Pi(c) = S(\underline{r}, t), \quad (9.18)$$

где c – концентрация вредного вещества в момент времени t в точке \underline{r} с координатами (x, y, z) ; u_i – скорость несущей среды в точке [вдоль i -й координатной оси]; K_i – коэффициент турбулентного обмена вещества с атмосферой вдоль i -й оси; $\Pi(c)$ – скорость убыли вещества за счет его химических и фазовых превращений; $S(\underline{r}, t)$ – функция источника выбросов, определяющая скорость изменения концентрации вредного вещества в атмосфере за счет ее возможной подпитки.

Решение данного дифференциального уравнения в частных производных для начала выброса M вредного вещества в момент времени t_0 из точки $\underline{r}'(x', y', z')$ в неограниченную земной поверхностью атмосферу, в момент времени $\tau = t - t_0$ и при допущениях: $K_i, u_i = \text{const}$, $R(c) = 0$, а также с учетом «нулевых» начальных и граничных условий имеет такой вид:

$$c(\underline{r}, t) = \frac{M}{8\pi\tau^{3/2} \sqrt{K_x K_y K_z}} \exp \sum_{i=1}^3 \left\{ -\frac{[r_i - r'_i - u_i \tau]^2}{4K_i \tau} \right\}, \quad (9.19)$$

$$i = x, y, z,$$

где $\underline{r}, \underline{r}'$ – координаты точек трехмерного (x, y, z) поля концентрации вредного вещества и мгновенного источника его выброса в момент времени t_0 .

Обратим внимание на сходство между только что приведенным общим решением уравнения (9.18) и уже известными формулами (8.11)-(8.13). В сущности, это одно и то же, а имеющиеся отличия в данных математических соотношениях обусловлены тем, что функции $R(c)$, $S(\underline{r}, t)$ и $f_p(t)$, $f_{oc}(t)$ в обоих

случаях равны нулю, а вместо компонентов дисперсии a_x , a_y и a_z здесь используются коэффициенты турбулентного обмена K_x , K_y и K_z . Однако все последние параметры однозначно связаны между собой, что обусловлено такими соотношениями между ними: $K_i = (1/2)d\sigma_i^2(t)/(dt)$ и $\sigma_i^2(t) = 2K_i$ при $K_i = \text{const}$.

Имеются и другие сходные свойства у коэффициентов K_i и σ_i . Во-первых, оба они зависят от свойств среды и степени ее возмущения источником вредных выбросов. Во-вторых, эти параметры изменяются не только с удалением от мест их выброса, но и с ростом времени $\tau = t - t_0$. Наконец, характер такой зависимости не постоянен: с помощью корреляционной функции поля скоростей можно показать, что при малом времени рассеяния $\sigma_i^2 \sim \tau^2$ и $K_i \sim \tau$; а при большом $\sigma_i \sim \tau$ и $K_i \rightarrow \text{const}$ [2]. Вследствие последней особенности коэффициенты турбулентности предпочтительнее применять для мало меняющихся условий несущей среды.

В соответствии с данными представлениями базисная модель может быть получена из уравнений (8.11)-(8.13) и (9.19) с учетом предположений о совпадении а) направления ветра с осью x , б) координат источника с точкой $\underline{r}' = (x', y', z')$ и в) времени его срабатывания с моментом $t = 0$. Это означает, что модель формируемого им поля концентрации может быть представлена в виде $c(\underline{r}, t) = Mf(x, x', t)f(y, y', t)f(z, z', t)f_p(t)f_{oc}(t)$. Интегрирование же данной функции по пространственным координатам источника выбросов позволяет получить и выбранное в качестве *основы* поле концентрации: .

$$C(\underline{r}, t) = c(x, y, z, x', y', z', t) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \prod_{i=1}^3 \sigma_i(u_i t)} G(x, y, z, t) f_p(t) f_{oc}(t), \quad (9.20)$$

$$G(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{(x-x'-u_x t)^2}{2\sigma_x^2(u_x t)} - \frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2(u_y t)}\right) \times \left\{ \exp\left(\frac{(z-z')^2}{\sigma_z^2(u_z t)}\right) + \exp\left(\frac{(z+z')^2}{\sigma_z^2(u_z t)}\right) \right\} \quad (9.21)$$

Именно это решение и будет использовано ниже, для демонстрации того, как поля концентрации, полученные для модели мгновенного источника, могут быть применены и для других важных прогнозов. Дело в том, что модификация параметров последних аналитических зависимостей позволяет выдать *рекомендации*, справедливые для разных условий истечения вредного вещества практически любой геометрии источника и различного режима его «работы».

Иллюстрацию декларируемой возможности начнем с изменения геометрии источника вредных выбросов, при чем сделаем это двумя способами – вначале точным, а затем и приближенным. Для начала предположим, что данный источник представляет собой не точку, а вытянутый вдоль и параллельно оси x отрезок прямой, начало и конец которого соответствуют координатам $(x_1, y', z') = (x_2, y', z')$ и $x_2 > x_1$, а интенсивность q выброса из него вредного вещества неизменна во времени, т. е. $q = \text{const}$. В этом случае модель образуемого им концентрационного поля (ее точное аналитическое выражение)

уже примет следующий вид [13]:

$c(x, t) = qI_1(x, t)f(y, y', t)f(z, z', t)f_p(t)f_{oc}(t)$, где

$$I_1(x, t) = \int_{x_1}^{x_2} f_1(x, x', t) dx' = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[\frac{x-x_1-u_x t}{\sqrt{2}\sigma_x(u_x t)} \right] - \Phi \left[\frac{x-x_2-u_x t}{\sqrt{2}\sigma_x(u_x t)} \right] \right\}, \quad (9.22).$$

Поясним, что входящая в это уравнение функция $\Phi(*)$ называется функцией Лапласа, интегралом ошибок или эрфик -функцией*, а ее значения приведены в табл. П 4.11.

Аналогичным образом получаются поля концентрации и при условии, что источник представляет собой семейство отрезков прямых, параллельных координатным осям y и z , т.е. является *плоскостью*, перпендикулярной направлению ветра, т.е. оси x . В этом случае интегрированию подвергаются соответственно функции $f(y, y', t)$ и $f(z, z', t)$, в результате чего имеем следующее:

$$I_2(y, t) = \int_{y_1}^{y_2} f_1(y, y', t) dy' = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[\frac{y-y_1}{\sqrt{2}\sigma_y(u_x t)} \right] - \Phi \left[\frac{y-y_2}{\sqrt{2}\sigma_y(u_x t)} \right] \right\} \quad (9.23)$$

$$I_3(z, t) = \int_{z_1}^{z_2} f_1(z, z', t) dz' = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[\frac{z-z_1}{\sqrt{2}\sigma_z(u_x t)} \right] - \Phi \left[\frac{z-z_2}{\sqrt{2}\sigma_z(u_x t)} \right] + \Phi \left[\frac{z+z_1}{\sqrt{2}\sigma_z(u_x t)} \right] - \Phi \left[\frac{z+z_2}{\sqrt{2}\sigma_z(u_x t)} \right] \right\} \quad (9.24)$$

Подобным способом могут быть получены и точные аналитические модели полей концентрации, формируемых *объемными* источниками либо частями поверхности и отрезками прямых более сложной конфигурации. Для этого достаточно представлять их множеством точек с равномерной поверхностной или объемной плотностями эмиссии вредного вещества. Однако по причине громоздкости соответствующих математических соотношений здесь они не приводятся, хотя некоторые из таких уравнений имеются в приложении П.5, подготовленном на основе публикаций авторов [13].

В порядке краткого комментария к материалу данного приложения отметим следующее. Все его соотношения получены из фундаментального решения (9.21) при следующих предположениях:

- а) КОД модели соответствует классификации, приведенной в разд. 9.2;
- б) интенсивности выброса вредного вещества в единицу времени из точки, с погонного или квадратного метра соответствуют точечному, линейному и площадному источникам;
- в) несущая среда характеризуется скоростью u_i , а также коэффициентами турбулентного K_i или дисперсионного обмена σ_i ;
- г) источник срабатывает в момент времени $t_0=0$, его координаты равны компонентам радиус-вектора r_i , а текущее время $\tau=t - t_0$.

Данное приложение разбито на две части: табл. П.5.1 – модели дисперсионного и табл. П 5.2 – диффузионного (турбулентного) переноса. Три верхние строки первой таблицы содержат данные о концентрационных

полях, создаваемых точечным, линейным и площадным источниками мгновенного выброса вредного вещества. В четвертой и пятой ее строках рассматривается уже установившийся режим работы ($t \rightarrow \infty$) точечного и линейного источников в однородной и стационарной несущей среде.

Кроме этого, строго говоря, все дисперсионные модели данной таблицы представляют собой не точное, а приближенное решение, поскольку были получены при допущении о зависимости дисперсии лишь от расстояния между источником и конкретной точкой зоны загрязнения. Другими словами, более строгие дисперсионные зависимости от времени или расстояния до центра клуба (см. формулы (8.15) и (8.16)) здесь не учитывались. Поэтому к сведениям данной части приложения П.5 следует относиться лишь как к некоторым оценкам, дающим менее точные (в сравнении с турбулентными моделями) значения функции $c(r, t)$.

Табл. П 5.2 содержит диффузионные модели полей концентрации вредного вещества. Три первые ее строки относятся соответственно к точечному, линейному и площадному источникам – как для неустановившегося (эмиссия продолжается), так и для стационарного режимов. В четвертой строке таблицы приведены результаты только установившегося режима: общее решение – для удалений $x \gg (y + z)l/2$ - и частное – для сильно вытянутого «факела».

А вот две последние строки этой таблицы содержат сведения о полях концентрации вредного вещества от источника, расположенного на границе между несущей средой и подстилающей поверхностью. Обратим внимание на ее способность – полностью отражать или поглощать вредное вещество. В первом случае функция $c(r, t)$ «удваивается» на этой поверхности за счет равенства экспонент в фигурных скобках при $z'=0$, а во втором – со временем как бы «обнуляется».

На этом завершим комментарий к приложению П.5 и перейдем к иллюстрации более простого, *приближенного* подхода к учету особенностей источников вредных выбросов с помощью соотношений (9.20) и (9.21) при условии изменения аргумента их дисперсионных зависимостей. Идея такой коррекции связана с возможностью замены модели с распределенным в пространстве источником на модель с точечным источником. При этом он должен быть расположен левее и сбоку центра реального источника, если направление адекватного потока несущей среды совпадает с осью x .

Продемонстрируем суть подобной «подмены» на примере источника в форме трехмерного *параллелепипеда* с ортогональными координатным осям гранями длиной $2L_x$, $2L_y$, $2L_z$ и центром в точке $(0, 0, Z_0)$. По своей сути в этом случае данная задача сводится к нахождению такого расположения фиктивного источника на линии, проходящей через центр параллелепипеда и параллельно оси x , которое обеспечивало бы эквивалентное ему пятно загрязнения в плоскости $X=0$. При этом струя от точечного источника в сечении $x=L_x$ должна иметь ширину, равную $2L_y$.

Оказывается [13], что достигнуть этого можно тремя перемещениями фиктивного источника в соответствующих плоскостях, направление и

величина каждого из которых - Δx_{xy} , Δx_{xz} и Δx_{xx} определяются такими уравнениями:

$$\sigma_y(\Delta x_{xy}) = L_y/2,15; \sigma_z(\Delta x_{xz}) = L_z/2,15; \sigma_x(\Delta x_{xx}) = L_x/2,15. \quad (9.25)$$

Это означает, что для перехода от модели с точечным источником к модели в виде параллелепипеда можно использовать соотношения (9.20) и (9.21) при условии замены имеющихся там стандартных отклонений на следующие величины: $\sigma_y(u_x t + \Delta x_{xy})$, $\sigma_x(u_x t + \Delta x_{xx})$, $\sigma_z(u_x t + \Delta x_{xz})$

Что касается возможности учета динамики работы источника вредных выбросов, то и эта задача может быть решена модификацией выбранной выше базовой модели. В частности, если речь идет о *кратковременных* интервалах «работы» источника с постоянной интенсивностью истечения, то формируемое им поле концентрации можно построить, с помощью так называемой функции метеорологического разбавления $G(\underline{r}, \underline{r}, t)$. По своей структуре эта функция полностью совпадает с формулой (9.21), за тем исключением, что в момент времени t' там вносится единичная масса вредного вещества, т.е. входящий в формулу (9.20) параметр $M=1$.

Правда, когда импульсные кратковременные выбросы наблюдаются в течение сравнительного небольшого времени $(0, T)$, то при построении концентрационного поля нужно пользоваться уже двумя аналитическими выражениями: а) для периода его кратковременной «подпитки» вредным веществом $(0 < t < T)$ и б) после этого периода $(t \geq T)$.

В завершение данного параграфа выдадим рекомендации по способам более достоверной оценки коэффициентов дисперсного σ_i и турбулентного K_i обмена.

Причина тому – то важное место, которое они играют при точном и приближенном прогнозе полей концентрации вредного вещества $c(\underline{r}, t)$ интегрально отражая (совместно со скоростью U) влияние несущей среды. Сделаем это последовательно: вначале для дисперсионных, а затем и диффузионных коэффициентов, учитывая лишь их зависимость от самых существенных параметров атмосферы.

Для определения дисперсионных зависимостей $\sigma_i(r_i)$ целесообразно воспользоваться рекомендациями Смита – Хоскера [45,52], которые в настоящее время считаются наиболее полно учитывающими такие важные параметры несущей среды, как устойчивость атмосферы и влияние шероховатости её подстилающей поверхности на изменение дисперсии по мере удаления от источника выброса. Если влияние этого удаления на дисперсию $\sigma_y(x)$ в направлении, поперечном оси x и потоку ветра, учитывается здесь подобно Бриггсу (см. формулы (8.19) и (8.20) – их левые части), то зависимость её вертикального компонента $\sigma_z(x)$ выражена уже такими математическими соотношениями:

$$\sigma_z = \begin{cases} \varphi(x, z_0)\theta(x) & \text{при } \varphi(x, z_0)\theta(x) \leq \sigma_z^{\max}(x) \\ \sigma_z^{\max}(x) & \text{при } \varphi(x, z_0)\theta(x) \geq \sigma_z^{\max}(x) \end{cases}$$

$$\varphi(x, z_0) = \begin{cases} \ln\{C_1 x^{D_1} [1 + (C_2 x^{D_2})^{-1}]\} & \text{при } z_0 \geq 0,1 \text{ м;} \\ \ln\{C_1 x^{D_1} / [1 + (C_2 x^{D_2})]\} & \text{при } z_0 < 0,1 \text{ м;} \\ \theta(x) = A_1 x^{B_1} / (1 + A_2 x^{B_2}), & \end{cases} \quad (9.26)$$

где $\sigma_z^{\max}(x)$ - максимально возможное значение этой дисперсии для каждого из введенных выше (см. табл. 8.1) шести классов устойчивости атмосферы; C_1, C_2, D_1, D_2 - коэффициенты, учитывающие влияние шероховатости местности в зоне распространения вредных веществ (см. табл. 9.4); A_1, A_2, B_1, B_2 - коэффициенты, зависящие от класса устойчивости атмосферы и определяемые совместно с параметром $\sigma_z^{\max}(x)$ с помощью табл. 9.5.

Что касается определения коэффициентов турбулентного обмена между атмосферой и вредным веществом ($i = x, y, z$), то соответствующие рекомендации будут касаться следующих трех ситуаций: 1) эта несущая среда считается невозмущенной; 2) атмосфера вблизи источника оказалась под воздействием мощной струи газа легче воздуха; 3) эта же среда «возмущена» выбросом большого объема тяжелых газов.

Таблица 9.4

Значения параметра шероховатости z_0 и коэффициентов C_1, C_2, D_1, D_2

Поверхность	Шероховатость, z_0	C_1	C_2	D_1	D_2
Ровная высокая трава ($u_* = 1$ м/с)	0,01	1,56	0,000675	0,048	0,45
Ровная высокая трава ($u_* = 7$ м/с)	0,04	2,02	0,000776	0,0269	0,37
Покрытая кустарником и деревьями	0,1	2,72	0	0	0
Лес, средняя высота деревьев около 10 м	1	7,37	0,00429	-0,096	-0,6
Город, высота зданий около 25 м	4	11,7	0,0459	-0,128	-0,78

В первом случае для определения коэффициента атмосферной диффузии Kz следует пользоваться такой формулой [2]:

$$Ki = k_K u_*^* z / \varphi_a; \quad \varphi_a = \begin{cases} (1 - 16(z / L_{MO})^{-0,25}, & L_{MO} < 0; \\ (1 + 5(z / L_{MO}), & L_{MO} > 0, \end{cases} \quad (9.27)$$

$$u_*^* = (\tau_{п.п} / \rho_a)^{1/2}$$

где k_K - постоянная Кармана, равная для этих условий $0,4 \pm 0,4$; u_*^* - динамическая скорость (мера интенсивности диффузии), м/с;

Таблица 9.5

Значения параметра $\sigma_z^{\max}(x)$ и коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 и χ

Класс устойчивости	$\sigma_z^{\max}(x)$	A_1	A_2	B_1	B_2	χ
A	1600	0,112	0,000538	1,060	0,815	0,1
B	920	0,130	0,000652	0,950	0,750	0,5
C	640	0,112	0,000905	0,920	0,718	1,5
D	400	0,098	0,001350	0,889	0,688	6,0
E	220	0,0609	0,001960	0,895	0,684	19,0
F	100	0,0638	0,001360	0,783	0,672	65,0

Примечания: 1. Классификацию устойчивости атмосферы см. в прил. по табл. П.4.6 или П.4.7. 2. О предназначении коэффициента χ , устанавливающего отношения между σ_x , σ_y и σ_z , будет сказано в комментарии к формулам (9.30).

z – высота относительно подстилающей поверхности, м; ρ_a – плотность не возмущенной атмосферы (несущей среды), кг/м^3 ; $\tau_{п.п}$ – напряжение трения в подстилающей поверхности (Па), зависящее от степени ее шероховатости; L_{MO} – характерный масштаб длины Монина-Обухова, определяемый для приземного слоя последующей зависимости:

$$L_{MO} = u^3 / [kg/T_0 - q_t / (C_p \rho_a)], \quad (9.28)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; T_0 – средняя температура воздуха в приземном слое, $^\circ\text{C}$; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{кДж}/(\text{кг} \times \text{град})$; q_t – турбулентный поток тепла от подстилающей поверхности, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \times \text{с})$.

Поясним, что в последней формуле частное g/T_0 учитывает влияние архимедовых сил, а вычитаемое $q_t / (C_p \rho_a)$ – турбулентный перенос тепла, тогда как параметр u играет роль масштаба скорости. При этом два последних компонента уравнения (9.28) остаются практически неизменными в приземном слое, высота которого простирается 10 м.

Во втором случае (атмосфера возмущена мощной струей) коэффициент турбулентного обмена в струйном потоке определяется исходя из доказанного А. Колмогоровым, Л. Прандтлем и Е. Хирстом [2] факта о следующей связи этого коэффициента $K_t = K_\tau$ с величиной кинетической энергии турбулентности, пропорциональной скорости $V_{т.п}$ турбулентных пульсаций и с характерным масштабам возмущающей струи $b = u_{x0} (z_c - z_0) / U_0$:

$$K_\tau = \zeta_c b (\rho / \rho_a)^{0,75} V_{т.п}; \quad (9.29)$$

$$V_{т.п} = 0,08 + \{0,5 g u_z [(\rho / \rho_a) - 1] / U^3\} [| [U^2 - u_x U_a] + 4 | (u_z U_a / U) |],$$

где $U_0 = (u_{x0}^2 + u_{z0}^2)^{1/2}$ – модуль вектора скорости истечения (индекс 0) струи газообразного вещества, найденный с помощью его горизонтальной u_x и вертикальной u_z составляющих; z_c, z_0 координаты точек струи, совпадающих с ее внешней частью в вертикальном направлении и осью турбулентного истечения вредного вещества из источника; ζ_c – коэффициент, зависящий от формы струи (для круга $\zeta_c = 0,3$); ρ – плотность невозмущенной атмосферы;

ρ_a – плотность истекающего газа при атмосферном давлении, кг/м³; $\|$ – знак модуля; g – ускорение свободного падения; U_a, U – скорости движения соответственно невозмущенной несущей среды и струи потока газа, м/с.

В *третьем* случае (рассеяние тяжелых газов) коэффициенты турбулентного обмена K_i определяются с помощью соотношений Г. Коленбрандера, Т. Спайсера и Д. Хавенса, которые учитывают связи не только между K_i и параметрами состояния и термогазодинамического возмущения несущей среды, но и между каждым из этих показателей [29]:

$$\begin{aligned} K_x = K_y = \chi K_z; K_z = k_K u^* z / [(0,88 + 0,099 R_i^{1,04}) (1 + \delta)] \\ Ri = (\rho - \rho_a) g h_{eff} / (\rho_a u^{*2}); h_{eff} = (1/C_0) \int_0^z C dz, \end{aligned} \quad (9.30)$$

где χ – безразмерный множитель, определяемый для различных степеней вертикальной устойчивости атмосферы, с помощью приведенной выше табл. 9.4; k_K, Ri – постоянная Кармана и массовое число Ричардсона (безразмерный параметр, характеризующий вертикальную устойчивость атмосферы, здесь $Ri > 0$); h_{eff} – эффективная высота клуба вредного облака, м; δ – показатель, используемый в степенном законе изменения скорости ветра с ростом высоты; C_0, C – концентрации вредных веществ соответственно максимальная на оси облака и соответствующая конкретной его высоте, кг/м³.

Как показывает анализ выражений (9.30) сложнее всего рассчитать эффективную высоту h_{eff} введенную для согласования теорий с экспериментом, поскольку точное значение этого параметра может быть определено лишь численным моделированием. Из его результатов, например, следует, что для рассеяния тяжелых газов при классе устойчивости атмосферы F данная высота изменяется в пределах [2...8] м. Поэтому в приближенных расчетах можно руководствоваться этим интервалом при условии, что меньшие значения h_{eff} должны соответствовать более тяжелым газам.

Учитывая громоздкость определения дисперсии $\sigma_{(i)}^2(u, t)$ и коэффициентов турбулентного обмена $K_{(i)}(u, t)$, укажем способ их *приближенной* оценки, основанный на аппроксимации зависимостей Смита-Хоскера. При известных устойчивости атмосферы и шероховатости местности авторы [13] предлагают рассчитывать значения этих коэффициентов как функцию одного параметра: а) расстояние x (м) между конкретной точкой пространства и источником выбросов – для $\sigma_{(i)}$, б) скорость ветра V (м/с) в приземном слое – для K_i .

$$K_x = K_y = \psi_{1,2} V; K_z = \psi_3 V; \sigma_i = a_i x (l + b_i x)^{c_i}, \quad (9.31)$$

где ψ_1, ψ_2, ψ_3 и a_i, b_i, c_i – константы, приведенные соответственно в табл. П.4.8 и П.4.9.

Сопоставление результатов оценки коэффициентов турбулентной диффузии K_i , полученных с помощью ψ_i и χ (см. табл. П.4.8), указывает на их удовлетворительное согласие, особенно для условий сельской местности. Это свидетельствует о возможности применения данного способа оценки K_i ; для

моделирования турбулентного рассеяния вредного вещества из приземных источников в открытой местности. Достигнутая при этом погрешность не превышает ту, которая обеспечивается официальными методиками.

Что касается области *предпочтительного* использования различных способов определения дисперсии и коэффициентов турбулентного обмена, то уместно руководствоваться такими обобщенными рекомендациями.

1. При прогнозировании полей концентрации с помощью моделей гауссова типа для получения некоторого усредненного результата целесообразно пользоваться разными зависимостями, отдавая предпочтение:

а) формулам (8.19)-(8.20) – для оценки дисперсии в направлениях, параллельных подстилающей поверхности, т. е. $\sigma_x(u_x t)\sigma_y(u_y t)$, имея в виду, что $u_x t = x$;

б) выражению (9.26) - для дисперсии в вертикальном направлении – $\sigma_z(u_z t)$, полагая, что $u_z t = x$.

2. Наибольшая достоверность при применении этих зависимостей достигается на удалении от 0,1 до 10 км от источника выбросов, тогда как при малых расстояниях следует находить значения данных дисперсий путем линейной интерполяции в диапазоне их значений от $x = 0$ до $x = 100$ м.

3. Для приближенных расчетов *можно* применять степенные зависимости типа (8.18) или соотношения (8.56) как наиболее простые, а для особо точных – трехстепенную модификацию формул (8.18) [13] с учетом поправок на время осреднения и использования машинных алгоритмов расчета по ним.

4. Определение же коэффициентов турбулентного обмена по громоздким формулам (9.27) – (9.30) нужно совмещать с процедурой численного моделирования либо а) включать их в состав интегральных выражений типа (8.5)-(8.8) или б) находить приближенные значения $K_i(u_i t)$ с помощью $\sigma_i(u_i t)$ – путем пересчета по соотношению: $2K_i = \sigma_i^2(u_i t)$, для $K = \text{const}$.

На этом ограничимся в рассмотрении порядка оценки параметров рассеяния вредных выбросов в установившемся режиме и обратим внимание на особенности определения $K_i(u_i t)$ и $\sigma_i(u_i t)$ для *нестационарного* поля концентрации. Сразу отметим, что и в данной ситуации может быть использован опыт, накопленный для газо- и мелкодисперсионных выбросов из непрерывно действующего точечного источника. При этом для перехода к новым условиям следует вводить какие-либо поправочные коэффициенты в рассмотренные выше дисперсионные зависимости.

Чаще всего это рекомендуется делать с формулами (8.19) – (8.20) и (9.26), где необходимо либо только провести замену аргумента x_i на $(u_i t)$ и вдвое уменьшить дисперсию $\sigma_i(u_i t)$ либо дополнительно откорректировать степенные зависимости (8.18). В последнем случае эти соотношения принимают такой вид:

$$\sigma_x(u_x t) = 0,13 (u_x t); \sigma_y(u_x t) = a (u_x t)^b / 2; \sigma_z(u_x t) = c (u_x t)^d, \quad (9.32)$$

где a , b , c и d - параметры, определяемые с помощью табл. П.4.3.

Контрольные вопросы

1. Каким требованиям к составу входных и выходных данных должны удовлетворять модели, предназначенные для исследования процессов истечения и распространения потоков энергии и вредного вещества?
2. Перечислите известные вам признаки классификации таких моделей.
3. Укажите типичные недостатки ныне действующих нормативных методик прогноза параметров истечения и распространения вредных выбросов.
4. Какие типовые сценарии обычно рассматриваются при прогнозе количества аварийно высвободившегося вещества?
5. В чем состоит основная особенность высвобождения и распространения потоков большинства видов энергии?
6. Каковы ограничения на оценку параметров взрыва с помощью параметрической формулы М. Садовского?
7. Что означает аббревиатура *BLEVE* и для каких выбросов она применима?
8. Дайте определение понятиям «клуб облака» и «пятно загрязнения».
9. Какими объемными и плоскими фигурами они чаще всего аппроксимируются?
10. С помощью каких поверхностей и кривых могут прогнозироваться очертания или контуры облака и пятна?
11. Какие практически важные задачи могут быть решены с помощью соответствующих математических соотношений?
12. Поясните динамику и физику процессов, связанных с зарождением и исчезновением клуба облака и пятна загрязнения.
13. В чем состоит основное достоинство применения для моделирования и системного анализа распространения вредных выбросов параметрических моделей гауссова типа?
14. Каково соотношение между применяемыми в них коэффициентами дисперсионного и турбулентного обмена?
15. Что означает термин «эрфик-функция» и где он используется?
16. Каким образом в гауссовых моделях могут быть учтены особенности геометрии источника выбросов и динамики его «работы»?
17. Укажите факторы, учитываемые при прогнозе коэффициентов дисперсионного и турбулентного обмена между вредным веществом и несущей его средой.
18. Сформулируйте условия наиболее предпочтительного определения и применения моделей гауссова типа.
19. В каких случаях целесообразно использовать многопараметрические модели рассеяния и точные зависимости для входящих в них коэффициентов?
20. Известны ли вам упрощенные способы оценки коэффициентов дисперсионного и турбулентного обмена?