

УДК 54.062: 666.94

**М.И. Десятова, аспирант,**

**А.П. Васютенко, доцент, канд. техн. наук,**

**В.В. Севриков, профессор, д-р техн. наук**

*Севастопольский национальный технический университет*

*Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053*

*E-mail: sntu-peot@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЕЁ ЗАПЫЛЁННОСТИ**

*Представлен анализ прогностических методов оценки запылённости воздушной среды, приведена методика лабораторного исследования запылённости воздуха и модель лабораторной установки с обоснованными параметрами камеры.*

**Ключевые слова:** цемент, пыль, объём, атмосферный воздух, лабораторная установка, приземная концентрация пыли.

### **Актуальность**

Вопросам исследования атмосферного воздуха в современном мире уделяется достаточно большое внимание, так как качество воздуха является одним из важнейших показателей, влияющих на жизнь и здоровье людей. Качество воздуха также оказывает прямое и опосредованное влияние на большинство природных объектов. Этот показатель важен для многих производственных процессов и организационных мероприятий оздоровления воздушной среды.

Исследование параметров атмосферного воздуха в естественных условиях – важный процесс, позволяющий осуществлять непрерывный мониторинг с учетом всех внешних факторов. В этом случае нередко применяется пассивный эксперимент. Однако он не даёт возможности в сжатые сроки произвести исследования различных факторов, и управлять ими в нужный момент. Проведение пассивного эксперимента, как правило, требует большого количества времени на сбор большого объёма информационного материала и его статистическую обработку.

Активный лабораторный эксперимент позволяет не только наблюдать, но задавать необходимые условия, то есть совокупность факторов исследуемого процесса или системы. К тому же, активный эксперимент позволяет получить достоверную модель за достаточно небольшой промежуток времени, с небольшими затратами. Лабораторный эксперимент и успешно применяется в тех случаях, когда необходимо установить взаимосвязь между двумя величинами, одна из которых является неслучайной.

При проведении лабораторного эксперимента важнейшей частью подготовительных работ является определение параметров необходимых для проведения эксперимента. Планируя лабораторный эксперимент, целью которого является изучение влияния параметров атмосферного воздуха на определение конкретных зависимостей, которые будут переноситься на натуру, необходимо, в первую очередь, определить оптимальные габаритные размеры лабораторной установки, соблюдая принципы подобия модели и натуры.

При этом необходимо обеспечивать требуемую точности и руководствоваться минимизацией расходов при экспериментальных исследованиях.

### **Состояние изученности оценки запылённости воздуха, цель исследования**

Под концентрацией пыли понимается количественное соотношение дисперсной фазы и дисперсионной среды. По ее величине устанавливаются санитарные нормы содержания конкретной пыли, а также подбираются методы пылеулавливания и устройства, обеспечивающие уменьшение запыленности воздуха в производственных помещениях и во внешней среде.

В зависимости от применяемого метода измерения различают численную и массовую концентрации пыли. Счетная концентрация показывает, сколько частиц пыли содержится в единице объема воздуха (шт/м<sup>3</sup>). В общем случае под этим понимают концентрацию частиц пыли независимо от их формы, размера и химического состава. Для характеристики чистоты воздуха обычно применяют термин «запыленность воздуха», под которым подразумевается массовая концентрация пыли (г или мг на 1 м<sup>3</sup> воздуха при нормальных условиях).

Измерение концентрации пыли является трудной метрологической задачей, так как пыль представляет собой сложную систему, которую нельзя описать с достаточной степенью точности одним или двумя параметрами. Пыль всегда является полидисперсной, т.е. характеризуется более или менее широким спектром размеров частиц (от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>2</sup> мкм). Концентрация пыли может колебаться от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>5</sup> мг/м<sup>3</sup>. Кроме того, происхождение, форма, физико-химические и механические свойства частиц пыли могут быть очень разнообразными. Частицы пыли, находясь во взвешенном состоянии в воздушной

среде, подвержены воздействию силы тяжести, аэродинамическому сопротивлению, электрическим силам и силам трения, силам адгезии, коагуляции, влиянию температуры и влажности воздуха, действию воздушных потоков, вследствие чего они коагулируются, оседают на поверхностях, что приводит к изменению концентрации пыли в пространстве и времени. Имеются расчетные методы оценки концентрации пыли в приземном слое воздуха, поступающей от различных источников. При прогнозной оценке с целью регулирования поступления загрязняющих веществ в атмосферный воздух наиболее распространены три метода.

#### **Прогностические уравнения Г.И. Марчука**

При рассмотрении процессов загрязнения атмосферного воздуха Г.И. Марчуком вводится ряд постулатов и допущений. Загрязняющие вещества (лёгкие и тяжелые) осаждаются на поверхности почвы, причём тяжелые – опускаются под действием силы тяжести, в соответствии с законом Стокса. Перенос загрязняющих веществ вдоль траектории пространства с координатами  $X, Y, Z$  во времени движения  $t$  при сохранении их концентрации описывается многомерным уравнением

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi(x, y, z)$  – концентрация загрязняющих веществ, мигрирующих вместе с потоком воздуха в атмосфере.

В общем виде задача прогноза загрязнения воздуха математически описывается дифференциальным уравнением [2]

$$u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \omega \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \text{div} \bar{u} \cdot \varphi. \quad (2)$$

Решение уравнения производится в цилиндрической области  $G$  с поверхностью  $S$ , состоящей из боковой поверхности цилиндра  $\Sigma$  нижнего основания  $\Sigma_0$  (при  $z=0$ ) и верхнего основания  $\Sigma_n$  (при  $z=H$ ), а также с введением оператора частиц  $\text{div} \bar{u}(x, y, z)$ .

Г.И. Марчуком получены дифференциальные уравнения: распределение лёгких загрязняющих веществ, при отсутствии ветра; распределение лёгких загрязняющих веществ, при наличии потока воздушных масс (скорости ветра постоянна и положительна); распределение лёгких загрязняющих веществ, при ветре в сторону положительных значений  $x$  ( $u > 0$ ), и заменил его на противоположное направление; переноса и диффузии для тяжелых загрязняющих веществ.

Данные уравнения громоздки труднорешаемы при практических оценках загрязнения воздушной среды, результаты оценок недостаточно достоверны по причине принятых допущений, упрощающих фактическое состояние воздушной среды и метеорологических условий. Однако они имеют неоспоримое теоретическое значение.

#### **Прогностические уравнения М.Е. Берлянда**

Принимаемые постулаты, согласно [1] лёгкие загрязнители не опускаются на поверхность почвы, а находятся во взвешенном состоянии. Тяжелые примеси опускаются на поверхность в соответствии с законом Стокса. При формулировке исходных уравнений, описывающих процесс распространения загрязняющих веществ в атмосфере и изменение их концентраций во времени используется возможность отделения пульсации от средних значений концентрации загрязнителя. Это позволяет с помощью известных приёмов осреднения перейти от диффузии для мгновенных значений концентрации к уравнению их средних значений.

В общем виде задача прогноза загрязнения воздуха математически описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum u_i \cdot \frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot k_i \cdot \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q, \quad (3)$$

где  $u_i$  – составляющая средней скорости перемещения загрязняющего вещества;  $k_i$  – составляющая коэффициента обмена;  $\alpha$  – коэффициент определяющий изменение концентраций за счет превращения примесей.

Полагая, что из практических соображений в (3) исключается  $\frac{\partial q}{\partial t}$ , положив его равным нулю.

Тогда, выражение (3) приводится к обычному, используемому на практике уравнению атмосферной диффузии

$$u \cdot \frac{\partial q}{\partial x} - \omega \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot k_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot k_y \frac{\partial q}{\partial y} - \alpha q, \quad (4)$$

где  $\omega$  – вертикальная средняя скорость перемещения загрязнителя по оси  $z$ ;  $u$  – горизонтальная средняя скорость перемещения загрязнителя по оси  $x$ ;  $k_z$  – вертикальная составляющая коэффициента обмена;  $k_y$  – горизонтальная составляющая коэффициента обмена.

Уравнение (3) в отдельных случаях упрощается: для лёгкой примеси (газы)  $\omega = 0$  и второй член уравнения в левой части исчезает; без изменения загрязнителя ( $\alpha = 0$ ) исключается последний член в правой части уравнения; но в условиях холмистого рельефа (на примере г. Севастополя), когда направление ветра негоризонтально и зависит от расстояния  $x$ , необходимо учитывать составляющую  $\frac{\partial}{\partial x} \cdot k_x \frac{\partial q}{\partial x}$ ; при распространении загрязнителя над водной поверхностью вода (поглощает загрязнитель)  $q = 0$  для  $z = 0$ ; примеси, попав на почву, не накапливаются, а с турбулентными вихрями снова уносятся в атмосферу. Поэтому средний турбулентный поток примеси мал и  $k_z \frac{\partial q}{\partial z} = 0$ , при  $z = 0$ .

Из уравнения (4) следует, что при фиксированных параметрах источника примеси изменение её концентрации над сушей определяется турбулентным обменом и скоростью ветра. В случае лёгкого сохраняющегося загрязняющего вещества характерной особенностью определения наземной концентрации является наличие её максимума  $q_m$  на расстоянии  $x_m$  от источника. Характер изменения концентрации с расстоянием  $x$  существенно зависит от уровня  $z$  – высоты, на которой определяется данная концентрация. С ростом  $z$  максимум  $q_m$  смещается к источнику. На уровне выброса примеси  $z = H$ , концентрация монотонно убывает с увеличением  $x$ . На более высоких уровнях снова наблюдается максимум  $q_m$  на расстоянии  $x_m$ . Таким образом, если известны скорости ветра, показатели устойчивости атмосферы и мощности выброса, то уравнение (4) является прогностическим для оценки загрязнения атмосферы.

Распределение тяжелого загрязняющего вещества в значительной степени зависит от собственной скорости осаждения, которая в свою очередь зависит от плотности и размеров частиц аэрозоля. В таком случае скорость падения сферических частиц определяется по формуле Стокса

$$\omega = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot p \cdot r_n^2, \quad (5)$$

где  $\omega$  – скорость падения см/с;  $p$  – плотность материала частиц, г/см<sup>3</sup>,  $r_n$  – радиус частиц, мкм.

Прогноз концентрации тяжелых примесей в приземном слое воздуха от сравнительно невысоких источников определяется как для лёгких примесей.

Прогностическое уравнение М.Е. Берлянда доступны для практической реализации оценок загрязнения воздуха в приземном слое, хотя отягощено числовым рядом, что снижает его достоверность.

#### *Другие статистические уравнения прогноза*

На ряду с уравнением турбулентной диффузии, за рубежом широко используются формулы распределений концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, полученные на основе статистического анализа. В частности, Саттон предложил, концентрацию загрязнителя в точке с координатами  $x, y, z$  от одиночного источника выбросов, расположенного в начале координат, определять по следующему выражению [1]

$$C_{x,y,z} = P_x \cdot P_y \cdot P_z = P_x \cdot \frac{1}{\sigma_y \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot P_z \quad (6)$$

где  $P_x, P_y, P_z$  – функции, причем,  $P_x$  и  $P_z$  аналогичны  $P_y$ , но с координатами  $x$  и  $z$ ;  $\sigma_y^2$  – дисперсия распределения загрязняющих веществ в направлении  $y$ .

Экспериментальные работы Саттона, Камера, Стюарта, Пэсквилла, Смита, Хэя (США, Англия), Хогстрема (Швеция) позволили получить удобную в практических расчетах зависимость для расчета приземных концентраций загрязняющих веществ  $C_{x,y,z}$

$$C_{x,y,z} = \frac{M \cdot 10^3}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \vec{u}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (7)$$

где  $M$  – количество загрязняющего вещества, выбрасываемого из источника в единицу времени г/с;  $\vec{u}$  – средняя скорость ветра у верхнего среза дымовой трубы м/с;  $h$  – эффективная высота трубы м;  $\sigma_y^2$  –

дисперсия распределения загрязняющего вещества в направлении  $y$ ;  $\sigma_z^2$  – дисперсия распространения загрязняющих веществ в направлении  $z$ .

Эффективная высота трубы рассчитывается по формуле  $h = H + \frac{A \cdot Q^{0,25}}{u}$ , где  $H$  – реальная высота трубы, м;  $Q$  – теплопроизводительность источника, МВт;  $A$  – коэффициент ( $A = 100$  – для труб с высотой не менее 100 м;  $A = 1,5 \cdot H - 50$  – для труб высотой более 100 м).

Для шести классов устойчивости приземного слоя воздуха по Пэсквиллу (1 – сильная, 2 – умеренная, 3 – слабая неустойчивость, 4 – равновесная, слабая, 6 – умеренная устойчивость) Гиффорд построил специальный график для определения  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  [1], а также предложил формулы определения данных величин (уточнённые Бригсом), для расстояний  $x$  от 100 м до 10 км на ровной открытой местности [2].

Таким образом  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  можно найти из выражений:

$$\sigma_y = \frac{\alpha_y \cdot x}{\sqrt{1 + 10^{-4} \cdot x}}; \quad \sigma_z = \frac{\alpha_z \cdot x}{S_z(x)},$$

где  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$ ,  $S_z(x)$  – коэффициенты, значение которых принимается из таблицы.

### Практическая методика ОНД-86

При изучении вопросов прогнозирования загрязнения атмосферы было выявлено, что наибольшее распространение получил метод М.Е Берлянда [1], который оформлен под руководством М.Е. Берлянда в виде нормативного документа ОНД-86 [3]. В разработке данного документа принимали участие видные ученые под эгидой Госгидрометео России. В нём также позаимствованы полезные приёмы оценки приземных концентраций загрязняющих веществ зарубежных, вышеприведённых исследователей. Данный документ используется при проектировании новых предприятий, а также при нормировании выбросов в атмосферу проектируемых и действующих предприятий.

При расчете концентраций загрязняющего вещества в приземном слое воздуха по методике ОНД-86 основным является выражение

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (8)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации, атмосферы;  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;  $m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;  $H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м (для наземных источников при расчетах принимается  $H = 2$  м);  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ ;  $\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_r$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$ , °С;  $V_1$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с.

Определение значений параметров входящих в выражение (8) в доступной форме изложено в методике ОНД-86. Однако в ряде случаев эти значения усреднены, в то время как они имеют непрерывный функциональный характер изменения, или вообще неучтено влияние некоторых параметров на концентрацию загрязняющих веществ некоторых факторов.

Одной из важнейших характеристик атмосферного воздуха является его влажность. Данная методика не учитывает эту характеристику, безусловно влияющую на процессы распространения и оседания пыли в атмосферном воздухе. Наличие водяных паров в воздухе способствует коагуляции их с взвешенными частицами и как следствие скорейшему их оседанию. Следовательно, концентрация вредного вещества есть функция  $C_m = f(\varphi)$ .

При исследовании запылённости воздуха немаловажную роль играет дисперсный состав пыли. Данная характеристика важна как с точки зрения санитарного состояния атмосферы, так и с точки зрения её возможной утилизации [4]. В ОНД-86 данная характеристика учитывается косвенно в величине расчетного значения скорости ветра, поскольку в зависимости от дисперсности пыли при одинаковой скорости ветра частицы будут оседать с различной скоростью. Этого по нашему мнению недостаточно, и необходимо прямо учитывать фракционный состав исследуемой пыли.

В выражении (8) такой наиважнейший показатель, как температурная стратификация атмосферы также принимается весьма приблизительно. Так, для таких территорий как Украина, Казахстан, Сибирь,

Молдавія, Дальній восток Росії определено одно общее значение показателя уровня стратификации  $A = 200$  единиц. На наш взгляд этот параметр не является достаточно достоверным, а следовательно, требует уточнения.

Эти корректировки получить аналитическим (расчетным) путём весьма затруднительно. Выявление зависимостей между концентрациями и влажностью воздуха, дисперсностью пыли и скоростью оседания пылевых частиц возможно путём проведения активного лабораторного эксперимента. Для чего необходимо моделировать различные атмосферные условия в лабораторной установке, геометрические размеры которой должны обеспечивать достоверность результатов исследования.

*Целью данной работы является определение оптимального объёма камеры экспериментальной установки для воссоздания реальных метеорологических условий и оценки их на запылённости воздушной среды.*

### Предлагаемая методика исследования

При исследовании запылённости воздуха наиболее часто применяется весовой метод. Сущность данного метода состоит в отборе массы пыли из известного объёма запылённого воздуха с последующим взвешиванием. Отбор проб осуществляется протягиванием запылённого воздуха через фильтр, на котором оседают пылинки. Разница масс фильтра до отбора и после отбора пробы воздуха определяют общее количество пыли, содержащееся в данном объёме воздуха.

Недостатки метода: низкая производительность отбора проб в производственных условиях, необходимость учета скорости движения воздуха, его пульсации, точность результатов зависит от точности определения расхода и соответственно объёма пробы воздуха, качества фильтра и квалификации исследователя. Эти недостатки устраняются в лабораторных условиях при соблюдении чистоты эксперимента, и при наличии квалифицированного персонала. Авторами создана лабораторная установка, схема которой представлена на рисунке 1.

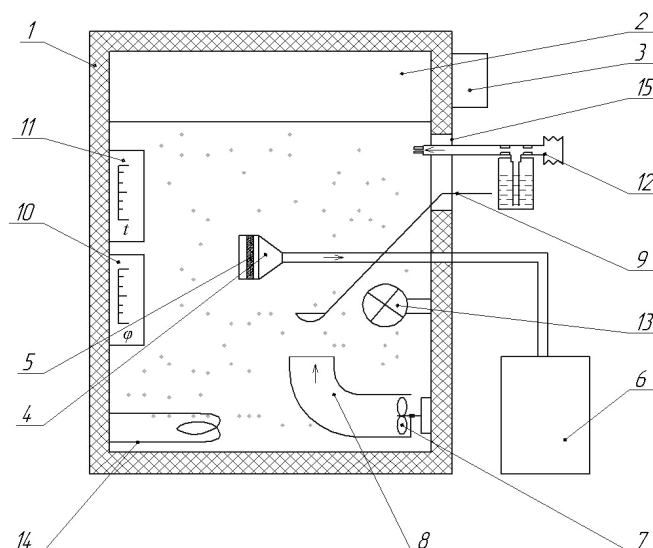


Рисунок 1 – Схема лабораторной экспериментальной установки для исследования запылённости:  
 1 – камера экспериментальной установки; 2 – хладогенератор с распределителем; 3 – блок управления;  
 4 – фильтрдержатель; 5 – фильтр; 6 – электрический пробоотборник; 7 – вентилятор (возбудитель пыли);  
 8 – диффузор направленного действия; 9 – устройство ввода навески; 10 – психрометр; 11 – термометр;  
 12 – увлажнитель воздуха; 13 – источник света; 14 – нагревательный элемент; 15 – смотровое окно.

Внутренняя полость корпуса камеры 1 экспериментальной установки заполнена термоизолирующим материалом. В верхней части камеры установлен хладогенератор 2 с регулятором температуры  $+20 \dots -5$  °С. В нижней части камеры расположен нагревательный элемент 14, позволяющий регулировать температуру воздуха в камере 1 в температурном режиме  $+25 \dots +50$  °С. С целью регулирования влажности воздуха в камере смонтирован пневматический увлажнитель 12 эжекторного типа. Температура и влажность воздуха в камере установки измеряется психрометром 10 и термометром 11, закреплёнными на задней стенке камеры. Для визуального наблюдения показаниями температуры и влажности служит смотровое окно 15. На передней панели камеры предусмотрен механизм 9 ввода навески. Для перемешивания её и создания в камере аэродисперсной смеси заданной концентрации пыли служит вентилятор 7 и диффузор направленного действия 8. После создания требуемых климатических условий и концентрации пыли в камере установки производится отбор проб воздуха из

камеры через фильтр 5. Фильтр 5 установлен в фильтродержатель 4, который закреплён к передней панели корпуса установки и по средствам шланга связан с побудителем расхода воздуха 6. Побудитель расхода снабжен расходомером и регулятором расхода воздуха в диапазонах 0,1...1,0 дм<sup>3</sup>/мин и 10...20 дм<sup>3</sup>/мин.

Даная установка позволяет моделировать условия загрязнения воздуха палевыми отходами цементного производства, регулировать относительную влажность и температуру в пылевоздушной камере. Точно дозируя количество пыли можно создать необходимую концентрацию запылённости. Пыль из дозатора потоком воздуха от вентилятора через диффузор распределяется по камере, запылённый воздух с изменёнными характеристиками влажности и температуры протягивается через фильтр. В качестве побудителя расхода воздуха используется электроаспиратор. Анализ известных фильтров позволил выбрать фильтры АФА-ВП, как наиболее подходящие по точности. В камере установки смонтирован термометр, психрометр и источник освещения, которые позволяют следить за экспериментом в динамике. Блок управления даёт возможность регулировать скорость движения воздуха и температуру в камере.

### Результаты исследований

При геометрическом моделировании условий запылённости воздуха основными параметрами экспериментальной установки, подлежащими обоснованию являются объём пылевоздушной камеры и объём отбираемой пробы, исходя из требования необходимой точности измерения. Для этого приняты ниже следующие данные и условия.

1. *Исходные данные* для расчета объёма камеры  $V_k$  установки: концентрация пыли в воздухе  $C = 6$  мг/м<sup>3</sup> (ПДК цементной пыли в атмосферном воздухе по ГОСТ 12.1.005 верхний предел запылённости не лимитирован); абсолютная погрешность измерения массы навески пыли на фильтре  $\Delta m = 1$  мг.

2. *Определение массы навески пыли и объёма пробы*

Если принять соотношение между погрешностью измерения массы навески пыли на фильтре  $\Delta m$  (на аналитических весах) и минимальной массой пыли на фильтре  $m_{\min}$   $\Delta m = 0,3 m_{\min}$ , исходя из опыта, величина навески составит

$$m_{\min} = \frac{\Delta m}{0,3} = \frac{1}{0,3} = 3,3 \text{ мг} . \quad (9)$$

Объём отобранной из камеры экспериментальной установки пробы воздуха при первоначальной концентрации пыли  $C$  (например,  $C = 6$  мг/м<sup>3</sup>) будет равен

$$V_{n\min} = \frac{m_{\min}}{C} = \frac{3,3}{6} = 0,55 \text{ м}^3.$$

3. *Определение объёма камеры*

В процессе отбора пробы воздуха и заполнения камеры чистым воздухом (для исключения её вакуумирования) концентрация пыли  $C_i$  в ней будет уменьшаться

$$C_i = \frac{V_c \cdot C}{V_k} , \quad (10)$$

где  $V_c = V_k - V_n$  – объём воздуха в камере установки с заданной концентрацией  $C$  (например,  $C = 6$  мг/м<sup>3</sup>);  $V_n$  – объём отобранного воздуха.

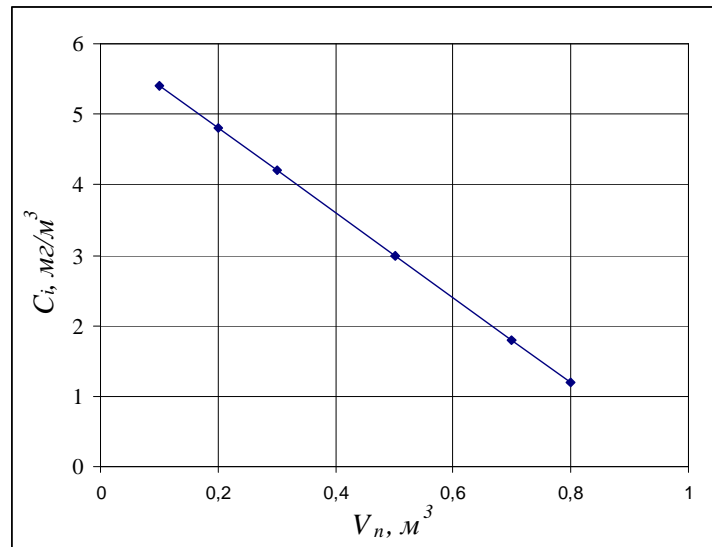
Подставив в (10) значение  $V_c$ , получим

$$C_i = \left( \frac{V_k - V_n}{V_k} \right) \cdot C = \left( 1 - \frac{V_n}{V_k} \right) \cdot C . \quad (11)$$

В таблице 1 и на рисунке 2 показаны значения  $C_i$  при различных объёмах пробы воздуха  $V_n$  для камеры объёмом  $V_k = 1 \text{ м}^3$  при номинальной концентрации пыли в воздухе  $C = 6$  мг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1 – Значения концентрации пыли в воздухе камеры,  $C_i$

|                       |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $V_n, \text{ м}^3$    | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 |
| $C_i, \text{ мг/м}^3$ | 5,4 | 4,8 | 4,2 | 3,0 | 1,8 | 1,2 |

Рисунок 1 – Залежність  $C_i = f(V_n)$ 

Если ограничить допустимое отклонение  $\Delta_C$  действительной концентрации пыли в воздухе камеры от номинального значения  $C$  не более чем на 10% (для данного вида измерений это довольно жесткие и допустимые условия), то

$$\Delta_C = 0,1C. \quad (12)$$

Тогда согласно (12) минимально допустимая концентрация пыли в воздухе камеры составит

$$C_{i_{\min}} = C - \Delta_C = C - 0,1C = 0,9C. \quad (13)$$

Подставив (13) в выражение (11), имеем  $0,9C = \left(1 - \frac{V_n}{V_K}\right) \cdot C$ .

После преобразования полученного выражения для определения объема камеры  $V_K$  в зависимости от отбираемого объема пробы воздуха  $V_n$  при условии, что изменение концентрации пыли в воздухе камеры не превысит величину  $\Delta_C = 0,1C$ , имеем

$$V_K = 10 \cdot V_n. \quad (14)$$

Следовательно, при заданных исходных данных  $C = 6 \text{ мг/м}^3$ ;  $\Delta m = 1 \text{ мг}$  и минимальном расчетном объеме пробы  $V_{n_{\min}} = 0,55 \text{ м}^3$  требуемый объем камеры  $V_K$  составит  $V_K = 10 \cdot V_n = 10 \cdot 0,55 = 5,5 \text{ м}^3$ .

#### 4. Методика отборы пробы воздуха

С целью уменьшения габаритных размеров камеры и массы навески пыли  $m_n$ , необходимой для создания требуемой концентрации  $C$  пыли в воздухе, снижения энергетических затрат на её перемешивание, упрощение и сокращение во времени процедур регулирования метеорологических параметров (температура, влажность воздуха), в методике пробоотбора следует предусмотреть последовательный циклический отбор заданного объема воздуха  $V_n$  за несколько циклов. В этом случае

$$V_n = V'_n \cdot n, \quad (15)$$

где  $V'_n$  – объем пробы воздуха, отбираемый за один цикл;  $n$  – число циклов.

Методикой предусмотрены следующие операции: вентилирование камеры установки после выполнения первого цикла пробоотбора; создание в камере требуемой температуры и влажности воздуха; ввод в камеру дозированной навески пыли для создания заданной концентрации  $C$ .

При циклическом методе отбора пробы отбираемой за один цикл  $V'_n$  определится из выражения (13) при известном объеме камеры  $V_K$ ,

$$V'_n = 0,1V_K. \quad (16)$$

Например, при объеме камеры  $V_K = 1 \text{ м}^3$  объем пробы воздуха, отбираемой за один цикл составит  $V'_n = 0,1 \text{ м}^3$ , число циклов пробоотбора из (15)

$$n = \frac{V_{n_{\min}}}{V'_n} = \frac{0,55}{0,1} = 6, \text{ а объём пробы воздуха } V_n > V_{n_{\min}} = 0,6 \text{ м}^3.$$

В таблице 2 приведены значения  $V'_n$  и  $n$  при различных объёмах камеры  $V_k$  экспериментальной установки.

Таблица 2 – Значения объёмов проб, отбираемых за один цикл и число циклов

|                     |      |      |      |      |     |
|---------------------|------|------|------|------|-----|
| $V_k, \text{ м}^3$  | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,5  | 1,0 |
| $V'_n, \text{ м}^3$ | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,1 |
| $n$                 | 55   | 28   | 19   | 11   | 6   |
| $V_n, \text{ м}^3$  | 0,55 | 0,56 | 0,57 | 0,55 | 0,6 |

Анализ данных таблицы 2 показывает, что оптимальным с точки зрения соотношения размеров камеры экспериментальной установки и числа циклов пробоотбора является объём камеры  $V_k = 0,5 \text{ м}^3$ . При этом линейные размеры камеры составляют  $1 \times 1 \times 0,5 \text{ м}$ .

Дозированная навеска для создания концентрации в камере  $C = 6 \text{ мг/м}^3$  составляет

$$m_n = C \cdot V_k = 6 \cdot 0,5 = 3,0 \text{ мг}.$$

Однако согласно (9) минимальная масса пыли с учетом погрешности её измерения на аналитических весах составляет 3,3 мг. Поэтому для обеспечения требуемой точности дозирования пыли объём камеры  $V_k$  установки должен быть увеличен:

$$V_k = \frac{m_{n_{\min}}}{C} = \frac{3,3}{6} = 0,55 \text{ м}^3.$$

При объёме камеры  $V_k = 0,55 \text{ м}^3$  объём пробы воздуха  $V'_n$  с учетом ограничения  $\Delta_C$  действительной концентрации пыли в камере от номинальной (16) составляет

$$V'_n = 0,1 \cdot V_k = 0,1 \cdot 0,55 = 0,055 \text{ м}^3.$$

$$\text{Число циклов пробоотбора } n = \frac{V_{n_{\min}}}{V'_n} = \frac{0,55}{0,055} = 10.$$

Таким образом, обоснованные параметры пробоотбора и размеры камеры экспериментальной установки составляют: объём пробы воздуха, отбираемый за один цикл  $V'_n = 0,055 \text{ м}^3$ ; число циклов пробоотбора  $n = 10$ ; общий объём пробы воздуха  $V_n = 0,55 \text{ м}^3$ ; габаритные размеры камеры  $a \times b \times h = 1 \times 1 \times 0,55 \text{ м}$ .

### Выводы

1. Созданная экспериментальная лабораторная установка позволяет воссоздавать метеорологические параметры в широком диапазоне, соответствующие реальным условиям приморского региона, провести исследования по определению зависимостей запылённости атмосферного воздуха от температуры и влажности воздуха, уточняющие прогностические расчетные выражения концентрации пыли в приземном слое атмосферы и в частности, методики ОНД-86.

2. Обоснованные параметры экспериментальной установки создают возможность проведения измерений запылённости воздуха с необходимой точностью и достоверностью результатов.

Перспективой дальнейших исследований является воплощение экспериментальной установки и методики в проведение эксперимента по определению зависимостей скорости оседания пыли от влажности воздуха и её дисперсности при наличии цементных производств и других источников.

### Библиографический список использованной литературы

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирования загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 272 с.
2. Корчмит Ю.В. Загрязнение природной среды города Севастополя: справочное пособие. Ч. 1. / Ю.В. Корчмит, А.А. Леонов. — Севастополь, 2009. — 179 с.
3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Общесоюзный нормативный документ ОНД-86. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 67 с.



4. Коломеец М.И. Исследование дисперсного состава пыли цементных производств / М.И. Коломеец // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 102. — С. 197–202.

*Поступила в редакцию 11.01.2012 г.*

**Десятова М.І., Севріков В.В., Васютенко О.П. Моделювання умов стану повітряного середовища з метою кількісної оцінки її запиленості**

Показан анализ прогностичних методів оцінки запиленості повітряного середовища, наведен метод лабораторного дослідження запиленості повітря та модель лабораторної установки параметри якої були обґрунтовані.

**Ключові слова:** цемент, пил, об'єм, атмосферне повітря, лабораторна установка, приземна концентрація пилу.

**Desyatova M.I., Sevrikov V.V., Vasyutenko A.P. The modeling of the air state conditions for the quantitative evaluation dustiness of atmosphere**

The analysis of the forecasting estimation methods of the dustiness of air is presented, the laboratory research methodology of the dustiness of air and laboratory facility model with characteristic which was grounded is produced.

**Keywords:** cement, dust, volume, atmosphere air, laboratory facility, surface dust concentration.