

О решении основного уравнения воздухообмена относительно расхода воздуха

Инж. А. Ф. МАУРЕР

Одной из основных задач расчетов процессов вентиляции является определение величины расхода вентиляционного воздуха.

Известные в литературе [1, 2] формулы по определению расхода вентиляционного воздуха устанавливают этот расход, исходя из основного уравнения воздухообмена.

Основное дифференциальное уравнение воздухообмена, составленное проф. А. Н. Селиверстовым в 1932 г. [3] и решенное им относительно концентрации вредности, имеет вид:

$$y_2 = \frac{Q y_0 + G_b}{Q} \left(1 - e^{-z \frac{Q}{V}} \right) + y_1 e^{-z \frac{Q}{V}}, \quad (1)$$

где Q — расход вентиляционного воздуха в $m^3/ч$;
 y_1 — концентрация вредности в помещении до начала вентиляции (начальная концентрация) в $л/m^3$ и $г/m^3$;

y_0 — концентрация вредности в приточном вентиляционном воздухе в $л/m^3$ и $г/m^3$;

G_b — количество выделяемых вредностей в вентилируемом помещении в единицу времени в $л/ч$ и $г/ч$;

V — объем вентилируемого помещения в m^3 ;

z — время в $ч$;

y_2 — конечная концентрация вредности после вентиляции помещения в течение периода времени z в $л/m^3$ или $г/m^3$.

Однако в большинстве случаев в расчетах вентиляции необходимо определять не концентрацию y_2 , которая обычно бывает заданной как допустимая, а величину Q расхода вентиляционного воздуха.

Но так как величина расхода Q методами алгебры из уравнения (1) получена быть не может (так как оно трансцендентное), то для определения расхода вентиляционного воздуха Q используются две приближенные формулы [1; 2]:

формула им. М. И. Плетнева

$$Q = \frac{G_b}{y_2 - y_0} - \frac{V}{z} \cdot \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_0} \quad m^3/ч \quad (2)$$

и формула проф. В. М. Чаплина

$$Q = \frac{G_b}{y_2 - y_0} - \frac{V}{2z} \cdot \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_0} \quad m^3/ч. \quad (3)$$

Считается, что формула инж. М. И. Плетнева дает несколько увеличенные, а формула проф. В. М. Чаплина несколько заниженные величины против истинного расхода вентиляционного воздуха, определяемого формулой (1).

Таким образом, вопрос определения расхода вентиляционного воздуха как будто решен.

Однако формулы (2) и (3) во многих практических расчетах дают настолько большие погрешности, что не могут удовлетворить самим приближен-

ным требованиям практики и, следовательно, определение расхода вентиляционного воздуха остается открытым.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы дать приемлемые для практики методы определения расхода вентиляционного воздуха для всех случаев вентиляции, описываемых уравнением (1).

Предварительно покажем на практическом примере погрешности формул (2) и (3).

Пусть необходимо определить расход вентиляционного воздуха Q , подаваемого в течение часа в помещение объемом 100 m^3 , если концентрацию двуокиси углерода в этом помещении, составлявшую 4% перед началом вентиляции, необходимо снизить до 0,2% по объему в течение часа, причем в процессе вентиляции в помещении находятся два человека, которые выделяют по 30 л двуокиси углерода в час, а вентиляционный воздух, поступающий в помещение, содержит 0,03% CO_2 по объему.

Для наших обозначений имеем следующие значения:

$$z = 1 \text{ ч}; V = 100 \text{ } m^3; y_1 = 40 \text{ } л/m^3 \text{ } CO_2; y_2 = 2 \text{ } л/m^3 \text{ } CO_2; G_b = 2 \cdot 30 = 60 \text{ } л/ч \text{ } CO_2; y_0 = 0,3 \text{ } л/m^3 \text{ } CO_2.$$

Тогда расход вентиляционного воздуха по формуле М. И. Плетнева составит:

$$Q_2 = \frac{G_b}{y_2 - y_0} - \frac{V}{z} \cdot \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_0} = \frac{G_b}{y_2 - y_0} + \frac{V}{z} \cdot \frac{y_1 - y_2}{y_2 - y_0} = \\ = \frac{60}{2 - 0,3} + \frac{100}{1} \cdot \frac{40 - 2}{2 - 0,3} = 2265 \text{ } m^3/ч,$$

а по формуле В. М. Чаплина:

$$Q_3 = \frac{G_b}{y_2 - y_0} - \frac{V}{2z} \cdot \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_0} = \frac{G_b}{y_2 - y_0} + \frac{V}{2z} \cdot \frac{y_1 - y_2}{y_2 - y_0} = \\ = \frac{60}{2 - 0,2} + \frac{100}{2 \cdot 1} \cdot \frac{40 - 2}{2 - 0,3} = 1150 \text{ } m^3/ч.$$

Отсюда видно, что значение расхода вентиляционного воздуха, полученное по формуле М. И. Плетнева, примерно в 2 раза более этого же значения, полученного по формуле В. М. Чаплина. Однако как первое, так и второе значения значительно отличаются от истинного и намного его пре- восходят.

Так, если $Q = 309 \text{ } m^3/ч$, то из выражения (1) имеем:

$$y_2 = \frac{309 \cdot 0,3 + 60}{310} \left(1 - e^{-\frac{310}{100}} \right) + 40 e^{-\frac{310}{100}} = \\ = 2,005 \text{ } л/m^3,$$

и, следовательно, истинный расход вентиляционного воздуха для данного примера можно считать равным $310 \text{ } m^3/ч$ ($Q_{ист} = 310 \text{ } m^3/ч$).

Тогда отклонение приближенного значения Q_n , полученного по формуле М. И. Плетнева, будет в $\frac{2260}{310} = 7,3$ раза более истинного, а по формуле

В. И. Чаплина в $\frac{1150}{310} = 3,72$ раза более истинного.

Это естественно, не может удовлетворить требованиям практики.

Для более точного определения расхода воздуха, чем по формулам (2) и (3), рассмотрим исходное дифференциальное уравнение воздухообмена (вентиляции).

Приняв такие же допущения, какие делаются при выводе выражения (1), т. е. предложив постоянство температур и равномерное перемешивание газовых потоков, составим баланс газовых потоков.

За бесконечно малый промежуток времени dz будем иметь:

$$Qy_0 dz + G_b \cdot dz - y Q \cdot dz = V dy. \quad (4)$$

Интегрируя это уравнение в пределах $z=0$, $z=z$ и $y=y_1$, $y=y$, получим:

$$z = \frac{V}{Q} \ln \frac{y_1 - y_0 - \frac{G_b}{Q}}{y_2 - y_0 - \frac{G_b}{Q}}. \quad (5)$$

Полученное уравнение вентиляции, разрешенное относительно времени z , так же, как и уравнение (1), включает в себя семь переменных, и оно также не может быть решено относительно расхода вентиляционного воздуха Q .

Однако имеется возможность составить обобщенное уравнение вентиляции, включающее в себя только три обобщенных переменных и допускающее как анализ всего процесса вентиляции в целом, так и определение величины Q .

Для составления такого уравнения обозначим обобщающие безразмерные отношения

$$\frac{y_2 - y_0}{y_1 - y} = \bar{k}; \quad \frac{z \cdot G_b}{V (y_1 - y_0)} = n \text{ и } \frac{G_b}{Q (y_1 - y_2)} = N$$

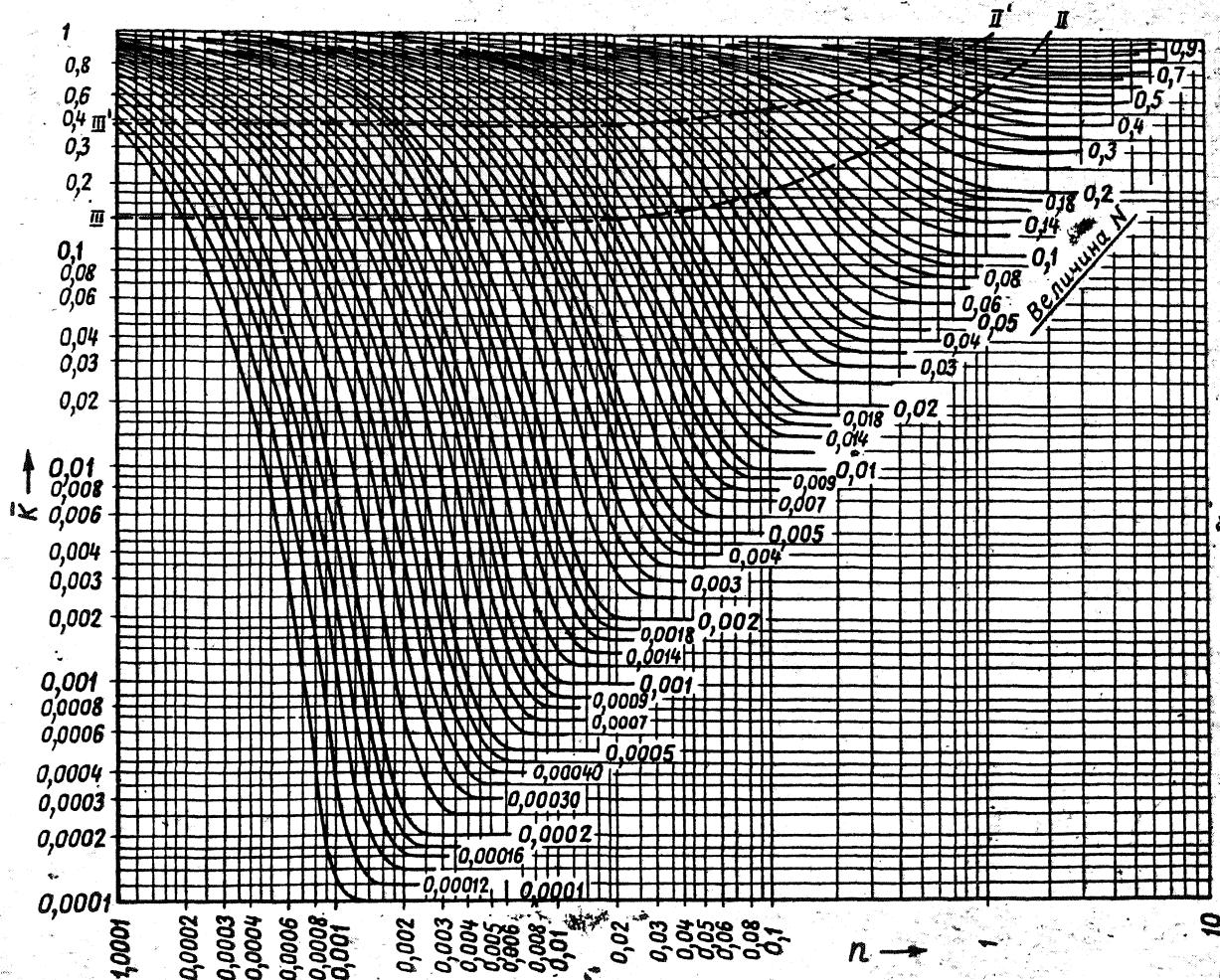
и после некоторых несложных преобразований выражения (5) и подстановки в него этих обозначений получим обобщенное уравнение вентиляции в логарифмической форме:

$$n = N \ln \frac{1 - N}{\bar{k} - N} \quad (6)$$

или после потенцирования уравнения (6) это же обобщенное уравнение в экспоненциальной форме будет иметь вид:

$$\bar{k} = N + (1 - N) e^{-\frac{n}{N}}. \quad (7)$$

Эти безразмерные выражения, содержащие всего три обобщенных параметра, описывают процесс вентиляции так же, как (5) и (1), но отличаются



тем, что значение расхода воздуха в этих уравнениях входит только в один параметр N и, кроме того, для данных обобщенных уравнений соблюдается условие $N < \bar{k} < 1$. Поэтому выражения (6) и (7) допускают построения как графиков, определяющих по значениям \bar{k} и n величину N , так и соответствующих таблиц.

Диаграмма, определяющая по $\bar{k} - n$ величину N из выражения (6), приведена на рисунке. По этой диаграмме, зная безразмерные величины \bar{k} и n , легко определить приближенное значение N_n , а затем из формулы

$$Q = \frac{G_b}{N_n (y_1 - y_0)} \quad (8)$$

найти значение расхода воздуха Q .

В качестве пояснения использования диаграммы $\bar{k} - n$ определим расход вентиляционного воздуха для приведенного выше примера.

Вычисляя безразмерные значения обобщенного выражения (6), имеем:

$$\bar{k} = \frac{2 - 0,3}{40 - 0,3} = \frac{1,7}{39,7} = 0,048;$$

$$n = \frac{1 \cdot 60}{100 (40 - 0,3)} = 0,0151.$$

Для этих значений из диаграммы $\bar{k} - n$ имеем $N_n = 0,0048$. Тогда по (8) получим:

$$Q = \frac{60}{0,0048 \cdot 39,7} = 314 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, видно что полученные значения достаточно близко подходят к истинной величине ($Q_{\text{ист}} = 310 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Определение N в районе сгущения кривых на диаграмме $\bar{k} - n$ (область I-II-III) производится по формуле:

$$N = \frac{A}{2B} + \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{C}{B}},$$

где $A = n(10\bar{k} + 7 - 4n)$, $B = 18 + 17n - 18\bar{k}$ и $C = n^2(5\bar{k} - 1)$ при погрешности в области $+1,5\%$. В области I-II'-III', применяя аппроксимацию

$e^{-\frac{n}{N}} = e^{-x} = \frac{x^2 - 6x + 12}{x^2 + 6x + 12}$ для интервала значений

$\frac{n}{N} \in [0,1]$, можно получить [4] аналитическую формулу:

$$N_n = \frac{n(1 + \bar{k})}{4(n + 1 - \bar{k})} \times \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4(n + 1 - \bar{k})(1 - \bar{k})}{3(1 + \bar{k})^2}} \right], \quad (9)$$

дающую значения N_n , отличающиеся от $N_{\text{ист}}$ в этом интервале не более чем на $0,8\%$. В заключение следует отметить, что помимо определения N диаграмма $\bar{k} - n$ дает возможность анализировать отдельные процессы без каких-либо сложных расчетов, например, определять, насколько далек процесс вентиляции от стабильного, насколько еще может быть снижена концентрация или сопоставлять отдельные процессы по значениям N .

Выводы

1. Точное определение расхода вентиляционного воздуха встречает затруднения. Формулы по определению расхода вентиляционного воздуха дают значительные погрешности.

2. Существующее основное уравнение воздухообмена в связи с наличием большого числа переменных не дает возможности строить диаграммы и таблицы.

3. Составлено обобщенное уравнение вентиляции, включающее в себя только три обобщенных параметра, которое дает возможность с достаточной точностью определять расход вентиляционного воздуха, а также анализировать процессы вентиляции в целом.

Ленинград

ЛИТЕРАТУРА

- Каменев П. Н. Отопление и вентиляция, ч. II. Стройиздат, М., 1966.
- Максимов Г. А. Отопление и вентиляция, ч. II. Стройиздат, М., 1955.
- Селиверстов А. Н. Вентиляция промышленных помещений. Госстройиздат, М., 1932.
- Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Государственное издательство физико-математической литературы, М., 1961.

УДК 631.2:697.93

Обоснование влажности вентилирующего воздуха в плодоовощехранилищах

Канд. техн. наук В. З. ЖАДАН

Высота слоя сырья в плодоовощехранилищах при активном вентилировании достигает 3-6 м. Наиболее благоприятной (оптимальной) будет такая относительная влажность приточного воздуха, которая не изменяется при движении воздуха в массе сырья (обычно снизу вверх) при хранении.

На основании известных аналитических зависи-

мостей между параметрами влажного воздуха автором получено следующее уравнение:

$$e_{\text{пр}} = \frac{1,62 \cdot 10^3 \Delta t + (B - A) 2,5 \cdot 10^6}{B - A}; \quad (1)$$

$$A = \frac{\varphi_1 P_{n_1}''}{P - \varphi_1 P_{n_1}''}; \quad B = \frac{\varphi_2 P_{n_2}''}{P - \varphi_2 P_{n_2}''},$$