ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УТЕЧЕК ВОЗДУХА НА ДЕПРЕССИЮ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Н. А. Хохлов

Для преодоления сопротивления воздухопровода при движении по нему воздуха необходимо на его концах создать разность давлений.

Как известно, при отсутствии утечек воздуха депрессия

$$h = RQ^2, \text{ мм вод. ст.}, \tag{1}$$

где R — аэродинамическое сопротивление выработки или трубопровода, $к\mu$;

Q — количество воздуха, проходящее по выработке или трубопроводу, $м^3/сек$.

При наличии утечек воздуха подсчет депрессии производится по среднеарифметическому количеству воздуха

$$h = R\left(\frac{Q_н + Q_к}{2}\right)^2; \tag{2}$$

по формуле В. Н. Воронина

$$h = RQ_нQ_к; \tag{3}$$

по формуле Г. Бриггса

$$h = R\,\frac{Q_н^2 + Q_нQ_к + Q_к^2}{3}; \tag{4}$$

по формуле А. Ф. Воропаева

$$h = R\eta Q_н^2, \tag{5}$$

где R — сопротивление воздухопровода, $k\mu$;

$Q_н$ и $Q_к$ — количество воздуха, проходящего соответственно в начале и конце воздухопровода, $м^3/сек$;

η — доставочный коэффициент,

$$\eta = \frac{Q_к}{Q_н} \tag{6}$$

Формулы А. Ф. Воропаева и В. Н. Воронина идентичны.

Результаты подсчета по формулам (2), (3), (4) различны. Таким образом, для подсчета депрессии в воздухопроницаемых трубопроводах нет единой общепринятой формулы.

Цель настоящей работы — определение экспериментальным путем депрессий и сравнение полученных результатов с величинами депрессий,

подсчитанными по указанным выше формулам при нагнетательном и всасывающем способах проветривания, и вывод формулы, которая давала бы наименьшее расхождение с фактическими величинами депрессий, а также изучение характера распределения утечек воздуха по длине трубопровода.

Методика исследования

Экспериментальная установка. Эксперименты проводились в деревянной трубе длиной 6 *м*, состоящей из трех звеньев (рис. 1). Сечение трубы квадратное, с размером сторон $l = 5$ *см*. Доски соединены на клею в шпунт. Для измерения скоростных напоров при определении количества воздуха, проходящего в трубе, в сечениях *I—I* и *II—II* обору-

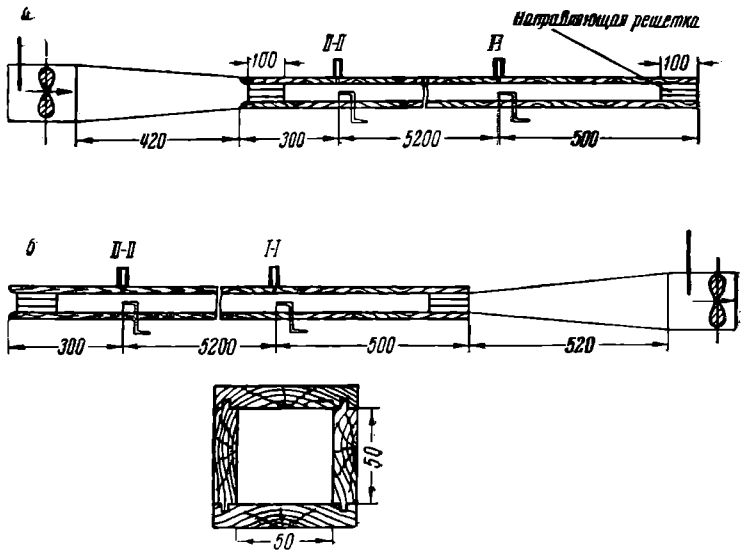


Рис. 1. Схема установки для проветривания:
а — нагнетательным способом; *б* — всасывающим способом

дованы две замерные станции (рис. 2) на расстоянии 5,2 *м* одна от другой, имеющие движок *а* специальной конструкции, допускающий установку воздухомерной трубки *б* полного напора (изготовленной из иглы медицинского шприца) в любой точке поперечного сечения трубы.

Передвижение воздухомерной трубки в горизонтальном направлении осуществлялось движком, на котором в специальном вырезе укреплена воздухомерная трубка, а в вертикальном направлении — по вырезу движка. Трубка закреплялась чекой, вставляемой в отверстие на пластинке, припаянной к игле. Расстояние между отверстиями строго определенное. Во избежание утечек воздуха плоскости прилегания движка и трубы смазывались вазелином.

В одной плоскости с концом воздухомерной трубы на трех других сторонах просверлены отверстия *в* диаметром 0,7 *мм* со штуцером *г* для измерения статического напора.

В 50 *мм* от движка неподвижно установлена контрольная трубка *д*, и в ее плоскости на трех других сторонах расположены статические отверстия *е* со штуцерами. Замерные станции отстоят от концов трубы на расстоянии 10 и 6 *l*.

В качестве механизмов, возбуждающих тягу воздуха в трубе, применялся центробежный вентилятор «Сирокко» № 2, Вентилятор соединяется с трубой переходными патрубками длиной 42 *см* при нагнетании и 52 *см* при всасывании.

Для создания спокойного потока воздуха на концах трубы установлены направляющие решетки из жести длиной 2*l*. Дебит вентилятора регулировался задвижкой, помещенной на всасе вентилятора.

Для создания учетек воздуха по периметру через каждые 30 *см* по длине трубы размещено 20 отверстий диаметром 1,8 *мм*, которые и моделировали неплотности в стенках труб.

Измерение расхода воздуха. Для определения количества воздуха, проходящего по трубе, производились измерения скоростного напора

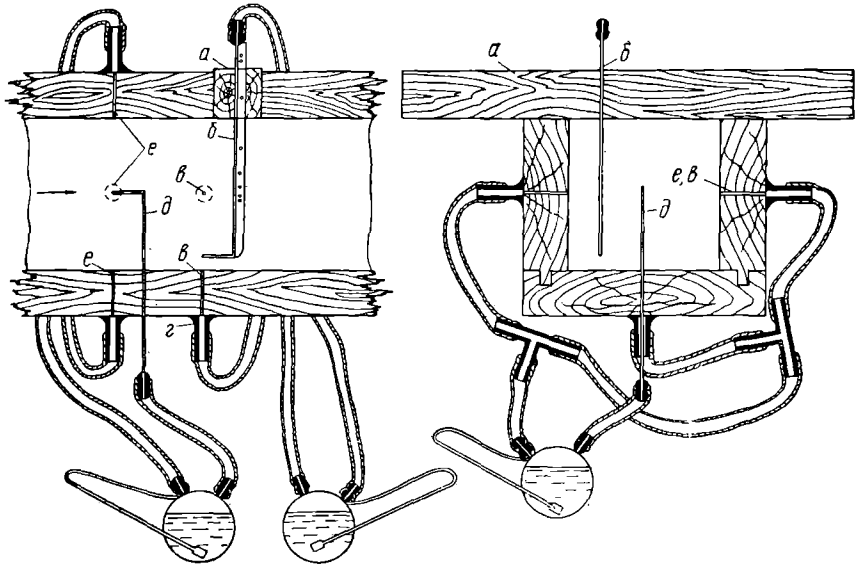


Рис. 2. Замерная станция:
а — движок; *б* — передвижная воздухомерная трубка; *в*, *е* — отверстия ($d = 0{,}7$ *мм*) для измерения $h_{ст}$; *г* — штуцер; *д* — контрольная воздухомерная трубка

в 64 точках сечения трубы, где было взято 8 рядов по 8 точек в каждом. При измерении скоростного напора $h_{ск}$ микроманометр соединялся с воздухомерной трубкой *б*, укрепленной на движке *а*, и тремя статическими отверстиями *в* (рис. 2). Одновременно скоростной напор определялся контрольной трубкой *д*.

Статический перепад измерялся подключением микроманометра (при помощи крестовины и резиновой трубки) только к статическим отверстиям с насадками. При гладких трубах этот способ применялся многими исследователями. Как известно,

$$h_{ск} = \frac{v^2\gamma}{2g}, \text{ мм вод. ст.} \tag{7}$$

откуда скорость в любой из точек

$$v = \sqrt{\frac{2gh_{ск}}{\gamma}}, \text{ м/сек}, \tag{8}$$

где γ — удельный вес воздуха, *кг/м*^{3}.

Удельный вес воздуха

$$\gamma = 0{,}461 \frac{P}{T+t},$$

где P — атмосферное давление, *мм* рт. ст.;
t — температура воздуха, град.;
T — абсолютная температура, равная 273° С.

По значениям скоростей v количество воздуха определялось методом графического интегрирования.

В дальнейшем количество воздуха, проходящее по трубе, рассчитывалось с помощью коэффициента расхода

$$K = \frac{v_к}{Q}, \tag{9}$$

выведенного на основании определенного способом графического интегрирования количества воздуха Q и скорости движения воздуха $v_к$ в контрольной точке, замеряемой контрольной трубкой, установленной неподвижно в сечении трубы,

$$Q = \frac{v_к}{K} \tag{10}$$

Коэффициент расхода определялся как при всасывании воздуха из трубы, так и при нагнетании. При этом контрольные трубки оставались те же. Воздух протягивался по трубе все время в одном направлении путем присоединения вентиляторов к различным концам трубы попеременно.

Определение коэффициента трения. Депрессия в воздухонепроницаемом воздухопроводе

$$h = \alpha \frac{LpQ^2}{S^3}, \; мм \text{ вод. ст.}, \tag{11}$$

где α — коэффициент трения;
L — длина замерного участка, *м*;
p и S — периметр и площадь поперечного сечения воздухопровода, *м* и $м^2$;
Q — количество воздуха, проходящее по воздухопроводу, $м^3/сек$.

Отсюда

$$\alpha = \frac{hS^3}{LpQ^2}, \; кг \; сек^2/м^4. \tag{12}$$

Перепад давления h между начальным и конечным сечениями замерного участка замерялся при помощи микроманометра, соединенного со статическими отверстиями в начале и конце замерного участка.

Из уравнения Д. Бернулли

$$P_1 + z_1\gamma_1 + k_1 \frac{v_1^2}{2g}\gamma_1 = P_2 + z_2\gamma_2 +$$

$$+ k_2 \frac{v_2^2}{2g}\gamma_2 + h_{сопр}, \tag{13}$$

где z — высотные отметки начального и конечного сечений относительно некоторой горизонтальной плоскости, принятой на плоскость сравнения.

Принимая во внимание, что модель трубы расположена горизонтально, удельные веса воздуха и средние скорости движения воздуха одинаковы, можно написать

$$P_1 + k_1 \frac{v^2}{2g}\gamma = P_2 + k_2 \frac{v^2}{2g}\gamma + h_{\text{сопр}}$$

или

$$h_{\text{сопр}} = P_1 - P_2 + \frac{v^2}{2g}\gamma\,(k_1 - k_2), \qquad (14)$$

где $h_{\text{сопр}}$ — перепад давления между начальным и конечным сечениями замерного участка;

$P_1 - P_2$ — перепад давления, создаваемый вентилятором и замеряемый микроманометром;

$\frac{v^2}{2g}\gamma\,(k_1 - k_2)$ — разность скоростных давлений на концах замерного участка с учетом коэффициентов неравномерности распределения скоростей в начальном k_1 и конечном k_2 сечениях.

Коэффициент неравномерности распределения скоростей

$$k = \frac{h_{\text{ск. ср}}}{h_{\text{ск. по } v_{\text{ср}}}}, \qquad (15)$$

где $h_{\text{ск. ср}}$ — средний скоростной напор в сечении трубы, определяемый методом графического интегрирования;

$h_{\text{ск. по } v_{\text{ср}}}$ — скоростной напор, определяемый по средней скорости движения воздуха в сечении трубы.

Перепад давления h между начальным и конечным сечениями при наличии утечек или притечек воздуха определится выражением

$$h = P_1 - P_2 + \frac{\gamma}{2g}(k_1 v_1^2 - k_2 v_2^2),\ мм \text{ вод. ст.} \qquad (16)$$

Определение утечек воздуха. Общие утечки воздуха определялись как разность количеств воздуха, проходящего в начальном и конечном сечениях трубы. Утечки воздуха через отверстия, воспроизводящие стыки труб, в натуре измерялись при помощи пневмометра, присоединяемого раструбом к стыкам. Места соединения раструба с трубой для устранения утечек промазывались пластилином. В этом случае общие утечки воздуха в трубопроводе равны сумме утечек через каждый стык.

Результаты работы

Коэффициент расхода воздуха К. Коэффициент расхода определялся при трех режимах. Для сечения *I—I* при всасывании для первого режима он равен 8,08, для второго 7,97 и для третьего 7,98. В дальнейшем для сечения *I — I* при всасывании принимался коэффициент 8,00 (см. рис. 1). Для сечения *II—II* при всасывании значения коэффициентов расхода равны соответственно 7,47; 7,37 и 7,38. Среднее значение коэффициента расхода 7,4.

При нагнетании для сечения *I—I* этот коэффициент равен 8,22, а для сечения *II—II* — 7,45.

Коэффициент неравномерности распределения скоростей κ при всасывании для сечения *I—I* равен 1,017, а для сечения *II—II* — 1,020; при нагнетании для сечения *I—I* он равен 1,040, для сечения *II—II* — 1,061.

Коэффициент α трубы. Коэффициент α определялся на участке трубы

длиной $L = 5{,}2$ *м*, поперечным сечением $S = 0{,}0025$ *м*^{2} и периметром $p = 0{,}2$ *м*.

С изменением чисел Рейнольдса от 17750 до 35500 коэффициент α трубы менялся от значений $\alpha \cdot 10^4 = 5{,}15$ до $\alpha \cdot 10^4 = 4{,}17$ при нагнетании и $\alpha \cdot 10^4 = 4{,}68$ до $\alpha \cdot 10^4 = 3{,}94$ при всасывании.

Как видно из рис. 3, при всасывании коэффициент α меньше, чем при нагнетании на 5,5—9% при одинаковых средних скоростях движения воздуха по трубе.

Депрессия трубы при наличии утечек воздуха. Перепад давления определялся из выражения (16). Для сравнения с замеренными перепадами давления подсчитаны депрессии трубы по формулам (2)—(4). Так

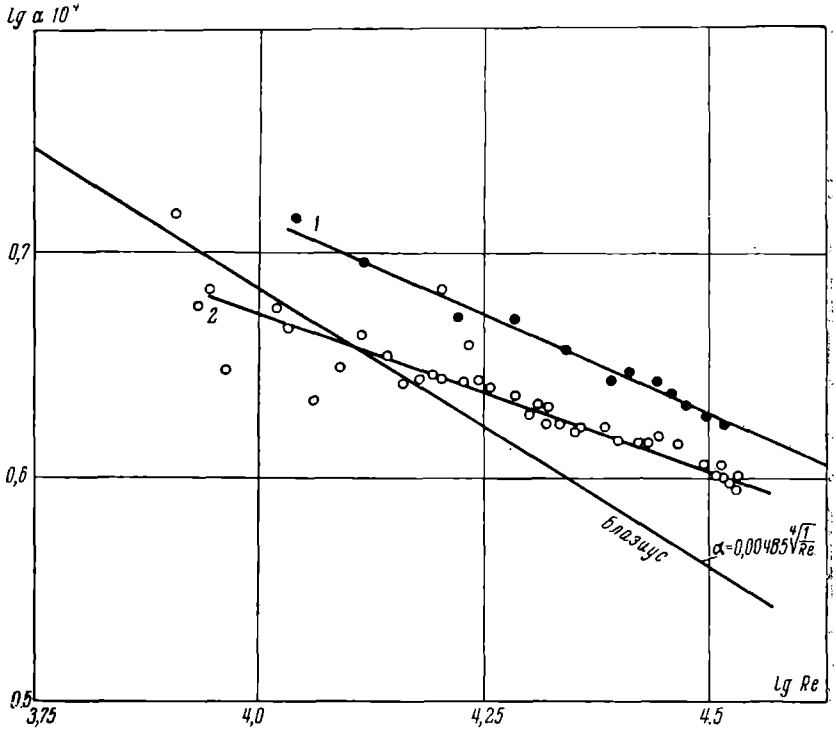


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от числа Re или v:
1 — нагнетание; *2* — всасывание

как с изменением чисел Рейнольдса значения коэффициента α различны, то при определении сопротивления воздухопроницаемого трубопровода R коэффициент α при одном и том же режиме брался в зависимости от количества воздуха, проходящего по трубе, соответственно подставляемого в формулы (2), (3), (4),

$$\frac{Q_н + Q_к}{2};\ \sqrt{Q_н Q_к}\ \text{и}\ \sqrt{\frac{Q_н^2 + Q_к Q_н + Q_к^2}{3}}.$$

Как видно из рис. 4, *а*, *б*, при всасывании замеренная депрессия больше величины депрессии, полученной расчетным путем на 10—25%, а при нагнетании замеренный напор меньше расчетного на 11—23%.

Распределение утечек воздуха по трубе. Распределение утечек воздуха через неплотности в стыках трубы по ее длине показаны в виде кривых на рис. 5, выражающих изменение доставочного коэффициента η

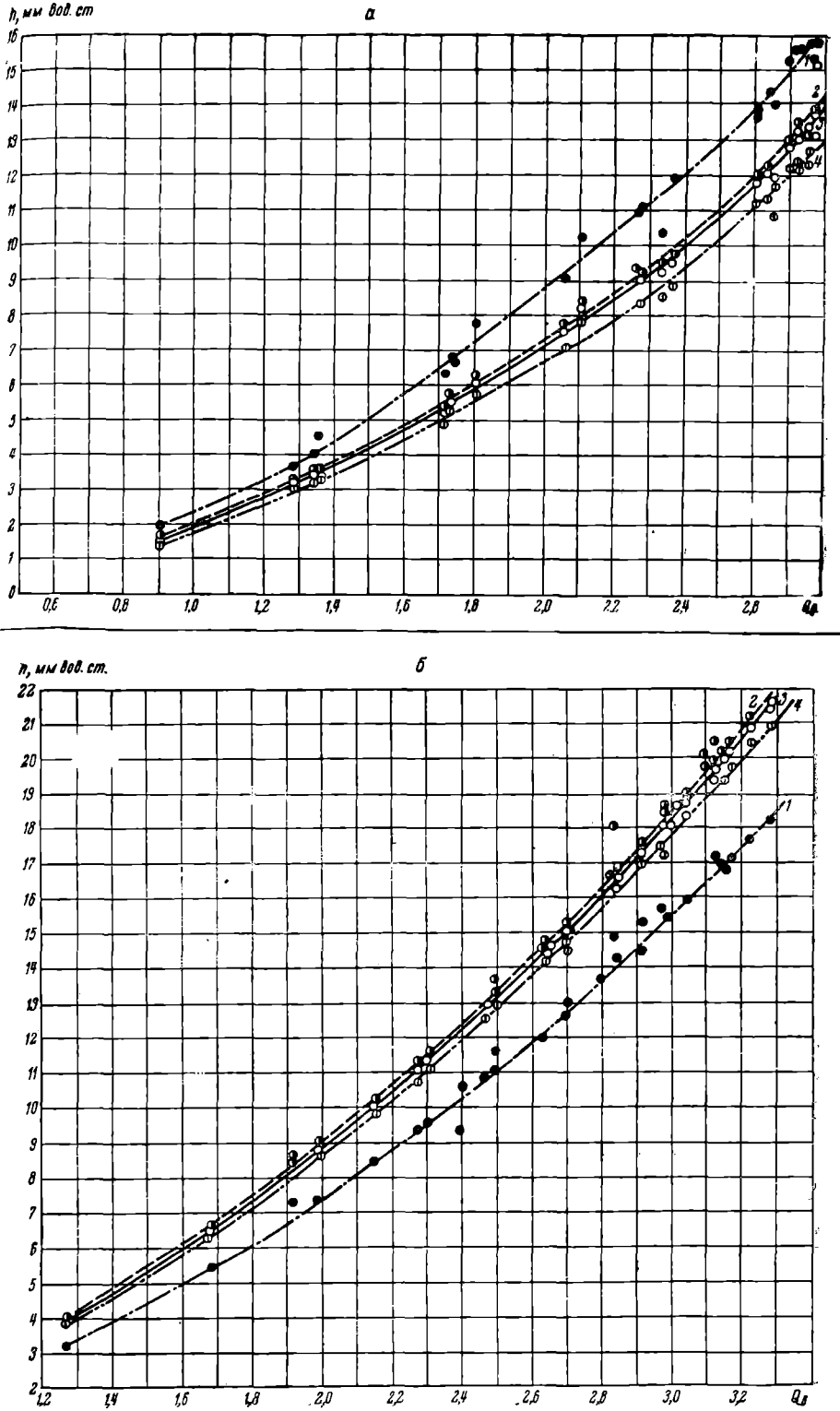


Рис. 4. Депрессия трубы:

а — при всасывании; *б* — при нагнетании; *1* — замеренная. Рассчитанная по формулам: *2* — Г. Бриггса; *3* — среднеарифметического количества воздуха; *4* — В. Н. Воронина

по длине трубы. Эти кривые [1] при нагнетании идут более полого и значения коэффициента η больше, чем при всасывании. Следовательно, при прочих равных условиях при нагнетании утечки воздуха из трубы всегда меньше, чем притечки в трубу при всасывании, так как перепад давления воздуха между трубой и выработкой при нагнетании всегда меньше, чем при всасывании, на удвоенную величину скоростного разрежения, создаваемого движением воздуха в трубе. На участке, где величина скоростного разрежения равна или больше напора, создаваемого вентилятором, работающим на нагнетание, при наличии неплотностей в трубе

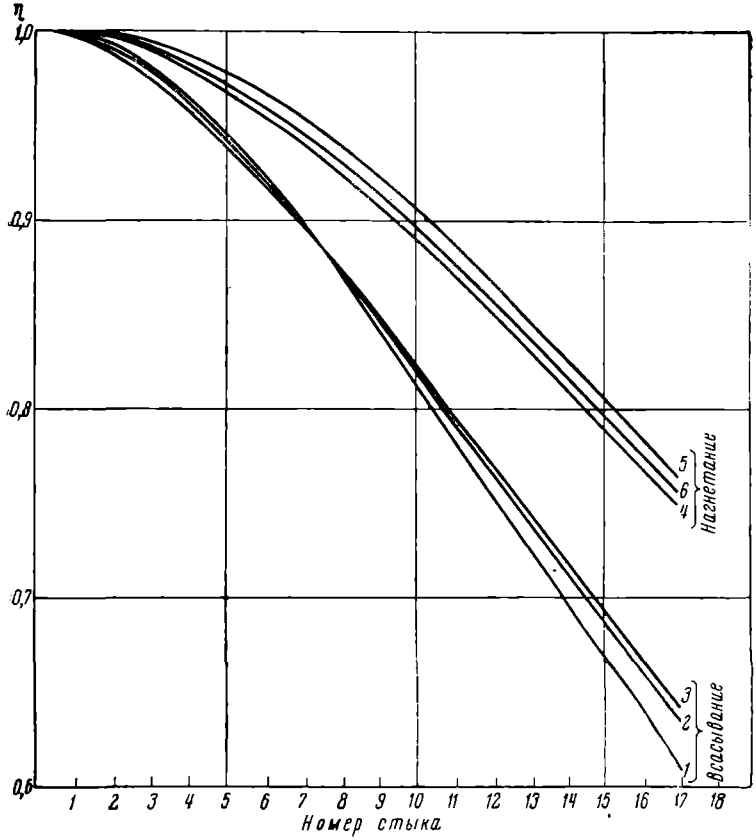


Рис. 5. Утечки воздуха через стыки

утечки воздуха в трубе отсутствуют или имеют место притечки воздуха в трубу.

Для определения влияния депрессии на коэффициент стыковой воздухопроницаемости K_0 вычислен по длине трубы при различных режимах по формуле А. Ф. Воропаева на основании замеров коэффициента утечек

$$p = \left(\frac{1}{3} k_0 \frac{L}{m} \sqrt{R_0 L} + 1\right)^2,$$

откуда

$$k_0 = \frac{3m\,(\sqrt{p} - 1)}{L\sqrt{R_0 L}},$$

[1] На самом деле, в данном случае получается зависимость в виде ступенчатой кривой.

где p — коэффициент утечек;
k_0 — коэффициент стыковой воздухопроницаемости;
L — длина трубопровода, *м*;
m — длина одной трубы, *м*;
R_0 — сопротивление 1 *пог. м* трубопровода.

Как показали замеры, для одного и того же режима коэффициент стыковой воздухопроницаемости увеличивается по мере приближения к вентилятору.

Заключение

1. При всасывании расчетные депрессии, определенные по формулам В. Н. Воронина, по среднеарифметическому количеству воздуха и формуле Бриггса, меньше депрессий, полученных опытным путем, в среднем соответственно на 21,8; 17,2 и 15,6% при η от 0,54 до 0,64.

Формула Г Бриггса дает наименьшее расхождение с опытом.

При расчете депрессии всасывающего трубопровода целесообразно пользоваться более простой формулой В. Н. Воронина, умножив ее на коэффициент 1,20,

$$h = 1{,}2RQ_{н}Q_{к}.$$

2. При нагнетательном способе проветривания депрессия, рассчитанная по формулам Г Бриггса, среднеарифметического количества воздуха и В. Н. Воронина, больше депрессии, полученной опытным путем, в среднем соответственно на 19; 17,3 и 15,2% при η от 0,61 до 0,76.

При нагнетательном способе проветривания целесообразно величину депрессии, определенную по формуле В. Н. Воронина, умножать на коэффициент 0,80

$$h = 0{,}8RQ_{н}Q_{к}.$$

3. Коэффициент стыковой воздухопроницаемости при одинаковой величине неплотностей по длине трубы непостоянен и увеличивается по мере приближения к вентилятору.