

## РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ ХРАНЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ ВО ВРЕМЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Докт. техн. наук, проф. ДЯЧЕК П. И.

*Белорусский национальный технический университет*

Значительная часть овощей, и особенно картофеля, ввиду недостатка стационарных хранилищ закладывается на хранение во временных сооружениях (буртах и траншеях) с образованием укрытия преимущественно из двух слоев соломы и двух слоев грунта. Траншеи не имеют принципиального отличия от буртов. В траншеях продукция располагается в сделанной в грунте линейной выемке глубиной более 0,5 м.

Достаточно широко бурты применяются и в тех странах, где не испытывается недостаток в стационарных хранилищах. Это объясняется сезонностью производства продукции и практически круглогодичным ее потреблением. Не имеет смысла хранить убранный картофель в стационарном хранилище, если потребление его будет осуществляться в течение короткого периода после уборки. Удельные капитальные вложения на сооружение временного бурта и стационарного хранилища отличаются в 30–100 и более раз. К тому же решены вопросы механизации работ по устройству укрытия, заполнения бурта и выгрузки хранящейся продукции. В Германии, например, используются бурты вместимостью до 500 т. Этот объем хранения соизмерим с вместимостью малых хранилищ. В современных условиях можно решать вопросы вентиляции буртов, осуществляя таким образом управление температурно-влажностным режимом хранения и получая высокое качество продукции и ее выход в конце периода хранения.

Проектирование системы вентиляции буртов (рис. 1) связано с проведением ряда инженерных расчетов, основу которых составляет определение аэродинамического сопротивления слоя хранимой продукции. Методика таких расчетов в нормативной и научной литературе не обнаружена.



Рис. 1. Схема системы вентиляции буртов и траншей

Приточные воздуховоды (воздухораспределители) могут быть наземными и заглубленными. Заглубленные воздуховоды размещаются ниже уровня основания бурта, а их воздухораздающая панель в виде планчатой решетки находится на уровне основания бурта. Наземные воздухораспределители могут быть треугольной (рис. 1) и трапециевидальной формы.

В зависимости от ширины бурта в основании устраивается один или два приточных воздуховода.

Цель данной работы – провести исследование параметров распределения воздуха в буртах и траншеях, на основании полученных результатов предложить инженерную методику оценки процессов движения воздуха в названных сооружениях и разработать метод расчета аэродинамического сопротивления слоя хранимой продукции. Это позволит найти пути совершенствования систем вентиляции буртов, определить способы повышения равномерности поля скоростей в сечении данных сооружений и обеспечить подачу в слой требуемых объемов воздуха [1].

Анализ методов исследования параметров фильтрации воздуха в насыпных слоях кусковых материалов показал, что измерение их в порах слоя является чрезвычайно сложной задачей и требует выполнения огромного объема экспериментальной работы. Связано это, прежде всего, со статистическим характером практически каждого из множества параметров, характеризующих состояние слоя и происходящих в нем процессов. Наиболее просто и точно учесть эти явления можно путем разработки математической модели изучаемых процессов и анализа ее с помощью вычислительной техники.

Поле скоростей фильтрации и распределение давлений воздуха в порах слоя находится путем численного решения уравнений движения, полученных на основании результатов экспериментального исследования закономерностей аэродинамического сопротивления насыпных слоев сельскохозяйственной продукции ( $\Delta p = aw^2 + a_1w$ ). При разработке модели принято, что приточные и вытяжной воздуховоды являются воздуховодами равномерной раздачи. В этих условиях задача фильтрации воздуха в поперечном сечении бурта может рассматриваться как двухмерная. С учетом этого система дифференциальных уравнений движения выглядит следующим образом:

$$\rho\mu\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{u}{w}(aw^2 + a_1w); \quad (1)$$

$$\rho\mu\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{v}{w}(aw^2 + a_1w); \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad w = \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  – объемная масса воздуха;  $\mu$  – порозность слоя;  $u, v$  – проекции вектора средней скорости фильтрации воздуха в порах  $w$  на оси  $x$  и  $y$  соответственно;  $p$  – давление, формируемое в рассматриваемом дифференциальном объеме системой вентиляции;  $a, a_1$  – коэффициенты, определяющие зависимость аэродинамического сопротивления слоя высотой 1 м от скорости фильтрации  $w$ .

Коэффициенты  $a$  и  $a_1$  определены экспериментально для среднестатистического фракционного состава конкретного вида продукта, имеют раз-

личный уровень численных значений и представлены в специальной литературе.

Математическая постановка задачи о движении воздуха в пористом слое сельскохозяйственной продукции и методика ее численного решения достаточно полно представлены в [2].

На рис. 2 приведены результаты расчета поля скорости  $w$  в поперечном сечении некоторых типов буртов. На левой части рисунков даны поля относительных скоростей ( $w_i/w_{cp}$ ) с подземными (а, в), на правой – с наземными трапецеидальной формы (б, г) приточными воздуховодами. На верхнем рисунке представлено поле относительных скоростей буртов с одним приточным воздухопроводом в основании, на нижнем – с двумя приточными воздуховодами. Здесь  $w_{cp} = 1/F \int w dF$ . Поля скоростей совмещены по осям симметрии. Ширины воздухоподающих и вытяжных воздухопроводов в сравниваемых вариантах одинаковы.

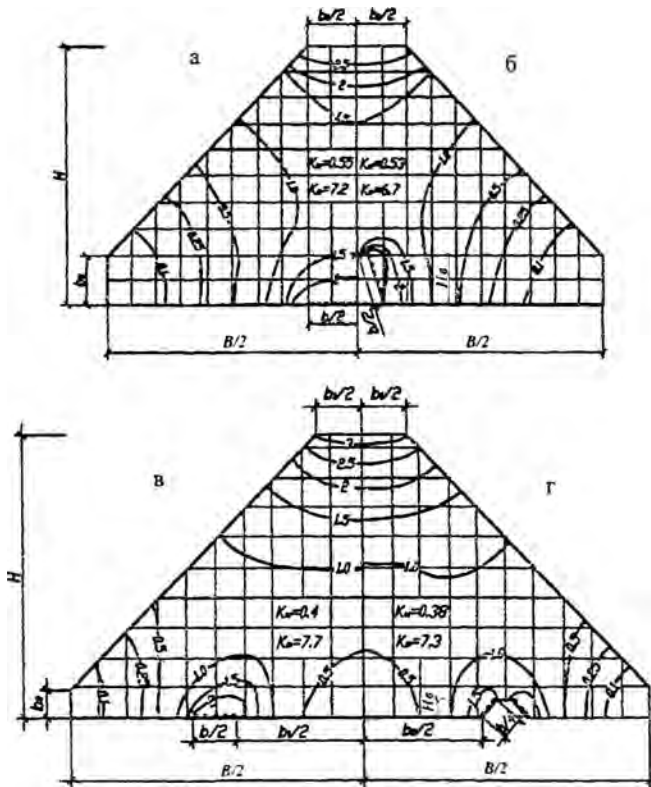


Рис. 2. Поле относительных скоростей  $w_i/w_{cp}$  в поперечном сечении некоторых типов буртов

Предлагается, как и в [2], качество распределения воздуха в поперечном сечении бурта оценивать коэффициентом неравномерности поля скоростей

$$k_n = \frac{1}{F} \int \frac{\text{mod}(w_i - w_{cp})}{w_{cp}} dF, \quad (4)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения бурта;  $w_{cp}$  – средняя по сечению скорость фильтрации воздуха.

Аэродинамическое сопротивление фильтрации воздуха в порах насыпного слоя бурта следует находить по зависимости

$$\Delta p = (1 + k_p)k \left[ a \left( \frac{L}{3600} \right)^2 + a_1 \frac{L}{3600} \right] H, \quad (5)$$

где  $k_p$  – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность поля скоростей в сечении бурта;  $L$  – подача воздуха, отнесенная к единице площади основания,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий вид закладываемой в бурт продукции и определяемый через значения коэффициентов  $a$ ,  $a_1$ ,

$$k = \frac{0,45 + 0,85 \exp(3,97 \cdot 10^{-5} a a_1^{0,25})}{3,28 \cdot 10^{-2} a_1 + 0,84}. \quad (6)$$

Поправочный коэффициент  $k_p$  в зависимости от количества, расположения и типа приточных воздуховодов, а также с учетом геометрии поперечного сечения бурта подчиняется выражению

$$k_p = k_{p1} k_{p2} - \Delta \alpha, \quad (7)$$

где  $k_{p1}$  – коэффициент, определяемый геометрическими параметрами бурта с одним приточным воздуховодом;  $k_{p2}$  – поправочный коэффициент, который учитывает наличие в основании двух приточных воздуховодов (для буртов с одним приточным воздуховодом  $k_{p2} = 1$ );  $\Delta \alpha$  – поправка на угол наклона воздухоподающих панелей наземных воздухораспределителей, для систем вентиляции с заглубленными воздухораспределителями  $\Delta \alpha = 0$ ;

$$k_{p1} = \left[ 0,47 \left( \frac{B}{b_1} - 1 \right)^{1,85} + \left( 0,364 + 2,458 \frac{h_1}{B} \right) \left( \frac{B}{b} - 1 \right)^{0,875} \right] \left( 1 - \frac{b_1}{H} \right); \quad (8)$$

$$k_{p2} = 1 + \left[ 1,3 \left( \frac{b_2}{B} \right)^2 - 1,15 \frac{b_2}{B} \right] \left( 1 - \frac{b}{B} \right); \quad (9)$$

$$\Delta \alpha = \left( -0,67 \frac{b_3}{H} + 0,89 \right) H_e^{-0,82 \frac{b_3}{H} + 0,38} \quad (10)$$

Для расчета коэффициента неравномерности поля скоростей получена формула

$$k_n = k_{n1} + k_{n2} + k_{n\alpha}, \quad (11)$$

где  $k_{н1}$  – коэффициент неравномерности поля скоростей фильтрации в буртах с одним приточным воздухопроводом;  $k_{н2}$  – добавочное значение коэффициента неравномерности поля скоростей при наличии в основании двух воздухораспределителей, для систем вентиляции с одним воздухораспределителем в основании  $k_{н2} = 0$ ;  $k_{на}$  – добавочный коэффициент, учитывающий угол наклона панелей наземных воздухораспределителей; для заглубленных воздухораспределителей равен 0.

Имеем:

$$k_{н1} = s \left[ \left( 1 - \frac{b}{B} \right) + c \right]; \quad k_{н2} = \left( 1 - \frac{b}{B} \right) \left( \frac{b_1}{H} - 1 \right) \frac{b_2}{2B}; \quad (12)$$

$$k_{на} = \left( 0,2 \frac{b_3}{H} + 0,21 \right) H_e^2 + \left( 0,1 \frac{b_3}{H} - 0,17 \right) H_B. \quad (13)$$

Здесь

$$s = \left[ 0,69 - 0,25 \left( 1 - \frac{b}{B} \right) \right] \left( 1 - \frac{b_1}{H} \right) - 0,544 \left( 1 - \frac{b}{B} \right) + 0,444; \quad (14)$$

$$c = \left[ 0,444 - 1,747 \left( 1 - \frac{b}{B} \right) \right] \left( 1 - \frac{b_1}{H} \right) + 2,317 \left( 1 - \frac{b}{B} \right) - 0,524. \quad (15)$$

В выражениях (11) и (7), как уже отмечено выше, коэффициенты  $k_{н2}$  и  $k_{p2}$  рассчитываются в том случае, когда в основании бурта закладываются два приточных воздуховода, коэффициенты  $\Delta\alpha$  и  $k_{на}$  – когда применяются наземные воздухораспределители.

Анализ полученных результатов показывает, что поле скоростей фильтрации в поперечном сечении бурта обладает высокой степенью неравномерности. Если в насыпных слоях, формируемых в стационарных хранилищах при размещении продукции навалом или в закромах, можно обеспечить с помощью разработанных для них систем вентиляции  $k_{н} = 0,3-0,35$ , то для буртов  $k_{н} \approx 0,5$ .

В буртах с одним приточным воздухопроводом в основании формируются две боковые слабоventилируемые зоны, в буртах с двумя приточными воздухопроводами в основании имеется и третья, находящаяся между воздухораспределителями. Причем из средней зоны и наиболее затруднен отвод избыточной теплоты в период охлаждения. Анализ различных вариантов вентиляции буртов позволил рекомендовать в этом случае применение попеременной подачи воздуха в приточные воздуховоды [3], а при перегреве средней зоны – и вентиляцию из одного приточного воздуховода в другой.

Бурты с двумя приточными воздухопроводами следует применять при ширине основания более 2 м. Анализ формулы для расчета  $k_{p2}$  показывает, что расстояние между симметрично расположенными приточными воздухопроводами должно выбираться из условия  $b_2/B = 0,44$ . В этом случае борт будет иметь минимальное аэродинамическое сопротивление.

Анализ характера распределения воздуха в поперечном сечении буртов позволил разработать предложение по новому расположению воздухоораспределителей. По этому предложению приточный и вытяжной воздуховоды располагаются по краям бурта в его основании (рис. 3а). Для этой схемы распределения воздуха применимы приведенные выше расчетные зависимости в предположении  $b/B = 1$  при соответствующей корректировке высоты и ширины бурта. Такая схема распределения воздуха обеспечивает достаточно высокую степень равномерности поля скоростей. Однако применение такой схемы вентиляции возможно только после формирования укрытия.

Исследования показали, что, как и в [2], поле скоростей выхода воздуха из панелей воздухоораспределителя характеризуется некоторой неравномерностью. Это важно, так как максимальная скорость входа воздуха в слой ограничивается [1]. Величина максимальной скорости для приточных воздуховодов может быть вычислена по зависимости

$$w_{\max} = \frac{LB}{3600\mu b'} k_w, \quad (16)$$

где  $\mu$  – порозность слоя;  $b'$  – общая ширина воздухоораздающих панелей приточных воздуховодов.

Поправочный коэффициент находится по формуле

$$k_w = 1 + \left( 0,28 - 0,5 \frac{b_2}{B} \right) \sin \left[ \frac{b}{B} \left( 3,41 - 3,8 \frac{b_1}{B} \right) \right]. \quad (17)$$

Если максимальная скорость будет в вытяжном воздуховоде ( $b_1 < b'$ ), то

$$k_w = 1 + \left( 0,14 + 0,29 \frac{b_2}{B} \right) \frac{b_1}{B}, \quad (18)$$

а в формуле (16) следует принимать  $b' = b_1$ .

Основной недостаток систем вентиляции буртов – это высокая степень неравномерности распределения воздуха в поперечном сечении. Главный фактор, который это определяет, – конфигурация поперечного сечения. Исследование связи равномерности поля скоростей с конфигурацией поперечного сечения позволило автору предложить новое поперечное сечение бурта (рис. 3б), а вместе с Л. С. Ицковичем и Е. В. Лебедко и конструктивно его разработать [4].

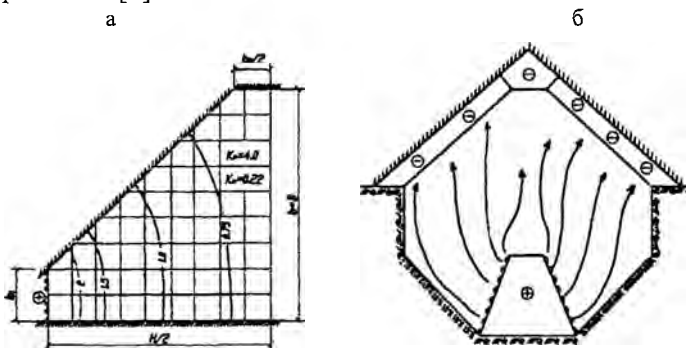


Рис. 3. а – поле скоростей  $w_i/w_{cp}$  фильтрации воздуха при расположении приточного и вытяжного воздуховодов в основании; б – схема бурта по [4]

Значения коэффициента неравномерности поля скоростей бурта по рис. 3б и поправочный коэффициент  $k_p$  близки к нулю. Целесообразно приточный воздухопровод в бурте по рис. 3б выполнять в форме проходного канала и использовать его для выгрузки хранимой продукции самотеком на конвейер. Такой опыт в практике хранения сельскохозяйственной продукции имеется. Хранилище-бурт имеет низкие капитальные вложения на строительство. Минский институт «Агропроект» разработал чертежи этого типа хранилища.

## ВЫВОДЫ

1. Проведено аналитическое исследование и предложена инженерная методика оценки процессов движения воздуха во временных сооружениях для хранения сельскохозяйственной продукции, а также разработан метод расчета аэродинамического сопротивления слоя хранимой продукции.

2. Представленные материалы на стадии проектирования позволяют выбрать рациональную систему вентиляции и вид бурта, обеспечивая требуемые технологические параметры хранения продукции и снижения ее потерь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волкинд, И. Л. Промышленная технология хранения картофеля, овощей и плодов / И. Л. Волкинд. – М.: Агропромиздат, 1989. – 240 с.

2. Дячек, П. И. Расчет распределения воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции навалом / П. И. Дячек // Изв. вузов СССР. Строительство и архитектура. – 1989. – № 2. – С. 79–84.

3. Способы вентиляции буртов: а. с. 886826 СССР, МКИ<sup>3</sup> А 01 D 91/02 / П. И. Дячек, Л. С. Ицкович. – № 2444236; заявл. 18.01.1977; опубл. 07.12.1981, Бюл. № 45.

4. Бурт для хранения сельскохозяйственной продукции: а. с. 1009329 СССР, МКИ<sup>1</sup> А 01 F 25/02. / П. И. Дячек, Л. С. Ицкович, Е. В. Лебедко. – № 3366144; заявл. 15.12.1981; опубл. 07.04.1983, Бюл. № 13.

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 14.02.2006