

Д. В. Горбун.
С43
3-48
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. И. В. СТАЛИНА

Аспирант Г. С. ЗЕЛИНСКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
СЛОЯ ЗЕРНА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — канд. техн. наук
доцент П. Н. ПЛАТОНОВ

ОДЕССА
1958

с. 12

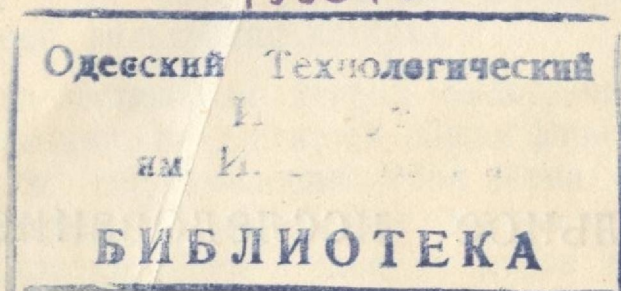
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. И. В. СТАЛИНА

Аспирант Г. С. ЗЕЛИНСКИЙ

199075

С43

3-



ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
СЛОЯ ЗЕРНА

Пересчет 19 84

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — канд. техн. наук
доцент П. Н. ПЛАТОНОВ

ОДЕССА
1958

Экспериментальное исследование выполнено в Одесском технологическом институте им. И. В. Сталина.

В диссертационной работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования аэродинамического сопротивления слоя зерна различных культур при установившейся прямолинейной фильтрации воздуха.

Исходя из достижений теории фильтрации и экспериментального исследования, предлагается общая формула для расчета аэродинамического сопротивления слоя зерна в больших пределах изменения отдельных параметров (скорости фильтрации воздуха, плотности укладки зёрен в слое, размеров зёрен).

Приводятся результаты исследования основного параметра слоя зерна — плотности укладки зёрен в слое в зависимости от различных факторов.

В решении XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР намечено довести в 1960 году валовой сбор зерна до 180 млн. тонн при сокращении сроков уборки урожая до 7—10 дней.

В связи с этим перед заготовительной системой ставится важнейшая задача: в короткие сроки принять и сохранить ежегодно возрастающие массы зерна различных культур.

Решение этой задачи возможно при условии внедрения в элеваторно-складское хозяйство передовых достижений науки и техники.

На элеваторы и склады поступают большие массы зерна с повышенной влажностью, которая делает зерно непригодным для длительного хранения.

Избыточная влага в зерне удаляется посредством продувания слоя зерна нагретым или атмосферным воздухом.

Раскрытие закономерностей движения воздуха в слое зерна различных культур имеет важное значение для исследования процессов сушки, для совершенствования существующих и создания новых зерносушилок и установок активного вентилирования зерна.

Раскрытие этих закономерностей также необходимо для расчета установок газации и дегазации зерновых масс, загрузителей пневматического транспорта зерна (сопел, шахтных загрузителей), кондиционеров и др.

Состояние теории и методы расчета движения воздуха в слое зерна не удовлетворяют требованиям практики.

Существующие зависимости аэродинамического сопротивления слоя зерна, установленные только для некоторых зерновых культур в небольших пределах изменения отдельных параметров, не дают возможности в большинстве случаев производить необходимые расчеты.

Настоящее исследование посвящено определению общей зависимости аэродинамического сопротивления слоя зерна от различных параметров, в пределах изменения встречающихся в расчетной практике.

Диссертация содержит в себе 5 глав текста, перечень использованной литературы, приложение — всего 180 страниц и 41 рисунок. В приложении приведены таблицы результатов опытов аэродинамического сопротивления слоя зерна различных культур.

Первая глава посвящена обзору литературы. Ознакомление с литературой показало, что проведенные исследования аэродинамического сопротивления слоя зерна—Рамзина Л. К. (1926 г.), г.), Дрогалина К. В. (1937 г.), Шедда С. К. (1953 г.), Хьюкилла В. В. и Айвза Н. С. (1955 г.)—не вскрыли общих закономерностей движения воздуха в слое зерна. Предлагаемые в этих исследованиях расчетные формулы являются эмпирическими, они позволяют получить только приближенные величины потерь давления потока воздуха для некоторых частных случаев.

Для раскрытия общих закономерностей аэродинамического сопротивления слоя зерна целесообразно использовать результаты теоретических и экспериментальных исследований законов сопротивления при фильтрации жидкостей и газов в пористых средах, так как движение воздуха в слое зерна есть частный случай фильтрации.

Ознакомление с литературой по исследованию сопротивления при фильтрации (работы: Лейбензона Л. С., Великанова М. Л., Жаворонкова Н. М., Федорова И. М., Котяхова Ф. И., Минского Е. М., Минца Д. М., Акопяна Л. А. и Касаткина А. Г., Дарси Х., Фенчера Д., Киннея С. П., Плейна Г. И. и Моррисона Х. Л. и др.) показало, что:

—сопротивление слоя пористой (сыпучей) среды (H_{nm}) движению в ней жидкости является еще не полностью раскрытой функ-

цией параметров жидкости и пористой среды; а именно: скорости фильтрации (v), плотности (ρ) и кинематической вязкости (ν) жидкости, длины (l) и поперечного размера (D) слоя пористой среды, а также коэффициентов, учитывающих форму (ω), шероховатость (ξ) и плотность укладки (k) частиц пористой среды;

— дальнейшее исследование сопротивления при фильтрации должно идти по пути применения теории подобия и размерностей с целью установления общего закона сопротивления;

— необходимо изучить изменение основного параметра слоя, плотности укладки частиц — в зависимости от различных факторов.

Ознакомление с исследованиями плотности укладки частиц различных сыпучих сред (работы: Герсегонова Н. М., Бернштейна М. С., Иммермана А. П., Сидорова Н. Н., Добсона Ф. и др.) показало, что изменение плотности укладки частиц сыпучей среды в зависимости от различных факторов изучено недостаточно.

Исходя из анализа проведенных исследований, задачи настоящей работы сформулированы в следующем виде:

— установить общую формулу аэродинамического сопротивления слоя зерна; определить эмпирическую зависимость коэффициента гидравлического сопротивления сыпучей среды (λ) от числа Рейнольдса (Re), выразив эти величины через параметры воздуха и слоя зерна;

— исследовать плотность укладки зёрен в слое в зависимости от условий формирования и состояния зерновой массы;

— разработать общий метод определения аэродинамического сопротивления слоя зерна различных культур в больших пределах изменения отдельных параметров.

Во второй главе приведены теоретические предпосылки по определению общей формулы аэродинамического сопротивления слоя зерна и плотности укладки зёрен по величине этого сопротивления.

По аналогии с трубной гидравликой общая формула сопротивления при фильтрации принята в виде:

$$H_{nm} = \lambda \frac{l \rho u^2}{r 2}, \quad (1)$$

а критерий подобия

$$Re = \frac{ur}{\nu}, \quad (2)$$

где r — гидравлический радиус пор, равный отношению площади поперечного сечения фильтрационного потока к смоченному периметру;

u — скорость движения потока в порах.

Показано, что

$$u = \frac{v}{1-k}, \quad (3)$$

и

$$r = \frac{d_{экс} (1-k)}{6 \omega k}, \quad (4)$$

где $k = \frac{\gamma_{об}}{\gamma_{уд}}$ — коэффициент плотности укладки частиц пористой среды ($\gamma_{об}$ — объёмный вес среды, а $\gamma_{уд}$ — удельный вес частиц);

$d_{экс} = \sqrt[3]{\frac{6 v_3}{\pi}}$ — эквивалентный диаметр частицы (v_3 — объём частицы);

ω — коэффициент формы частицы, равный отношению площади поверхности частицы к площади поверхности шара эквивалентного диаметра.

Исходя из этого, величины H_{nm} и Re будут равны:

$$H_{nm} = \lambda \frac{l}{d_{экс}} \cdot \frac{6 \omega k}{(1-k)^3} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

$$Re = \frac{v d_{экс}}{\nu} \cdot \frac{1}{6 \omega k} \quad (6)$$

Показано, что при $\frac{D}{d} \geq 50$ стенки квадратной шахты, в которой помещена сыпучая среда, практически не влияют на величину H_{nm} (D — поперечный размер шахты).

Приводится метод определения коэффициента плотности укладки частиц по величине H_{nm} . Сущность этого метода заключается в том, что небольшое изменение коэффициента k (уравнение (5)) вызывает сравнительно большое изменение величины H_{nm} при прочих равных условиях опыта.

В третьей главе (методика исследования) описаны экспериментальные установки и методика исследования аэродинамического сопротивления слоя зерна, плотности укладки зёрен в

слоя, а также методика определения опытным путем скорости воздуха в межзерновых каналах для подтверждения справедливости равенства (3).

Исследование аэродинамического сопротивления слоя зерна производилось на установках, имеющих шахты различных размеров: цилиндрической — $D = 100$ мм, $l = 2000$ мм и квадратных — $200 \times 200 \times 1000$ мм и $126 \times 126 \times 400$ мм.

Опыты производились с пшеницей различной влажности (относительная влажность (w) изменялась от 12,6 до 26,5%), сухим зерном ржи, ячменя, кукурузы, гречихи, соей, пшеном, крупой чумизы и стальными шариками $d = 8$ мм.

В опытах скорость фильтрации воздуха (v) изменялась от 0,01 до 1,5 м/сек; коэффициент плотности укладки зёрен (k) — от 0,47 до 0,74; высота слоя (l) — от 0,1 до 1,0 м; потери давления потока воздуха на единицу высоты слоя ($\frac{H_{nm}}{l}$) — от 2 до $800 \frac{\text{ммв.ст.}}{\text{м}}$.

Обработка результатов исследования заключалась в нахождении зависимости $\lambda = f(Re)$ и коэффициента формы зёрен методом гидравлического сопротивления слоя, приведенным в диссертации.

Ошибка опытов определялась методом наименьших квадратов.

Скорость движения воздуха в межзерновых каналах (u) определялась методом гидравлического сопротивления слоя. Сущность этого метода, схема установки и порядок проведения опытов излагаются в диссертации.

Исследование плотности укладки зёрен производилось на установке с цилиндрической шахтой, размером $D = 100$ мм, $l = 2000$ мм, и квадратной — $200 \times 200 \times 1000$ мм.

Коэффициент плотности укладки зёрен (k) определялся в случае равномерной по всему объёму слоя укладки путём нахождения веса сыпучей среды в известном объёме.

В случае неравномерной укладки зёрен по высоте либо по поперечному сечению слоя, коэффициент k определялся методом гидравлического сопротивления слоя.

Опыты по определению плотности укладки зёрен в зависимости от различных факторов производились с пшеницей, кукурузой, гречихой, рожью, ячменём и пшеном.

Коэффициент k определялся в зависимости от условий формирования сыпучей среды (способа, производительности, высоты засыпки зёрен в шахту), а также в зависимости от скорости движения зёрен в шахте.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования движения воздуха в слое зерна.

Опыты по определению скорости воздуха в межзерновых каналах подтвердили справедливость равенства (3).

Задача экспериментального исследования аэродинамического сопротивления слоя зерна заключалась, как видно из формул (5) и (6), в раскрытии зависимости $\lambda = f(Re)$ и нахождении коэффициента формы зерен (ω).

В работе определена эталонная зависимость $\lambda_{эм} = f(Re)$ (при $\omega = 1$), по отношению к которой методом гидравлического сопротивления слоя определялся коэффициент формы зерен различных культур.

Для раскрытия эталонной зависимости $\lambda_{эм} = f(Re)$, опыты производились со стальными шариками ($\omega = 1$) и пшеном ($\omega = 1,1$).

В результате опытов в принятых пределах изменения числа Re ($0,1 \leq Re \leq 200$) было найдено, что

$$\lambda = \frac{9}{Re} + \frac{1}{Re^{0,15}} \quad (7)$$

При $Re < 1$ имеет место ламинарная фильтрация, при которой

$$\lambda = \frac{9}{Re} \quad (8)$$

Коэффициент формы зерен определялся при ламинарной фильтрации по формуле:

$$\omega = 0,078 \cdot d_{экс} \cdot \frac{1-k}{k} \sqrt{\frac{H_{nm}(1-k)}{l \cdot v \cdot \rho \cdot v}}, \quad (9)$$

которая получена из уравнения (5), учитывая формулы (8) и (6), а при турбулентной — графоаналитическим способом, приведенным в диссертации.

Как показали опыты, коэффициент формы зерен практически не зависит от их влажности.

В диссертации приведены графические зависимости $\lambda = f(Re)$ для различных культур зерна. Эти зависимости, учитывая значения коэффициента ω , хорошо совпадают с графической зависимостью, построенной по формулам (7) и (8).

Были проведены опыты, в которых слой зерна взвешивался восходящим потоком воздуха. Установлено, что зависимость между потерями давления по высоте взвешенного слоя (H_{nm}) и весом зерна, приходящимся на единицу площади поперечного сечения слоя (P), может быть выражена в виде:

$$H_{nt} = \alpha P, \quad (10)$$

где α — опытный коэффициент, который находится в прямой зависимости от коэффициента k и изменяется от 0,88 до 1,1.

Коэффициент гидравлического сопротивления взвешенного слоя зерна при одинаковых значениях числа Re практически не отличается от коэффициента гидравлического сопротивления невзвешенного слоя.

В диссертации приводится сравнение результатов опытов аэродинамического сопротивления слоя зерна с результатами опытов движения жидкостей и газов в сыпучих средах ряда исследований (Минца, Дрогалина, Жаворонкова и Федорова). Это сравнение показало, что коэффициент гидравлического сопротивления слоя зерна при одинаковых значениях числа Re удовлетворительно совпадает с коэффициентом гидравлического сопротивления различных сыпучих сред при движении в них жидкостей и газов.

Приводится объяснение некоторых особенностей режимов фильтрации в сыпучей среде.

Пятая глава посвящена результатам экспериментального исследования плотности укладки частиц сыпучей среды.

Установлено, что в зависимости от условий формирования сыпучей среды плотность укладки ее частиц изменяется в широких пределах. Наибольшая плотность укладки частиц достигается при загрузке их в шахту „дождем“ с высоты $h > h_{np}$, где h_{np} — некоторая предельная высота падения частиц. Наименьшая плотность укладки частиц достигается при загрузке их в ёмкость с высоты $h=0$.

Приводится объяснение физической сущности изменения плотности укладки частиц в зависимости от условий формирования сыпучей среды.

Исследование плотности укладки частиц при их движении в шахте показало, что в случае установившегося движения частиц плотность их укладки близка к наименьшей и практически не зависит от производительности истечения. В случае неустановившегося движения частиц плотность их укладки изменяется в зависимости от коэффициента расхода (Θ *) и стремится к определенной (критической) плотности укладки.

Если начальная плотность укладки частиц наименьшая, то с изменением коэффициента Θ от 0 до 3% происходит уплотнение

*) За коэффициент Θ принято отношение веса частиц, вытекших из емкости, к первоначальному весу слоя сыпучей среды.

сыпучей среды (на 2—3%), дальнейшее увеличение коэффициента Θ не вызывает изменения коэффициента плотности укладки частиц.

Если начальная плотность укладки частиц наибольшая, то при изменении коэффициента Θ от 0 до 20--25% происходит разрыхление сыпучей среды (на 12--15%), дальнейшее увеличение коэффициента Θ не вызывает изменения плотности укладки частиц.

Приводится объяснение физической сущности процесса образования (становления) критической плотности укладки частиц сыпучей среды.

Определена наименьшая и наибольшая плотность укладки сухого зерна различных культур.

Установлено, что на величину плотности укладки большое влияние оказывает влажность зерна. Так, при изменении относительной влажности пшеницы от 12,6% до 26,5% коэффициент плотности укладки зерен при засынке их в шахту с высоты $h = 0$ уменьшился на 19%.

В Ы В О Д Ы

На основании проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что движение воздуха в неподвижном или подвижном слое зерна подчиняется общим закономерностям фильтрации жидкостей либо газов в пористых средах.

Проведенное исследование ламинарной и турбулентной фильтрации воздуха в слое зерна показало, что переход от ламинарной фильтрации воздуха к турбулентной происходит плавно, без скачков, по мере проявления сил инерции потока по сравнению с силами вязкого трения. Этот переход начинается при значении числа Re , равном примерно единице.

2. В результате теоретического и экспериментального исследования предложена общая формула для определения аэродинамического сопротивления слоя зерна:

$$H_{nm} = \lambda \cdot \frac{l}{d_{экв}} \cdot \frac{6 \cdot \omega k}{(1-k)^3} \cdot \frac{\rho v^2}{2}.$$

3. Для расчета аэродинамического сопротивления слоя зерна различных культур по предложенной формуле найдены:

а) Эмпирические зависимости коэффициента сопротивления (λ)

от числа Re для ламинарной и турбулентной фильтрации в пределах изменения числа Re от 0,1 до 200 в виде:

$$\lambda = \frac{9}{Re} \quad \text{при } Re < 1 \text{ (ламинарная фильтрация).}$$

$$\lambda = \frac{9}{Re} + \frac{1}{Re^{0,15}} \quad \text{при } Re > 1 \text{ (турбулентная фильтрация).}$$

где

$$Re = \frac{v d_{\text{экс}}}{\nu} \cdot \frac{1}{6 \omega k}$$

б) Коэффициент формы зёрен (ω):

Сыпучая среда	Коэффициент ω
Пшеница	1,55
Кукуруза (зерно)	1,65
Рожь	1,55
Гречиха	1,70
Ячмень	2,05
Соя	1,20
Просо	1,10
Чумиза	1,0
Стальные полированные шары ($d = 8$ мм)	1,00

в) Коэффициент плотности укладки зёрен (k) в зависимости от ряда факторов.

4. При движении зерна со скоростью u_z , его аэродинамическое сопротивление определяется по общей формуле сопротивления, в которую вместо абсолютной скорости фильтрации (v_a) подставляется относительная (к зерну) скорость фильтрации, равная:

$$v_r = v_a \pm u_z (1 - k).$$

Здесь знак (+) ставится при движении слоя и фильтрационного потока в противоположных направлениях, а знак (—) — в одном направлении.

5. Для случая взвешивания слоя зерна восходящим потоком воздуха установлено, что:

— аэродинамическое сопротивление взвешенного слоя зерна определяется по формулам сопротивления неподвижного слоя;

— потери давления во взвешенном слое практически не зависят от скорости фильтрации;

— в начале взвешивания слоя зависимость между величиной H_{nm} и весом зерна P , приходящимся на единицу площади поперечного сечения слоя, выражается в виде $H_{nm} = \alpha P$, где α опытный коэффициент, находящийся в прямой зависимости от коэффициента плотности укладки зерна ($\alpha = 0,88-1,1$);

— при расчете взвешивания слоя зерна коэффициент α целесообразно принимать равным единице.

6. Установленные настоящим исследованием зависимости коэффициента сопротивления λ от числа Re , при $0,1 < Re < 200$, подтверждаются опытными данными других исследований (Минца Дрогалина, Жаворонкова, Федорова).

7. Разработаны методы определения коэффициента плотности укладки частиц сыпучей среды (k) и коэффициента живого сечения (e), благодаря чему экспериментально подтверждена справедливость зависимостей:

$$e = 1 - k$$

$$u = \frac{v}{1-k}$$

8. Плотность укладки частиц сыпучей среды целесообразно характеризовать коэффициентом $k = \frac{\gamma_{об}}{\gamma_{уд}}$.

9. При формировании сыпучей среды плотность укладки частиц зависит от характера сил, действующих на частицы в момент образования сыпучей среды.

Если частицы при их укладке находятся под действием только силы собственного веса, то плотность укладки сыпучей среды будет наименьшей (k_{min}). Если частицы в момент образования сыпучей среды находятся под действием сил инерции и собственного веса, то плотность их укладки увеличивается до определенного предела (k_{max}) прямо пропорционально росту сил инерции.

Наименьшая плотность укладки сыпучей среды достигается загрузкой частиц в ёмкость с высоты $h = 0$, а наибольшая — загрузкой «дождём» с высоты $h > h_{пр}$.

10. Производительность загрузки частиц в ёмкость незначительно влияет на величину плотности их укладки.

11. Большое влияние на плотность укладки частиц оказывает величина коэффициента внутреннего трения сыпучей среды. Это влияние особенно сказывается при рыхлых укладках.

12. Определены величины наименьшей и наибольшей плотности укладки сухого зерна различных культур:

Культура	k_{min}	k_{max}
Пшеница	0,580	0,635
Рожь	0,560	0,630
Кукуруза	0,555	0,615
Гречиха	0,540	0,620
Ячмень	0,495	0,595
Соя	0,565	0,625
Пшено	0,590	0,670

13. При неустановившемся движении сыпучей среды в шахте плотность укладки частиц стремится к критической плотности, причём если начальная укладка частиц плотная, то происходит разрыхление сыпучей среды, а если рыхлая—уплотнение.

14. Процесс разрыхления и уплотнения сыпучей среды зависит от объема частиц, вытекших из шахты, и не зависит от производительности истечения.

Чем больше разность между критической и начальной плотностью укладки, тем более длительным является становление критической плотности.

15. При установившемся движении сыпучей среды в шахте плотность укладки частиц практически не зависит от скорости их движения и близка по своей величине к значению критической плотности укладки.

16. Коэффициент формы зерен можно определять по гидравлическому сопротивлению слоя при ламинарной фильтрации по формуле:

$$\omega \equiv 0,078 \, d_{эkv} \frac{1-k}{k} \sqrt{\frac{H_{nm}(1-k)}{l \, \gamma \, \rho \, v}},$$

а при турбулентной — рекомендованным в работе графоаналитическим способом.

По диссертационной работе опубликованы
следующие статьи:

1. Г. С. Зелінський, П. М. Платонов. Аеродинаміка шару сипкого середовища“. Доповіді АН УРСР. № 2, 1958.
2. Г. С. Зелинский, П. Н. Платонов, Аэродинамическое сопротивление слоя зерна. Труды Одесского технологического института, т. 9, 1958.
3. Г. С. Зелинский, П. Н. Платонов. Плотность укладки частиц сыпучей среды. Труды Одесского технологического института, т. 9, 1958.

199075

Одесский Технологический
Институт
им. И. В. Сталина
БИБЛИОТЕКА