

## РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СЕМЕНА РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР В ПОТОКЕ ВОЗДУХА, МЕТОДОМ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

*Владимир Лукьяненко, Антон Никифоров*

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко*

*Ул. Артема 44, Харьков, Украина. E-mail: khstua@lin.com.ua*

*Vladimir Lukianenko, Anton Nikiforov*

*Kharkov national technical University of agriculture named after Peter Vasilenko  
St. Artem 44, Kharkiv, Ukraine. E-mail: khstua@lin.com.ua*

**Аннотация.** В данной работе изложен порядок расчёта коэффициентов аэродинамических сил и моментов, действующих на семена растительных культур в потоке воздуха, методом плоских сечений. Составлен алгоритм расчёта аэродинамических сил и моментов методом разбивки зерна на элементарные аэродинамические профили.

**Ключевые слова.** Аэродинамические силы, аэродинамические моменты, поток воздуха, алгоритм.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Повышение эффективности процессов выделения семян трудноотделимых сорняков и примесей из полезной культуры в настоящее время продолжает оставаться актуальной задачей. В некоторых случаях на существующих воздушно-решетно-триерных и вибрационных зерноочистительных машинах выполнить очистку семян основной культуры без их значительных потерь невозможно [2, 3, 9, 07, 19]. Поэтому изыскание новых рабочих органов семяочистительных машин для улучшения качества очистки семян имеет важное народнохозяйственное значение.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ работ в области гидродинамики сепарирования зерна [5, 15, 17], а также вибрационного перемещения твёрдых и сыпучих тел на рабочих органах семяочистительных машин [1, 7, 8, 10], показывает, что аэродинамические силы и моменты, которые действуют на тела (зёрна) в потоке воздуха учитываются не в полной мере.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Улучшение качества разделения семян на виброочистительных машинах путём расчёта коэффициентов аэродинамических сил и моментов, действующих на семена растительных культур в потоке воздуха, методом плоских сечений.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Расчёт аэродинамических сил и моментов, действующих на объёмные тела произвольной формы, сопряжён с рядом трудностей. Как правило, для точной оценки аэродинамических характеристик такого тела, необходимо иметь картину распределения давлений по его поверхности. В свою очередь, распределение давлений получают путём осуществления экспериментальных продувок геометрически подобных тел. Такой подход, когда необходимо проводить предварительные эксперименты по продувке зёрен различной формы, не может рассматриваться в качестве рабочего метода проведения практических расчётов при проектировании зерноочистительных машин.

Однако рядом авторов [4], [11] подчёркивается, что можно без большой потери точности рассчитывать аэродинамические характеристики объёмных тел (коэффициенты подъёмной (поперечной) силы, продольной силы или силы лобового сопротивления, а также продольного момента), приведя картину их объёмного обтекания к совокупности плоских обтеканий сечений данных тел [14]. При этом для каждого плоского сечения тела его аэродинамические коэффициенты определяются на основании результатов продувок аэродинамических профилей с установленными геометрическими характеристиками при заданных критериях подобия  $R_e$  и  $M$  [13].

# РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СЕМЕНА РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР В ПОТОКЕ ВОЗДУХА, МЕТОДОМ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

В качестве геометрических характеристик аэродинамического профиля рассматриваются (рис. 1) [14, 20, 12]:

- хорда профиля  $b$  – линия, соединяющая две наиболее удаленные точки профиля,
  - относительная толщина профиля  $\bar{c} = c/b$  – отношение максимальной толщины профиля  $c$  к длине хорды  $b$ ,
  - относительная кривизна профиля  $\bar{f} = f/b$ , где:  $f$  – кривизна профиля (наибольшая ордината точки, принадлежащей средней линии профиля),
  - относительные абсциссы толщины и кривизны профиля  $\bar{x}_c = x_c/b$ ,  $\bar{x}_f = x_f/b$ , соответственно. Здесь  $x_c$  и  $x_f$  – абсциссы наибольшей толщины профиля и его наибольшей кривизны,
  - относительные радиусы кривизны в «головке» и «хвостовике» профиля  $\bar{r} = r/b$ .
- Часто данные величины выражают в процентах.

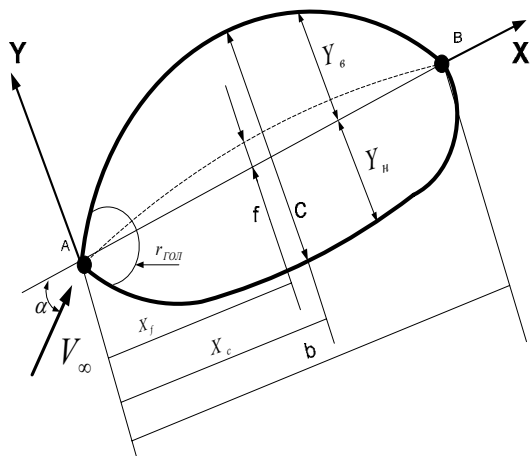


Рис. 1. Геометрические характеристики аэродинамического профиля  
Fig. 1. Geometric characteristics of airfoils

Результаты экспериментальных исследований по коэффициентам аэродинамической силы  $C_{ya}$  и  $C_{xa}$  представляются в виде графиков зависимостей данных коэффициентов от угла атаки профиля при различных относительных геометрических характеристиках рассматриваемого профиля.

График зависимости коэффициента подъемной силы  $C_{ya}$  в зависимости от угла атаки профиля имеет вид, который представлен на

рис. 2 [14].

На прямолинейном участке кривой  $C_{ya} = f(\alpha)$  величина коэффициента подъемной силы определяется уравнением:

$$C_{ya} = C_{ya}^{\alpha} (\alpha - \alpha_0), \quad (1)$$

где:  $C_{ya}^{\alpha}$  – угловой коэффициент прямолинейного участка графика  $C_{ya} = f(\alpha)$ , (рис. 2).

Размер прямолинейного участка графика  $C_{ya} = f(\alpha)$  или величина максимального коэффициента подъемной силы профиля, при котором происходит отрыв потока, изменяется в зависимости от относительной кривизны и относительной абсциссы кривизны рассматриваемого профиля при неизменном критическом угле атаки (рис. 3) [14].

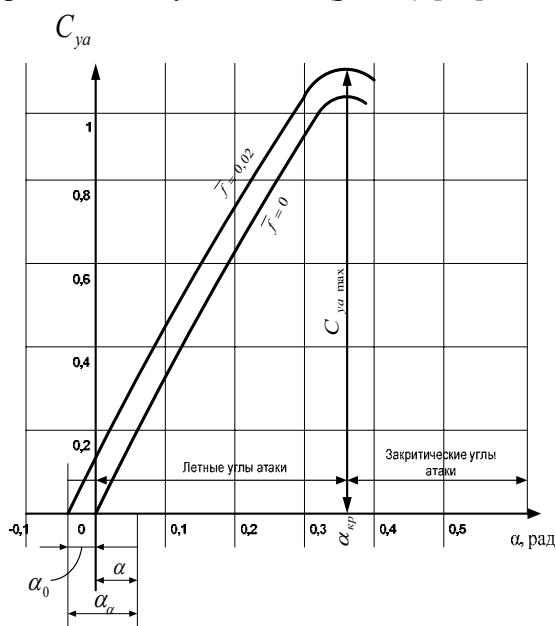


Рис. 2. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки профиля  
Fig. 2. Dependence of coefficient of carrying capacity on the corner of attack of profile

Зависимость коэффициента лобового сопротивления  $C_{xa}$  от угла атаки  $\alpha$  обычно имеет вид параболы (рис. 4) [14]. Сначала  $C_{xa}$  изменяется незначительно, а затем, начиная с углов атаки, несколько меньших, чем  $\alpha_{кр}$ , быстро возрастает. Это обусловлено усилением отрыва пограничного слоя.

Коэффициент аэродинамического момента вычисляется как произведение коэффици-

ента поперечной силы, действующей на профиль, и величины относительной абсциссы центра давления профиля  $C_m = -C_y \bar{x}_D$ . Значение коэффициента  $C_y$  определяется на основании графиков, представленных на рис. 4-6 и соотношений:

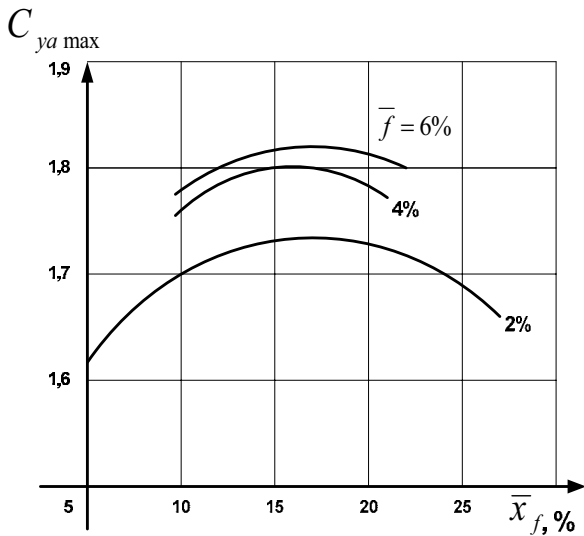


Рис. 3. Изменение коэффициента  $C_{y_{a\max}}$  в зависимости от кривизны профиля  $\bar{f}$  и абсциссы  $\bar{x}_f$

Fig. 3. Change of coefficient  $C_{y_{a\max}}$  depending on curvature of profile  $\bar{f}$  and abscissa  $\bar{x}_f$

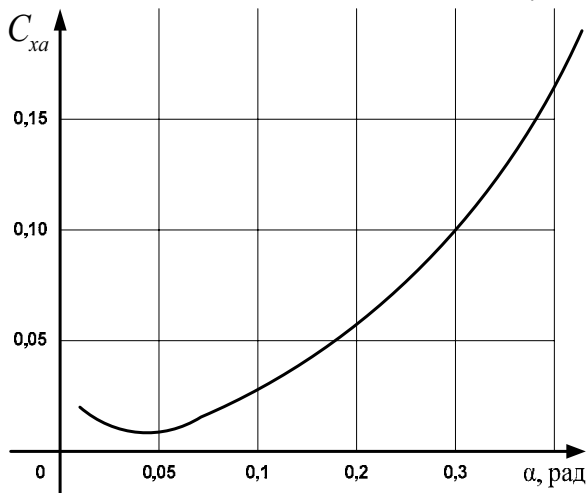


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от угла атаки

Fig. 4. Dependence of coefficient of resistance on the corner of attack

$$\begin{cases} C_y = C_{ya} \cos \alpha + C_{xa} \sin \alpha \\ C_x = -C_{ya} \sin \alpha + C_{xa} \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

Величина  $\bar{x}_D$  определяется на основании ранее полученных результатов продувок аэродинамических профилей при различных углах атаки. Результаты этих продувок представлены в виде графика зависимости  $\bar{x}_D$  от величины угла атаки профиля (рис. 5) [14]. Пунктирной линией обозначены результаты продувок для профилей, имеющих такое распределение давлений по их хорде, которое обуславливает момент аэродинамической силы, направленный на увеличение угла атаки. Сплошной линией – для профилей, имеющих момент аэродинамической силы, направленный на уменьшение угла атаки.

Видно, что при увеличении углов атаки от 0 до  $+\infty$  и для профилей с любым направлением момента от аэродинамической силы происходит приближение значений  $\bar{x}_D$  к величине  $m$ , которая равна 0,25. То есть для большинства расчётных случаев можно принимать, что центр давления располагается на одной четвертой от носика профиля.

С учётом изложенного выше, методика вычисления аэродинамических сил и моментов, действующих на зерно (тело), находящееся в потоке воздуха, может быть представлена как следующая последовательность действий (рис. 6):

1) задаётся (вычисляется) местоположение тела и его мгновенные кинематические параметры (вектор линейной скорости движения центра массы и угловая скорость вращения тела относительно этого же центра). Для известного направления и величины вектора скорости движения потока воздуха в инерциальной системе координат, с учётом пространственного местоположения и мгновенных кинематических параметров тела, определяется величина и направление относительной скорости обтекания тела потоком;

2) с заданным шагом осуществляются последовательные сечения рассматриваемого тела. В результате получают элементарные профили тела. Плоскости, с помощью которых осуществляются сечения тела, параллельны вектору скорости набегающего потока и сориентированы вертикально;

3) для каждого элементарного профиля рассчитываются его геометрические характеристики и угол атаки невозмущённого потока;

**РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОМЕНТОВ,  
ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СЕМЕНА РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР В ПОТОКЕ ВОЗДУХА,  
МЕТОДОМ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ**

4) для известных  $\alpha$ ,  $\bar{f}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\bar{x}_f$  определяется величина коэффициента подъёмной силы  $C_{ya}$  (рис. 2, 3) и силы лобового сопротивления  $C_{xa}$  (рис. 4). Для известных коэффициентов подъёмной силы и силы лобового сопротивления с помощью выражения  $C_{RA} = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} = \sqrt{C_{xa}^2 + C_{ya}^2}$  определяется коэффициент аэродинамической силы  $C_{Ra}$ , действующей на рассматриваемый профиль [6];

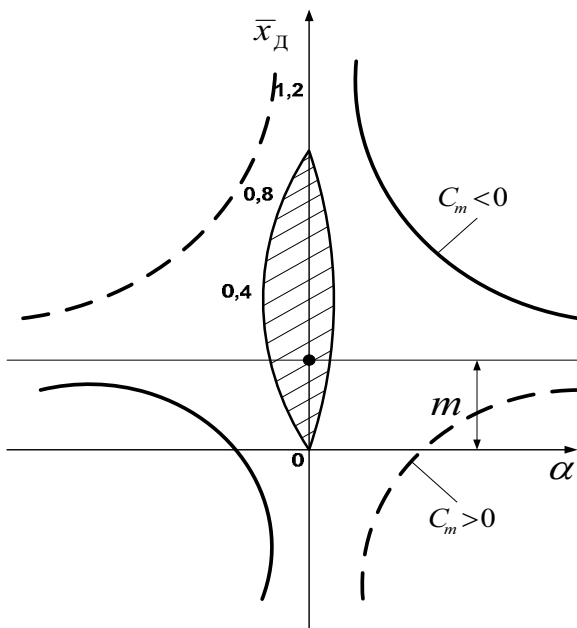


Рис. 5. Изменение коэффициента центра давления в зависимости от аэродинамического угла атаки

Fig. 5. Change of coefficient of center of pressure depending on the aerodynamic corner of attack

5) на основании системы уравнений (2) определяется значение коэффициента поперечной силы  $C_y$  или проекции аэродинамической силы на ось  $Y$  собственной системы координат элементарного профиля;

6) для известного угла атаки  $\alpha$ , на основании графика зависимости абсциссы центра давления профиля от угла  $\alpha$  (рис. 5), определяется величина  $\bar{x}_D$ . При углах атаки больших либо равных 20 градусам принимается, что  $\bar{x}_D = 0,25$ ;

7) для известных  $\bar{x}_D$  и  $C_y$ , на основании

выражения:  $C_m = -C_y \bar{x}_D$ , определяется коэффициент момента аэродинамической силы  $C_m$ ;

8) для известных коэффициентов  $C_{Ra}$  и  $C_m$  рассчитываются величины аэродинамической силы и аэродинамического момента, действующие на рассматриваемый  $i$ -ый элементарный профиль:  $R_{ai} = C_{Rai} \frac{\rho V_\infty^2}{2} S$ ,  $M_{zi} = C_{mi} \frac{\rho V_\infty^2}{2} S b$  [6];

9) результирующая аэродинамической силы и результирующий момент данной силы относительно передней кромки рассматриваемого тела определяются путём суммирования аэродинамических сил и моментов, найденных для элементарных аэродинамических профилей:  $R_{a\Sigma} = \sum_{i=1}^{L/\Delta l} R_{ai}$   $M_{z\Sigma} = \sum_{i=1}^{L/\Delta l} M_{zi}$ , где  $L$  – длина тела вдоль оси, которая перпендикулярна вектору скорости  $V_\infty$ ,  $\Delta l$  – заданный шаг продвижения вдоль оси  $L$  при осуществлении разбивки тела на элементарные сечения (профили).

Таким образом, в статье рассмотрен метод приближённого расчёта аэродинамических сил и моментов, действующих на зерно, которое обдувается потоком воздуха. В силу произвольности формы зёрен, которая имеет место на практике, расчёт аэродинамических сил и моментов на основе использования постоянных аэродинамических коэффициентов будет вносить известную погрешность в результаты исследований. Поэтому в статье рассматривается способ расчёта коэффициентов аэродинамических сил и моментов в зависимости от геометрических характеристик зерна, меняющихся в зависимости от его ориентировки относительно потока воздуха. Для расчёта аэродинамических коэффициентов использован метод разбивки обдуваемого зерна на элементарные аэродинамические профили с помощью плоскостей, сориентированных по потоку воздуха и располагающихся вертикально.

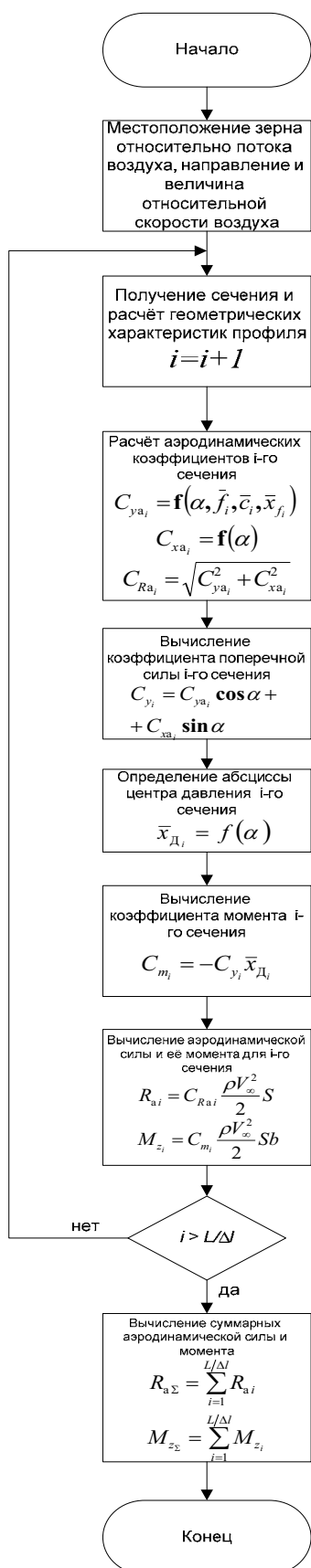


Рис. 6. Алгоритм расчёта аэродинамических сил и моментов методом разбивки зерна на элементарные аэродинамические профили  
 Fig. 6. Algorithm of calculation of aerodynamic forces and moments by the method of laying out of grain on elementary aerodynamic profiles

Для каждого элементарного аэродинамического профиля, получаемого путём сечения рассматриваемого зерна соответствующей плоскостью, рассчитываются коэффициенты подъёмной силы и силы лобового сопротивления (поперечной и продольной сил), аэродинамического момента на основании ранее полученных результатов продувок типовых аэродинамических профилей при их различных относительных геометрических характеристиках. Общая аэродинамическая сила и момент, действующие на зерно в результате его обтекания потоком воздуха, рассчитываются путём суммирования аэродинамических сил и моментов, рассчитанных для элементарных аэродинамических профилей, на которые разбивается зерно (тело).

### ВЫВОДЫ

Предложенный метод целесообразно использовать для учёта аэродинамического влияния движущегося воздуха на кинематические параметры движения зёрен по рабочим поверхностям вибрационных сеяочистительных машин при разделении легко-весных мелкосемянных культур, а также при разработке новых конструкций вибрационных сеяочистительных машин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Avdeev N. E. 1975. Tsentrobezhnii separatori dlya zerna. monografiya – M: Kolos. – 152.
2. Azbel G.G., Blexman I. I. 1981. Vibratsiya v tekhnike. spravochnik v shesti tomakh / G.G. Azbel, – M: Mashinostroenie, t. 4. – 509.
3. Biderman V. L. 1952. Teoriya udara. monografiya. – M : Mashgiz. – 76.
4. Bogomolov A. V. 1984. Obosnovanie parametrov tekhnologicheskogo procesa ochistki I sortirovaniya semyan konopli na vibratsionnoi semyaochistitelnoi mashine. Aftoreferat. Dis. Kand. texn. nauk. – Kharkov, – 24.
5. Boltanskaya N. 2011. Obosnovanie konstruktivno – tekhnologicheskikh parametrov seperariyushix poverkhnostei zgaluziinih reshet zernoy-borochnix kombainov. Motrol. – Motoryzacija I energetyka rolnictva. –Lublin. Tom 13 V. – 111 – 116.
6. Bronshtein I. N., Semendyaev K. A. 1986. Spravochnik po matematike. ychebnoe posobie / I.N. Bronshtein, – M: Nayka. – 544.

РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОМЕНТОВ,  
ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СЕМЕНА РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР В ПОТОКЕ ВОЗДУХА,  
МЕТОДОМ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

7. Byshyev V. Z. 1976. Cemyaochistitelnie mashini. – M. : Nayka.– 225.
8. Gladkov N.G. 1961. Zernoochistitelnie mashini. – M. : Mashgiz. – 362.
9. Goldin A. V. 1976. O vliyanii sredi na process vibracionnogo peremesheniya sipycheho materiala. V Kn. Dinamika, prochnosti nadegnost tractorov i selskoxozyaistvenix mashin. - Sb. n. tr. MIISP. M. , 78 – 83.
10. Goncharevich A. V. 1978. O vliyanii vozdyshnoi sredi na process vibratsionnogo peremesheniya sipycheho materiala. – M. : Nayka, – 160.
11. Kozachenko A. V. 1988. Obosnovanie parametrov texnologicheskogo processa ochistki I sortirovaniya semyan tabaka I maxorky na vibratsionnoi semyaochistitelnoi mashine. Aftoreferat. DisKand. texn. nayk. – Kharkiv. – 21.
12. Krasnov N.F. 1980. Aerodinamika. chast ychebnoe posobie. – M. : Vishaya shkola. – 416.
13. Lukianenko V. M., Nikiforov A. A. 2013. Metod rascheta aerodinamicheskix sil I momentov, deistvyushix na semena rastitelnix kylytur dvygysyhsya po naklonoiv ibriryushei poverxnosti v potoke vozdyxa. Vestnik XNTYSX im. P. Vasilenka. Vipysk 135. – Kharkiv, 392 – 398.
14. Mxitaryan A. M. 1976. Aerodinamika. ychebnoe posobie. – M.:Mashchinstroenie. – 448.
15. Pastyshenko S., Ogienko N. 2012. Teoricheskie aspekty isledovaniya processa separacii texnologicheskoi semennoi massi ovachebaxchevix kylytur. Motrol, – Motoryzacja I energetyka rolnictva. –Lublin. Tom 14. – 13 – 20.
16. Shmits F. V. 1963. Aerodinamika malix skorostei. ychebnoe posobie. – DOSAAV, – 60.
17. Tishchenko L. N., Olshanskii V. P. , Olshanskii S. V. 2010. Hidrodinamika separirovaniya zerna. Monografiya. – Kharkiv. : Miskdryk, – 174.
18. Vasilenko P. M. 1960. Teoriya dvizheniya chastitsi po sheroxovatom poverxnostyam selskoxozyaistvenix mashin. – Kyiv.: Izdatelstvo ykraiynskoi akademii selskoxozyaistvenix nayk. – 283.
19. Zaika P. M. 1998. Vibratsionnoe peremeshchenie tverdix i sipyichix tel v celkoxozyaistvenix mashchinax. prakticheskoe posobie. – K.: YSXA. – 631.
20. Zemlyanskiy A. V. 1983. Aerodinamika izolirovanogo profilya i reshchetki profilei. metodicheskie ykazaniya k laboratornim rabotam po kursy «Gazodinamika lopatochnix mashchin»/A.V. Zemlyanskiy, V.M. Martinov. – M. : MFTY. – 22.

**CALCULATION OF COEFFICIENTS OF  
AERODYNAMIC FORCES AND  
MOMENTS, OPERATING ON SEED OF  
VEGETABLE CULTURES IN BLAST, BY  
METHOD OF FLAT SECTIONS**

**Summary.** In hired the order of calculation of coefficients of aerodynamic forces and moments, operating on the seed of vegetable cultures in a blast, is expounded, by the method of flat sections. The algorithm of calculation of aerodynamic forces and moments is made by the method of laying out of grain on elementary aerodynamic profiles.

**Key words.** Aerodynamic forces, aerodynamic moments, blast, algorithm.