

**В. Ф. Кузьменко, В. В. Максименко, С. Н. Ямпольский**

*Национальный научный центр  
«Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (ННЦ «ИМЭСХ»)  
п. г. т. Глеваха, Киевская обл., Украина  
e-mail: v.v.max@ukr.net*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСКОРИТЕЛЯ МАССЫ КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению затрат удельной энергии ускорителя кормоуборочного комбайна и усилия, создаваемого потоком сырья на щите-улавливателе резаной стеблевой массы. Исследовалось влияние окружной скорости концов лопаток ротора ускорителя, количества лопаток, угла наклона лопаток к радиальному направлению, зазора между кожухом и концами лопаток. Получены зависимости удельных затрат энергии на ускорение резаной массы и усилия на щите-улавливателе от исследуемых факторов – уравнения регрессии в виде полиномов второго порядка.

*Ключевые слова:* комбайн кормоуборочный, ускоритель, удельный расход энергии, подача, усилие, щит-улавливатель, ускорение, резаная стеблевая масса, эксперимент.

**V. F. Kuzmenko, V. V. Maksimenko, S. N. Yampolsky**

*National Scientific Center Institute for Agricultural Engineering and Electrification (NSC «IAEE»)  
Glevaha, Kyiv region, Ukraine  
e-mail: v.v.max@ukr.net*

### **EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF PARAMETERS ACCELERATOR OF MASS OF COMPLETE COMBINE**

The results of experimental studies on determining the costs of the specific energy of the forage harvester accelerator and the effort created by the flow of raw materials on the shield-catcher of the cut stalk mass are presented. The influence of the circumferential velocity of the ends of the rotor blades of the accelerator, the number of blades, the angle of inclination of the blades to the radial direction, the gap between the casing and the ends of the blades was investigated. Dependences of the specific energy consumption on the acceleration of the cut mass and the forces on the shield-catcher from the factors studied are obtained – the regression equations in the form of second-order polynomials.

*Keywords:* forage harvester, accelerator, specific energy consumption, feed, force, shield-catcher, acceleration, cut stem mass, experiment.

### **Постановка проблемы**

При работе современных кормоуборочных комбайнов резаная масса после прохождения доизмельчающих валцов попадает на лопатки ускорителя, ее движение упорядочивается и ускоряется. Далее, двигаясь по транспортировочному каналу и по воздуху, она попадает в кузов транспортного средства. Проблема заключается в уточнении энергетического баланса рабочих органов комбайна, а именно в определении расхода энергии, потребляемой ускорителем комбайна, и усилия, создаваемого потоком резаной массы после прохождения ею ускорителя на щите-улавливателе [1, 2, 3, 4].

### **Анализ и методика проведения исследований**

Известны исследования метателей с осевой подачей сырья, однако схемы с тангенциальной подачей резаной массы, используемой в кормоуборочных комбайнах [2, 3, 5, 6], не исследованы.

Исследования проводились экспериментально [7, 8], путем одновременного определения мощности, потребляемой ускорителем резаной массы, усилия на щите и подачи.

Удельный расход энергии  $E_n$  рассчитывали по известной зависимости:

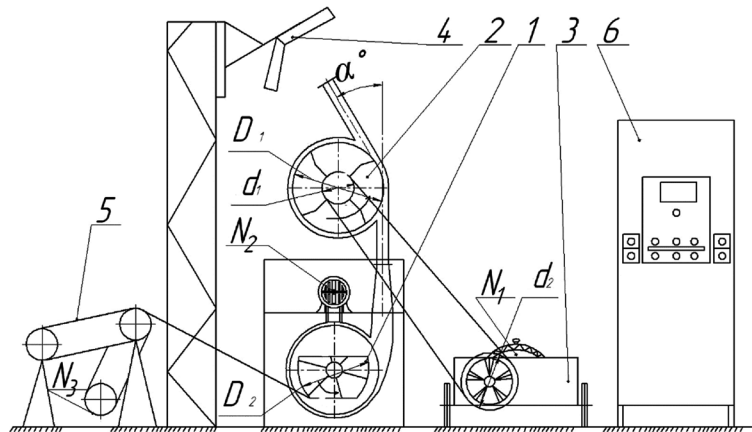
$$E_n = \frac{N}{\Pi}, \text{ Дж/кг,}$$

где  $N$  – мощность, потребляемая ускорителем резаной массы, Вт;

$\Pi$  – подача массы к питающему ротору-барабану, кг/с.

Мощность  $N$  и подача  $\Pi$  определялись экспериментально с использованием установки (рисунок 1). Принцип действия установки и основные ее характеристики приведены в [4, 9, 10].

При работе установки через приемную горловину кожуха ротора-барабана 1 масса подавалась на его лопатки, которыми после ее предварительного разгона через вертикальный выгрузной дефлектор направлялась в ускоритель 2. Окружная скорость концов лопаток ротора-барабана 1 составляет 32,4 м/с.



1 – барабан; 2 – ускоритель; 3 – вариатор; 4 – щит-улавливатель; 5 – транспортер; 6 – шкаф управления

Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки

Попадая в зону действия лопаток ускорителя 2, которая характеризуется размерами сечения и углом между осями входного и выходного каналов, поток массы направлялся на щит-улавливатель 4, приемная плоскость которого установлена перпендикулярно направлению потока. После взаимодействия со щитом и отражения от приемной плоскости резаная масса накапливалась под щитом-улавливателем.

При работе с установкой следует убедиться в отсутствии посторонних предметов на ней, исправности механизмов, электропривода [11], регистрирующей аппаратуры, надежности заземления и соблюдать требования правил индивидуальной защиты и техники безопасности [12].

Для определения усилия на приемной плоскости щита-улавливателя 4 было использовано тензозвено, которое представляет собой плоскую балку с наклеенными на ней тензометрическими сопротивлениями номиналом 100 Ом – по две с каждой стороны балки. Сопротивления соединены в мостовую схему. Источник, использовавшийся для питания моста (Lab Tools 15V 30A), настроили на напряжение 12 В.

Для записи сигнала с моста использовался ПК с АЦП (аналого-цифровым преобразователем E14-140-M-D) и соответствующим программным обеспечением.

Перед началом работы после установки щита-улавливателя тензозвено было тарировано. Особенность тарирования – соединение тяги с поверхностью по центру следа взаимодействия и в направлении движения потока массы. Полученная в результате тарировки зависимость представлена на рисунке 2.

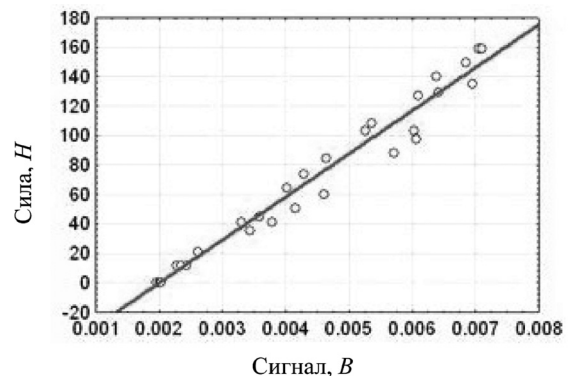


Рисунок 2. – Тарировочный график тензозвена щита-улавливателя

Усилие, создаваемое на приемной поверхности щита-улавливателя, определялось по величине сигнала, формируемого тензозвеном по линейной зависимости:

$$F_{щ} = -58,7749 + 29261,3054 \times U_{щ},$$

где  $U_{щ}$  – сигнал,  $B$ .

После проведения анализа предыдущих исследований [2, 3, 4, 5, 6, 9] в качестве исследуемых факторов приняты [13, 14]:

- окружная скорость концов лопаток,  $v$ ,  $м/с$ ;
- количество лопаток,  $n$ ,  $шт.$ ;
- угол наклона лопаток к радиальному направлению,  $\alpha$ ,  $град.$ ;
- зазор между кожухом и концами лопаток,  $\Delta$ ,  $мм$ .

Используя сигнал, полученный со щита-улавливателя, характеризующий усилие, создаваемое на приемной поверхности по закону сохранения импульса силы, можно определить скорость столкновения массы:

$$\Delta v = k \times \frac{p \times \Delta t}{m}, \text{ м/с},$$

где  $\Delta v$  – скорость взаимодействия потока с поверхностью,  $м/с$ ;

$0 < k < 1$ , коэффициент, учитывающий уменьшение силового воздействия потока массы на плоскость;

$p$  – усилие на приемной поверхности,  $H$ ;

$\Delta t$  – время взаимодействия,  $с$ ;

$m$  – масса материала, которая взаимодействует за время  $t$ ,  $кг$ .

Критерием оптимизации является минимум затрат удельной энергии на ускорение резаной стеблевой массы  $E_n$  ( $Дж/кг$ ) и усилие на щите-улавливателе  $F_{щ}$  ( $H$ ).

Обозначения факторов, уровни и интервалы их варьирования [14] приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Уровень варьирования факторов	Исследуемые факторы			
	Скорость круговая, $м/с$ , ( $x_1$ )	Количество лопаток, $шт.$ , ( $x_2$ )	Угол установки лопаток к радиальному направлению, $град.$ , ( $x_3$ )	Зазор в зоне ускорения, $мм$ , ( $x_4$ )
Верхний (+)	55	6	+15	10
Нулевой (0)	45	4	0	6
Нижний (–)	35	2	–15	2
Интервал варьирования	10	2	15	4

При проведении исследований был использован план Бокса ( $B_4$ ) [14]. Исследования проводились на резаной массе кукурузы со средневзвешенной длиной резки 13,1  $мм$ , влажностью 70,32 %, при укладке на 1  $м$  транспортера порции массой 33  $кг$ .

*Цель исследований.* Экспериментально определить влияние конструкционных параметров ускорителя резаной массы комбайна на расход удельной энергии и создание усилия на щите-улавливателе.

*Методы.* Исследования проводились экспериментально путем определения затрат удельной энергии ускорителя, усилия, создаваемого на щите-улавливателе, и подачи резаной стеблевой массы. Обработка результатов проводилась с использованием методов регрессионного анализа и математической статистики.

*Результаты.* Обработка экспериментальных данных была проведена с помощью программного обеспечения Microsoft Excel, RegMod, Wolfram Mathematica. После обработки результатов четырехфакторного эксперимента были получены зависимости удельных затрат энергии на ускорение резаной массы и усилия на щите-улавливателе от исследуемых факторов – уравнения регрессии в виде полиномов второго порядка.

В закодированном виде расход удельной энергии ускорителем  $E_n$  (Дж/кг) определяется зависимостью:

$$E_n = 0,13317 + 0,05070x_1 + 0,00563x_1^2 + 0,06231x_2 + 0,08560x_3 + \\ + 0,02087x_1x_3 - 0,00417x_2x_3 - 0,03633x_4 + 0,03994x_4^2.$$

Наибольшим по величине является коэффициент при  $x_3$  – угле установки лопатки. Этот параметр оказывает наибольшее воздействие на изменение удельных затрат энергии при работе ускорителя массы.

Для раскодирования зависимости (1) и получения уравнения регрессии в натуральном виде использованы соотношения [6]:

$$x_1 = (v - 45)/10; \quad x_2 = (n - 4)/2; \quad x_3 = (\alpha - 0)/15; \quad x_4 = (\Delta - 6)/4. \quad (2)$$

После подстановки соотношений (2) в уравнение (1) получаем уравнение регрессии удельного расхода энергии в расшифрованной виде:

$$E_n = 0,0388299 + 0,0311599n - 0,0390452\Delta + 0,0000563v^2 + \\ + 0,0001392v\alpha - 0,0001392n\alpha + 0,0024968\Delta^2,$$

где  $v$  – окружная скорость концов лопаток, м/с;

$\alpha$  – угол наклона лопаток к радиальному направлению, град.;

$n$  – количество лопаток, шт.;

$\Delta$  – зазор между кожухом и концами лопаток, мм.

Для зависимостей (1), (3), которые являются адекватными на 95 % на уровне доверительной вероятности, коэффициент множественной детерминации составляет  $D = 0,950085$ . Значение критерия Фишера  $F = 53,9303$ , что больше табличного значения. Все коэффициенты модели являются значимыми на уровне доверительной вероятности не менее 95 %.

Для наглядного анализа влияния параметров на удельные энергозатраты построены трехмерные поверхности. Для этого строились зависимости от параметров уравнения регрессии, возведенных в квадрат ( $\Delta$ ,  $v$ ) и влияющих линейно ( $\alpha$ ,  $n$ ).

Понятно, что в первом случае поверхности будут криволинейными (рисунок 3). Зазор  $\Delta$  действует на смену удельных затрат энергии эффективнее, чем окружная скорость концов лопаток.

Это объясняется тем, что коэффициенты при членах нераскодированного уравнения регрессии отличаются на порядок, причем большее значение коэффициента – при зазоре  $\Delta$ . Увеличение окружной скорости концов лопаток ускорителя в пределах исследуемых скоростей (35–55 м/с) приводит лишь к монотонному увеличению расходов удельной энергии по параболической кривой, зоны экстремума отсутствуют.

Увеличение зазора до 7 мм в пределах 2–10 мм приводит к уменьшению удельных затрат энергии. При достижении минимума при 7–9 мм зазора дальнейшее его увеличение приводит к увеличению удельных энергозатрат. Таким образом, в зоне исследований наблюдается экстремум при зазоре 7–9 мм.

Зависимость затрат энергии от угла отклонения лопатки от радиального направления и их количества при зазоре 6 мм и скоростях концов лопаток 35, 45, 55 м/с представлена тремя плоскими поверхностями, расположенными одна над другой (рисунок 4).

Увеличение количества лопаток с 2 до 6 шт. и угла отклонения в пределах от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$  от радиального направления приводит к равномерному увеличению удельных затрат энергии на ускорение массы. Поэтому при  $\alpha = -15^\circ$ ,  $n = 2$  шт. достигается  $E_n = 0,03$ – $0,08$  Дж/кг – минимум затрат удельной энергии ускорителем в пределах зоны изменения исследуемых параметров.

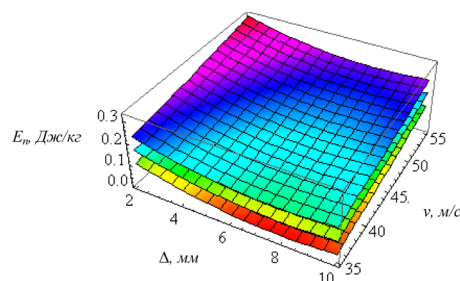


Рисунок 3. – Влияние зазора  $\Delta$  и окружной скорости  $v$  на расход удельной энергии  $E_n$  при количестве лопаток  $n$  2, 4 и 6 шт. (соответственно нижняя, средняя и верхняя поверхности)

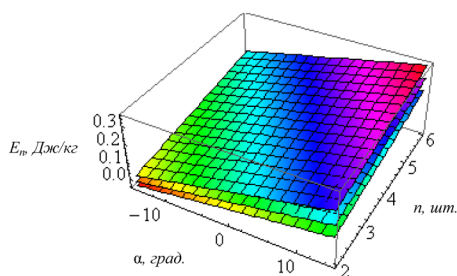


Рисунок 4. – Влияние угла наклона лопаток  $\alpha$  и количества лопаток  $n$  на потребление удельной энергии  $E_n$  при окружной скорости концов лопаток  $v$  35, 45 и 55 м/с (соответственно нижняя, средняя и верхняя поверхности)

При максимальных значениях анализируемых параметров  $\alpha = 15^\circ$ ,  $n = 6$  шт. удельные затраты энергии достигают максимального значения  $E_n = 0,15\text{--}0,30$  Дж/кг, что в 3,8–5,0 раз больше минимальных значений.

Усилие на щите-улавливателе характеризует скорость выбрасывания массы и является показателем качества процесса ускорения.

В закодированном виде усилие на щите-улавливателе, создаваемое ускорителем  $F_{щ}$  (Н), определяется зависимостью:

$$F_{щ} = 51,8585 + 1,3377x_1 + 16,9083x_1^2 + 11,5875x_2 - 4,35668x_2^2 - 16,4968x_3 - 8,24838x_2x_3 - 7,01294x_4 - 2,33765x_4^2.$$

Наибольшими по величине и близкими по значению являются коэффициенты при квадрате скорости  $x_1$  и угле установки лопатки  $x_3$ . Квадрат скорости оказывает наибольшее воздействие на изменение усилия на щите-улавливателе. Действие квадрата скорости однозначно, и ее увеличение приводит к увеличению усилия на щите-улавливателе. Угол отклонения лопатки от радиального может принимать как положительные, так и отрицательные значения (таблица 1), поэтому угол наклона лопатки может как уменьшать (при отклонении вперед), так и увеличивать (при отклонении назад) усилие на щите-улавливателе.

После подстановки соотношений (2) в уравнение (4) получаем уравнение регрессии усилия на щите-улавливателе в расшифрованном виде:

$$F_{щ} = 352,89 - 15,0837v + 14,5071n + 0,169083v^2 - 1,08917n^2 - 0,274946n\alpha - 0,146103\Delta^2. \quad (5)$$

Для зависимостей (4), (5), которые являются адекватными на 95 % на уровне доверительной вероятности, коэффициент множественной детерминации составляет  $D = 0,950764$ . Значение критерия Фишера  $F = 54,7129$ , что больше табличного значения. Все коэффициенты модели являются значимыми на уровне доверительной вероятности не менее 95 %.

Для облегчения анализа влияния параметров на усилие на щите-улавливателе построены трехмерные поверхности (рисунок 5, 6).

Видим, что действие скорости имеет в исследуемой зоне минимум, что достигается при скорости концов лопаток ускорителя 44–46 м/с. Это объясняется тем, что кроме упорядочивания движения частиц резаной стеблевой массы происходит взаимодействие воздушных потоков, которые образуются с разгоном массы. Усилие на щите-улавливателе в зависимости от зазора мо-

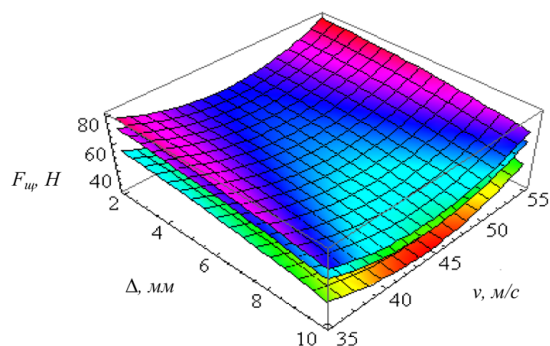


Рисунок 5. – Влияние зазора  $\Delta$  и окружной скорости  $v$  на усилие на щите-улавливателе  $F_{щ}$  при количестве лопаток  $n$  2, 4 и 6 шт. (соответственно нижняя, средняя и верхняя поверхности)

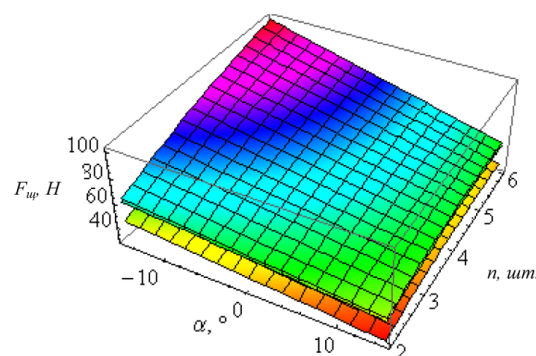


Рисунок 6. – Влияние угла наклона лопаток  $\alpha$  и количества лопаток  $n$  на усилие на щите-улавливателе  $F_{щ}$  при окружной скорости концов лопаток  $v$  35, 45 и 55 м/с (соответственно нижняя, средняя и верхняя поверхности)



нотонно уменшається по параболической зависимости. Экстремум в исследуемой зоне отсутствует. Отклонение лопатки от радиального направления вперед линейно уменьшает усилие на щите-улавливателе, а увеличение количества лопаток на ускорителе несколько увеличивает усилие выброса массы.

### Выводы

Выбирая параметры ускорителя, следует ориентироваться на минимальные затраты энергии и максимальное усилие, создаваемое на щите-улавливателе.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что из исследуемых конструкционных параметров ( $v$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\Delta$ ) при минимизации удельного расхода энергии наиболее весомым является зазор  $\Delta$  между концами лопаток и кожухом ускорителя, а при оптимизации усилия на щите-улавливателе – скорость концов лопаток  $v$  и угол установки лопатки относительно радиального направления  $\alpha$ . Зависимости окружной скорости концов лопаток  $v$  и зазора  $\Delta$  между лопатками и кожухом в обоих случаях имеют параболический характер, а угол наклона лопаток  $\alpha$  к радиальному направлению и их количество  $n$  – линейный. Минимальные удельные затраты энергии и максимальное усилие на щите-улавливателе в пределах исследуемых параметров достигаются при  $v = 37\text{--}40$  м/с,  $n = 4\text{--}6$  шт.,  $\alpha = 0 \dots -5^\circ$ ,  $\Delta = 7\text{--}9$  мм.

Для работы при обкашивании полей и прокосах загонок следует предусмотреть возможность увеличения скорости концов лопаток ускорителя до  $v = 53\text{--}55$  м/с и уменьшение зазора до  $\Delta = 2$  мм.

### Литература

1. Адамчук, В. В. Перспективи розвитку і застосування у сільському господарстві сучасних високотехнологічних засобів / В. В. Адамчук, В. М. Булгаков, І. В. Гриник // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки та технологій для сільського господарства України: Зб. наук. праць. / УкрНДІПВТ ім. Леоніда Погорілого. – Дослідницьке, 2013. – Вип. 17 (31). – С. 22–33.
2. Кузьменко, В. Ф. Аналіз схем сучасних кормозбиральних комбайнів та особливості їх конструкцій / В. Ф. Кузьменко, В. В. Максименко, С. М. Ямпольський // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха, 2010. – Вип. 94. – С. 279–287.
3. Чепурной, А. И. Перспективные кормоуборочные комбайны и технологии / А. И. Чепурной, В. В. Козлов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 6. – С. 14–18.
4. Кузьменко, В. Ф. Основні параметри прискорювачів кормозбиральних комбайнів / В. Ф. Кузьменко, В. В. Максименко, С. М. Ямпольський // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха, 2012. – Випуск 96. – С. 328–334.
5. Особов, В. И. Тенденции развития самоходных кормоуборочных комбайнов / В. И. Особов // Техника и оборудование для села. – 2002. – № 10. – С. 28–33.
6. Осьмак, В. Я. Класифікація та прогноз розвитку конструкцій кормозбиральних комбайнів / В. Я. Осьмак, І. В. Качан // Зб. наук. праць УкрНДІПВТ. – Дослідницьке, 2003. – Вип. 6 (20), кн. 2. – С. 250–254.
7. Афанасьева, Н. Ю. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента / Н. Ю. Афанасьева. – М.: КноРус, 2010. – 330 с.
8. Пальчевский, Б. А. Научное исследование: объект, направление, метод / Б. А. Пальчевский. – Львов: Вища школа, 1979. – 180 с.
9. Кузьменко, В. Ф. Методика проведення експериментальних досліджень прискорювача потоку різаної маси / В. Ф. Кузьменко, В. В. Максименко, С. М. Ямпольський // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – Вип. 19 (33). – Дослідницьке, 2015. – С. 426–435.
10. Кузьменко, В. Ф. Взаємодія лопаток прискорювача з частками різаної маси в транспортувальному каналі кормозбирального комбайна / В. Ф. Кузьменко, В. В. Максименко, С. М. Ямпольський // Матеріали І-ї науково-технічної інтернет-конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». – Глеваха, 2012. – С. 16.
11. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок. Наказ, Правила від 06.10.1997 № 257 (Статус: Чинний). – 7 с.
12. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація: ДСТУ 7239:2011. – Введ. 02.02.2011. – К.: Держспоживстандарт України, 2011.
13. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 276 с.
14. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М.: Металлургия, 1968. – 155 с.