

УДК 620.163.45:631.363.2

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДБРАСЫВАЮЩЕГО
БАРАБАНА СЕПАРАТОРА ЛИСТОВОЙ ЧАСТИ ТРАВ**

Д.Т. Абилжанов, А.С. Адильшеев, Г.А. Шабикова, Т. Абилжанулы

Разработан способ приготовления витаминно-травяной муки (ВТМ) из листовой части трав. Разработана линия для приготовления ВТМ. Получено аналитическое выражение, обеспечивающее определение частоты вращения подбрасывающего барабана сепаратора. Методом многофакторного эксперимента определены оптимальные значения частоты вращения подбрасывающего барабана $n_p = 70 \text{ мин}^{-1}$ и количество рядов пальцев $K_{рп} = 1$ шт.

Ключевые слова: линия для приготовления витаминно-травяной муки; подбрасывающий барабан; частота вращения подбрасывающего барабана; сепаратор листовой части трав.

**ЧӨПТҮН ЖАЛБЫРАК БӨЛҮГҮНҮН СЕПАРАТОРУНУН ЫРГЫТУУЧУ
БАРАБАНЫНЫН ПАРАМЕТРЛЕРИН НЕГИЗДӨӨ**

Д.Т. Абилжанов, А.С. Адильшеев, Г.А. Шабикова, Т. Абилжанулы

Макалада чөптүн жалбырак бөлүгүнөн витаминдүү чөп унун даярдоонун ыкмасы берилген. Бул ыкманы ишке ашыруу үчүн витаминдүү чөп унун даярдоочу линия иштелип чыккан. Теориялык изилдөөлөрдүн натыйжасында сепаратордун ыргытуучу барабанынын айлануу жыштыгын аныктоонун аналитикалык туюнтмасы алынган. Көп факторлуу эксперимент методу менен, ыргытуучу барабандын айлануу жыштыгынын оптималдуу көрсөткүчү $n_p = 70 \text{ мин}^{-1}$ жана бармакчалардын огунун саны $K_{рп} = 1$ даана аныктаган.

Түйүндүү сөздөр: витаминдүү чөп унун даярдоочу линия; ыргытуучу барабан; ыргытуучу барабандын айлануу жыштыгы; чөптүн жалбырак бөлүгүнүн сепаратору.

**SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF THE TOSSING DRUM
OF SEPARATOR SHEET PART OF THE HERBS**

D.T. Abilzhanov, A.S. Adilsheev, G.A. Shabikova, T. Abilzhanuly

The article provides information about the developed method of preparing vitamin-herbal flour (TMV) from the leaf part of the grass. For the implementation of the method developed line for the preparation of VHF. As a result of theoretical studies, an analytical expression has been obtained that provides the determination of the frequency of rotational speed of the tossing drum of separator. As a result of experimental studies conducted by the method of a multifactor experiment, identified the optimum values of the frequency of rotation of the throwing drum $P_d = 70 \text{ min}^{-1}$ and the number of rows of the fingers $n_{RF} = 1$ pc.

Keywords: a line for the preparation of vitamin-grass meal; tossing drum; tossing drum rotation frequency; separator of the leaf part of the herbs.

Введение. Известно, что полнорационная кормосмесь для крупного рогатого скота (КРС) и овец состоит из грубых кормов, силоса или сенажа и комбикормов. Для всех видов животных, птиц и зверей имеются различные рецепты комбикормов.

В настоящее время агроформирования республики стараются произвести приготовление комбикормов сами, из компонентов, имеющихся в своем хозяйстве. Однако приготовление полнорационных комбикормов для животных и птиц сдерживается нехваткой витаминно-травяной

муки. Это связано с тем, что для обогащения корма витаминами и каротином необходимо во все рецепты комбикормов включать витаминно-травяную муку (ВТМ).

Приготовление ВТМ осуществляется из люцернового сена, для этого свежескошенная трава высушивается высокотемпературной сушкой и измельчается в муку. Однако способ высокотемпературной сушки является очень дорогим и многозатратным. Например, на агрегатах типа АВМ для приготовления 1 т ВТМ расходуется 200–250 литров дизтоплива [1], поэтому приготовление ВТМ в условиях крестьянских хозяйств не используется.

Приготовление ВТМ из листовой части трав позволяет увеличить содержание каротина и витаминов, так как разница содержания каротина в листовой части трав в 10–12 раз больше, чем в стеблевой части [2]. Поэтому разработка низкотратной технологии и технических средств для приготовления ВТМ из листовой части трав является решением актуальной задачи сельского хозяйства.

Материалы и методы исследования. Для снижения стоимости и удельных эксплуатационных затрат процессов приготовления ВТМ авторами предложен способ, заключающийся в том, что основная сушка скошенной травы до влажности 30–35 % осуществляется на прокосье, а окончательная сушка до влажности 14–16 % – на малогабаритном подстожном канале без подогрева воздуха. Далее высушенная масса подается в безрешетный измельчитель для предварительного измельчения. При этом листовая часть растений мелко измельчается до длины резки 10–15 мм, а стеблевая часть измельчается крупно, длиной более 20 мм. Из предварительно измельченного сена специальным сепаратором отделяется листовая часть и подается в дробилку для получения муки [3].

В процессе работы предварительно измельченная масса поступает на решето сепаратора. Если на решето поступает толстый слой предварительно измельченной массы, то из верхней части толстого слоя может не выделиться определенная листовая часть сена. Для полного выделения листовой части сена на сепараторе установлен специальный пальцевый подбрасывающий барабан. Если на поверхности решета движется толстый слой, масса подбрасывается

вперед, разрыхляется и обеспечивается полное выделение листовой части сена. Для обоснования параметров подбрасывающего барабана были проведены теоретические исследования по методу силового анализа, а также экспериментальные исследования по методу многофакторного эксперимента.

Результаты и их обсуждение. В 2012–2014 гг. при финансировании МОН РК был разработан экспериментальный образец линии приготовления ВТМ из листовой части трав. Конструктивно-технологическая схема линии приведена в работе [4].

Основная производительность линии зависит от работы сепаратора листовой части трав. Проведено обоснование основных параметров сепаратора листовой части трав из предварительно измельченного сена [5, 6]. В ходе исследований были определены основные недостатки работы сепаратора. Если на решето сепаратора поступает толстый слой предварительно измельченного сена, тогда листовая часть сена, находящаяся в верхней части сена, не выделяется сепаратором. Поэтому для устранения этого недостатка был установлен подбрасывающий барабан, обеспечивающий снижение толщины перемешиваемого слоя по поверхности решета.

При перемещении толстого слоя по поверхности решета, пальцы барабана подбрасывают массу из толстого слоя вперед и его разрыхляют, т. е. обеспечивают полную сепарацию листовой части из предварительно измельченного слоя. При этом большое значение имеет частота вращения пальцевого барабана. Если частота его вращения высокая, то предварительно измельченная масса перебрасывается через барабан таким же толстым слоем, т. е. данное явление не способствует выполнению поставленной задачи.

При медленном вращении подбрасывающего барабана, т. е. до подхода ряда пальцев к подбрасыванию слоя, может пройти значительная часть толстого слоя и это не обеспечивает полное выделение листовой части трав. Поэтому определение оптимальной частоты вращения барабана обеспечивает полное выделение листовой части трав и повышение производительности линии приготовления ВТМ.

На рисунке 1 показаны силы, действующие на стебель, находящийся на поверхности пальца.

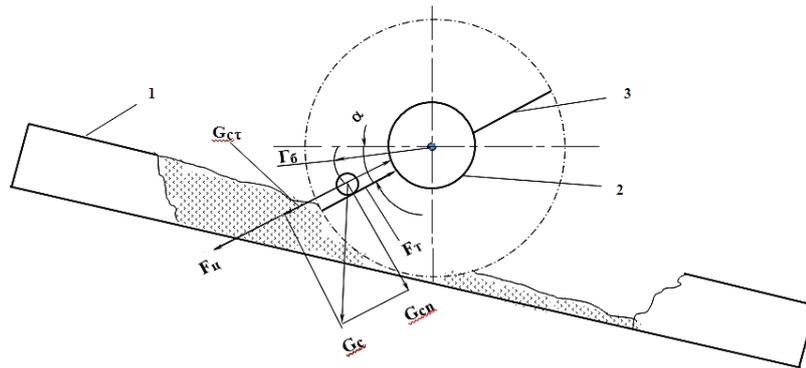


Рисунок 1 – Силы, действующие на стебель при подбрасывании его пальцами барабана:
1 – решето; 2 – барабан; 3 – ряд пальцев

Для свободного соскальзывания стебля с поверхности пальца необходимо соблюдать условие:

$$F_{ц} + G_{ct} \geq G_{cn} f_T, \quad (1)$$

где $F_{ц}$ – сила инерции, Н; G_{cn} – нормальная составляющая силы тяжести стебля, Н; G_{ct} – тангенциальная составляющая силы тяжести стебля, Н.

Подставляя значения сил в формулу, получим:

$$\begin{aligned} m_c + \omega_0^2 + m_c g \sin \alpha &\geq m_c g \cos \alpha f_T, \\ \frac{\pi^2 n_0^2}{900} r_0 + g \sin \alpha &\geq g \cos \alpha f_T, \\ \pi^2 n_0^2 r_0 &\geq (g \cos \alpha f_T - g \sin \alpha) 900, \\ n_0^2 &\geq \frac{900 g (\cos \alpha f_T - \sin \alpha)}{\pi^2 r_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_c – масса стебля, кг; n_0 – частота вращения барабана, мин^{-1} ; r_0 – радиус пальца до центра тяжести стебля, м.

Для определения минимальной частоты вращения барабана будем считать, что стебли должны соскальзывать с поверхности пальцев при угле $\alpha = 0^\circ$, т. е. самое удобное положение пальца для соскальзывания стеблей с его поверхности – в начале третьей четверти окружности пальцевого барабана. Если пальцы будут поднимать массу и при этом происходит перебрасывание сена через пальцевый барабан, то происходит нарушение технологического процесса разрыхления плотного слоя, перемещаемого по поверхности решета.

Таким образом, при угле $\alpha = 0^\circ$ формула (2) получает следующий вид:

$$n = \sqrt{\frac{900 g f_T}{\pi^2 r_0}}. \quad (3)$$

Данное значение частоты вращения является минимальным для соскальзывания стеблей с поверхности пальцев с определенной скоростью и не слишком высокой. Исходя из этого, действительная частота вращения пальцевого барабана определяется по формуле:

$$n_0 = 1,2 \sqrt{\frac{900 g f_T}{\pi^2 r_0}}. \quad (4)$$

Эксперименты показали, что при угле 29–30° стебли соскальзывают с металлической поверхности с $f_T = 0,58$, $r_0 = 0,15$ м, при этом частота вращения барабана равна 70,6 мин^{-1} .

Однако данную частоту вращения подбрасывающего барабана необходимо проверить экспериментально. Здесь на процесс подбрасывания толстого слоя предварительно измельченного сена оказывает влияние количество рядов пальцев, поэтому необходимо определить совместное влияние этих двух факторов на производительность сепаратора листовой части трав. Было принято решение провести экспериментальные исследования по методу планирования многофакторных экспериментов.

При этом для подачи предварительно измельченного люцернового сена использовали трехметровый ленточный транспортер и сепаратор листовой части трав с подбрасывающим барабаном (рисунок 2).

Таблица 1 – Натуральные и кодированные значения факторов

Обозначение факторов	Наименование факторов	Кодированные (натуральные) значения факторов		
		-1 (35)	0 (70)	+1 (105)
X_1	Частота вращения подбрасывающего барабана (мин^{-1})	-1 (35)	0 (70)	+1 (105)
X_2	Количество рядов пальцев (шт)	-1 (1)	0 (2)	+1 (3)



Рисунок 2 – Экспериментальная установка, состоящая из ленточного транспортера и сепаратора листовой части трав с подбрасывающим барабаном

Результаты теоретических исследований показали, что рациональное значение частоты вращения подбрасывающего барабана должно быть равно $70,6 \text{ мин}^{-1}$, поэтому поиск оптимальных значений частоты вращения барабана должен быть около этих теоретических значений.

Результаты ранее проведенных экспериментальных исследований показали, что скорость движения массы по поверхности решета составляет около $0,2 \text{ м/с}$, при данной скорости перемещения измельченной массы, по-видимому, количество рядов пальцев должно быть в пределах 1–3.

Для проведения эксперимента были выбраны ортогональный центрально-композиционный план [7, 8] и кодированные уровни факторов. Для двух факторов опыты проводили на трех уровнях. Натуральные и кодированные значения факторов приведены в таблице 1.

Параметром оптимизации является производительность сепаратора по выделению листовой части трав. На каждом опыте на каждый метр транспортёра раскладывали 1 кг измельченного сена, т. е. во всех опытах про-

изводительность подачи массы на сепаратор была одинаковой. Скорость ленты транспортера – $0,87 \text{ м/с}$. Для определения эффективности работы подбрасывающего барабана и для перемещения массы по решету сепаратора довольно толстым слоем была выбрана именно такая подача. Время работы сепаратора определяли секундомером. Массу просеянной листовой части определяли электронным динамометром.

В ходе эксперимента обозначения “+” или “-” означали, что в данном опыте значения факторов были на уровне +1 или -1. Например, в первом опыте для факторов X_1 и X_2 плюсовые уровни, т. е. частота вращения барабана была 105 мин^{-1} и количество рядов пальцев – 3 шт. Изменение частоты вращения барабана было осуществлено заменой звездочек. Для изменения количества рядов пальцев были изготовлены отдельные ряды пальцев. Пальцы длиной 100 мм диаметром 10 мм были приварены к железной полосе шириной 40 мм, толщиной 4 мм и длиной 600 мм, с шагом 50 мм. Данный шаг был выбран потому, что максимальный размер измельченных стебельных кормов был равен примерно 100 мм.

Для точности проведения экспериментальных исследований вся измельченная масса была пропущена через сепаратор, и были заранее выделены листовая и стеблевая части предварительно измельченного люцернового сена. Для повышения точности экспериментальных исследований на каждый метр транспортера было разложено $0,5 \text{ кг}$ листовой части и $0,5 \text{ кг}$ стеблевой части.

Определение производительности сепаратора было осуществлено взвешиванием просеянной массы, а время работы сепаратора определено секундомером.

Для проведения эксперимента был выбран ортогональный центрально-полноценный план. Одним из преимуществ данного плана является то, что величина “звездного” плеча равна 1, т. е. во время эксперимента опыты будут проведены на трех уровнях.

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента и результаты экспериментальных исследований

№	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	$X_1^2 - \frac{2}{3}$	$X_2^2 - \frac{2}{3}$	$Q_{\Sigma, \text{кр}/4}$	Q_p
1.	+	+	+	+	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	285	291
2.	+	-	+	+	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	257	253
3.	+	+	-	-	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	304	305
4.	+	-	-	+	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	291	282
5.	+	+	0	0	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	288	296
6.	+	-	0	0	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	265	265
7.	+	0	+	0	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	328	326
8.	+	0	-	0	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	339	347
9.	+	0	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	342	335

В таблице 2 приведен план эксперимента и результаты экспериментальных исследований.

В результате обработки опытных данных получено уравнение регрессии:

$$Q_p = 334,7 + 15,3X_1 - 10,67X_2 + 3,75X_1X_2 - 54,3X_1^2 + 2,33X_2^2. \quad (5)$$

При этом дисперсия параметра оптимизации:

$$S_{Q_0}^2 = 33,5.$$

Для определения значимости коэффициентов регрессии вычисляли дисперсию коэффициентов регрессии:

$$S_{\{b_i\}} = \pm \sqrt{\frac{S_{Q_0}^2}{N}} = \pm \sqrt{\frac{33,5}{9}} = 1,93. \quad (6)$$

Доверительный интервал для коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm t_S S_{\{b_i\}} = 4,3 \cdot 1,93 = \pm 8,3, \quad (7)$$

где t_S – табличное значение; t – критерий.

Все основные коэффициенты больше 8,3, т. е. они значимы.

В последнем столбце таблицы 2 приведены расчетные значения параметра оптимизации по полученным уравнениям (Q_p), и по этим результатам определена дисперсия адекватности:

$$S_{AD}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \left(Q_{\Sigma j} - \bar{Q}_{pj} \right)^2}{N - (K + 1)} = \frac{315}{6} = 52,6. \quad (8)$$

Для определения адекватности уравнения регрессии с результатами эксперимента определяли расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{AD}^2}{S_{Q_0}^2} = \frac{52,5}{33,5} = 1,57.$$

Табличное значение критерия Фишера: $F_T = 19,3$, т. е. $F_p < F_T$, таким образом, доказана адекватность уравнения регрессии.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при высоких частотах вращения барабана ($x_1 = +1$, $n_j = 105 \text{ мин}^{-1}$) происходило перебрасывание массы, т. е. пальцы барабана захватывали слой массы и перебрасывали через себя.

Кроме того, в опытах, когда были установлены все ряды пальцев барабана ($x_2 = +1$, $K_{\text{пн}} = 3 \text{ шт.}$), происходило некоторое торможение массы, перемещаемой по поверхности решета.

Для полного анализа уравнения регрессии необходимо привести его в канонической форме. На первом этапе канонического преобразования необходимо найти центр поверхности Q_{PS}

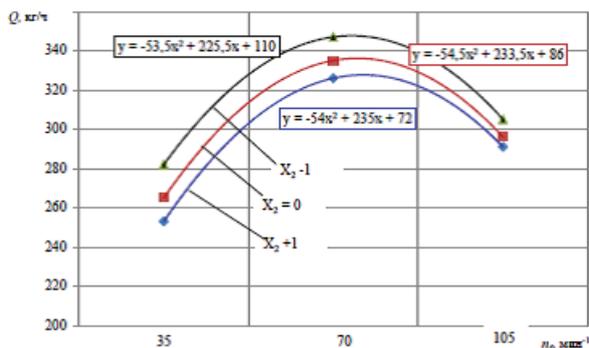


Рисунок 3 – Производительность сепаратора в зависимости от частоты вращения подбрасывающего барабана при различном количестве рядов пальцев

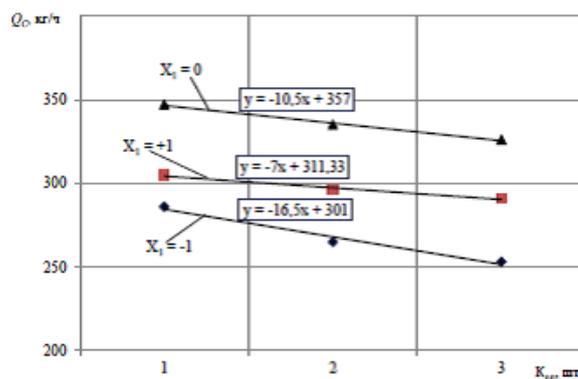


Рисунок 4 – Производительность сепаратора в зависимости от количества рядов пальцев при различной частоте вращения подбрасывающего барабана

для этого исходные уравнения дифференцировали по каждой независимой переменной:

$$\frac{\partial Q_p}{\partial X_1} = 15,3 + 3,75 X_2 - 108,6 X_1 = 0,$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial X_2} = -10,67 + 3,75 X_1 - 4,66 X_2 = 0.$$

Решение этих уравнений позволили получить: $X_1 = 0,214$, $X_2 = 2,117$. Подставляя эти значения в исходное уравнение, находим значение Q_p в новом начале координат:

$$Q_{PS} = 325,03 \text{ кг / ч.} \quad (9)$$

После параллельного переноса координатных осей уравнение примет следующий вид:

$$Q_{PS} = 325,03 + 3,75 \bar{X}_1 \bar{X}_2 - 54,3 \bar{X}_1^2 + 2,33 \bar{X}_2^2. \quad (10)$$

Для определения коэффициентов B_{11} и B_{22} , т. е. коэффициентов канонического уравнения, решали характеристическое уравнение:

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{11} - B & -\frac{1}{2}b_{12} \\ \frac{1}{2}b_{21} - b_{22} - B & -\frac{1}{2}b_{12} - b_{22} - B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -54,3 - B & -3,75 \\ 3,75 & 2,33 - B \end{vmatrix} = -130,03 + 51,97B + B^2 = 0. \quad (11)$$

Решение полученного квадратного уравнения показало, что $B_{11} = -54,36$, $B_{22} = 2,39$.

Таким образом, основное уравнение в канонической форме имеет вид:

$$Q_p = 325,03 = -54,36 X_1^2 + 2,39 X_2^2. \quad (12)$$

Анализ данного уравнения показывает, что $B_{11} < 0$, тогда движение в любую сторону от центра уменьшает параметр оптимизации. В данном случае $B_{11} < 0$, а $B_{22} > 0$, в этом случае для увеличения параметра оптимизации следует двигаться так, чтобы значения X_1 для коэффициентов $B_{11} < 0$ равнялись нулю, т. е. искать максимум вдоль осей с $B_{22} > 0$.

Это показали результаты восьмого опыта. При нулевом значении X_1 и $X_2 = -1$ максимальное значение параметра оптимизации ($Q_{\mathcal{E}} = 339$, $Q_p = 347$). Значение коэффициента $a_2 = -10,67$ также показывает, что для увеличения параметра оптимизации двигателя по оси X_2 должно быть в сторону его минимального значения. Исходя из этого, оптимальные значения факторов при колированном значении: $X_1 = 0$, $X_2 = -1$, т. е. $X_1 = 70 \text{ мин}^{-1}$, $X_2 = 1 \text{ шт.}$

Результаты экспериментальных исследований также показали, что при частоте вращения барабана 70 мин^{-1} , при одном ряде пальцев происходит оптимальное протекание технологического процесса. При увеличении числа рядов пальцев происходило торможение слоя, т. е. это снижало производительность процесса сепарирования листовой части трав.

На рисунке 3 приведены графики производительности сепаратора в зависимости от частоты вращения подбрасывающего барабана при различном количестве рядов пальцев, а на рисунке 4 – зависимость производительности сепаратора

от количества рядов пальцев подбрасывающего барабана.

На рисунке 4 видно, что поверхность представляет собой хребет, имеющий максимальное значение при $X_1 = 0$, а высота хребта увеличивается в сторону минусового значения фактора X_2 .

Таким образом, результаты экспериментальных исследований по методу Бокса-Уилсона дают полную картину поверхности и возможности изучения совместного влияния двух факторов на параметры оптимизации.

Полученное оптимальное значение частоты вращения подбрасывающего барабана показало достоверность проведенных теоретических исследований.

Выводы. Получено аналитическое выражение, обеспечивающее определение частоты вращения подбрасывающего барабана. Действительное значение частоты вращения подбрасывающего барабана совпадает с теоретическим значением, т. е. это показывает достоверность проводимых теоретических исследований.

В результате экспериментальных исследований, проведенных по методу многофакторного эксперимента, определены оптимальные значения частоты вращения подбрасывающего барабана: $n_0 = 70 \text{ мин}^{-1}$ и количество рядов пальцев: $K_{PII} = 1$ шт.

Литература

1. Андреев В.В. Заготовка высококачественных кормов: альбом-справочник / под ред.

В.В. Андреева, И.А. Кольваха. М.: Россельхозиздат, 1978. 295 с.

2. Никитина Т.К. Корма и комбикорма / под ред. Т.К. Никитиной. СПб.: ООО "Респекта", 2000. 256 с.

3. Патент РК №30197 Способ приготовления витаминно-травяной муки / Т. Абилжанулы, О.Ж. Жортуылов, В.Т. Солдагов, В.Л. Утешев, Д.Т. Абилжанов, К.К. Нурлыбаев, А.С. Альшурина. Заявитель и патентообладатель ТОО "КазНИИМЭСХ". 2013/0545.1, заявл. 23.04. 2013. Оpubл. 17.08.2015. Бюл. № 8.

4. Абилжанов Д.Т. Определение качества витаминно-травяной муки из листовой части трав / Д.Т. Абилжанов, Ы.Д. Осмонов // Известия вузов Кыргызстана. 2018. № 4. С. 32–38.

5. Теоретическое обоснование кинематического режима сепаратора мелкой листовой части трав / Т. Абилжанулы, Д.Т. Абилжанов // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 7. С. 32–35.

6. Обоснование параметров сепаратора мелкой листовой части трав / Т. Абилжанулы, Д.Т. Абилжанов // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 8. С. 16–18.

7. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

8. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.Ю., Маркова Ю.В. Граневский. М.: Наука, 1976. 280 с.