

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССА ДОМОЛОТА ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ

**Н. В. Брагинец, д.т.н., профессор, Д. Н. Бахарев, к.т.н., доцент,  
А. Е. Бурнукин, аспирант.**

*(Луганский национальный аграрный университет)*

*Проведен анализ основных математических моделей теории обмолота початков кукурузы. Выявлены наиболее адекватные математические модели, применимые для описания процесса домолота початков кукурузы, уточнение которых позволит разрабатывать более эффективное домолачивающее устройство.*

**Проблема.** Обмолот початков кукурузы с математической точки зрения является сложным процессом. Общая теория обмолота початков кукурузы основана на применении большого количества поправочных коэффициентов, получаемых экспериментальным путём. Процесс обмолота условно можно разделить на два этапа. Первым этапом является непосредственно обмолот, при котором основной упор всех исследований делается на разрушение связей зерна с початком. Ко второму этапу можно отнести домолот початков кукурузы. Здесь возникает необходимость в такой математической модели, которая смогла бы описывать процесс обмолота початков, основная часть зерна которых уже отделена от стержня. Из вышеизложенного следует, что необходима разработка адекватных математических моделей без применения данных, получаемых экспериментальным путем. И именно в этом состоит научная задача современных учёных, работающих над усовершенствованием кукурузомолотилок, и домолачивающих устройств в частности.

**Целью анализа является.** На основании анализа выявить математическую модель, наиболее адекватно описывающую процесс домолота початков кукурузы, и установить пути усовершенствования данной опорной модели.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Изучением процесса обмолота кукурузы занимались такие ученые, как Г.И. Креймерман, М.Г. Голик, И.А. Петунина, В.С. Кравченко, В.С. Курасов, Н.В. Сережина, Д.Н. Бахарев, Н.А. Бобриков, С.Ю. Данилевич, И.Н. Гуров, Т.К. Тоганбаев и др. [1–9]. Работы этих ученых позволили описать ряд процессов, определяющих режимы работы и конструктивные параметры молотилок кукурузы. Однако, практически не уделялось внимание процессу домолота початков кукурузы. На сегодняшний день не найдено математических моделей, которые в полном объеме могли бы описывать процесс домолота частично обмолоченных початков. Как следствие, остается открытым вопрос о

систематизации накопленных знаний, обобщению их в единую методику расчёта, а так же созданию новой, гибкой и универсальной системы расчёта для разработки эффективного домолачивающего устройства, и рациональных режимов его работы.

#### **Результаты исследований.**

В работе [1, с. 20 – 21] нами доказано, что наиболее перспективными является конструкции молотилок кукурузы, включающие в себя домолачивающие устройства. На основании анализа конструкций домолачивающих устройств, применяемых в системах обмолота початков, было определено домолачивающее устройство прототип. На основании анализа конструкции прототипа и существующих теоретических предпосылок, разработана принципиальная схема нового домолачивающего устройства (рис. 1).

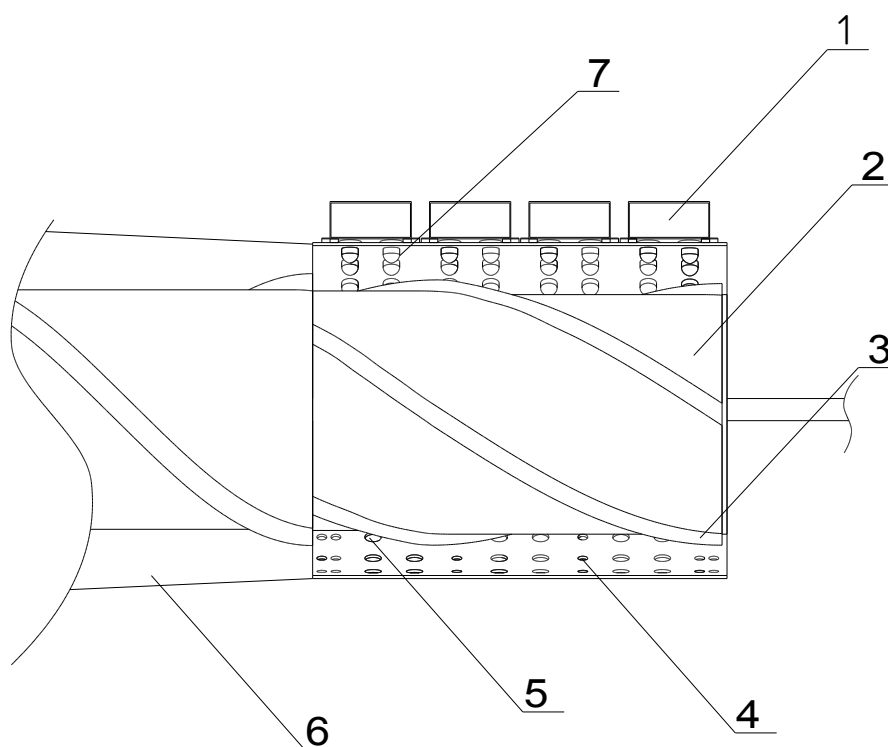


Рис. 1. Схема домолачивающего устройства

1 – пневмоподушка; 2 – ротор домолачивающего устройства; 3 – навивка ротора; 4 – отверстия для вывода зерна; 5 – отверстия под шипы; 6 – основная камера обмолота; 7 – шипы.

Початок кукурузы представляет собой цилиндрический стержень с небольшой конусностью. Для того, что бы отделить зерно от початка, необходимо разорвать сосудисто-волокнистые пучки, которыми зерно удерживается на початке. Обмолот початков кукурузы молотильным барабаном можно рассматривать, как процесс, состоящий из двух фаз. В первой фазе происходит разрушение связей между зернами и стержнем початка под действием сил, направленных по радиусу початка (вдоль продольной оси зерна). При второй фазе разрушение происходит под действием сил, направленных по касательной, или вдоль образующей початка

(перпендикулярно к продольной оси зерна). Первая фаза имеет место при взаимоуплотненных зернах, вторая фаза – при свободных зернах [2, с. 8 – 9].

Качество работы домолачивающего устройства в значительной степени определяет пропускную способность, процентом недомолота зерна, энерго- и материалоемкостью устройства.

Анализ существующих математических моделей, описывающих наиболее значимые конструктивно-технологические параметры домолачивающего устройства початков кукурузы, приведён в табл. 1.

Таблица 1. Анализ существующих математических моделей, применимых при описании процесса домолота початков кукурузы

Авторы	№	Математическая модель	Примечания (достоинства, недостатки)
1	2	3	4
Бобриков Н. А.	1	<p>Расчет площади соприкосновения ролика деки и початка кукурузы</p> $S_{nl} = \frac{f_n \cdot \delta_{min} \cdot D}{\sqrt{(1 + \frac{\delta_{min}}{D})^2 + f_n (\frac{\delta_{min}}{D})^2}} \cdot l_p,$ <p>где <math>S_{nl}</math> – площадь соприкосновения;  <math>D</math> – диаметр ролика;  <math>\delta_{min}</math> – минимальный зазор в подбарабаны;  <math>f_n</math> – коэффициент трения между роликом и початком;  <math>l_p</math> – длина ролика барабана.</p>	Коэффициент трения между роликом и початком $f_n$ может иметь большой диапазон значений, т.к. размерные характеристики початков в зависимости от его геометрических форм будут значительно отличаться. Также, коэффициент трения между роликом и початком будет изменяться в процессе отделения зерна от стержня.
	2	<p>Неравенство, при соблюдении которого возможно отделение зерна от стержня початка</p> $P_1 \geq \frac{R \cdot \frac{b}{2}}{L_1 \cdot \cos \alpha_1 \pm \frac{b}{2} \sin \alpha_1},$ <p>где <math>P_1</math> – разрушающая сила;  <math>L_1</math> – длина зерна;  <math>R</math> – усилие на разрыв сосудисто-волоконистых пучков;  <math>b</math> – толщина зерна.</p>	Диапазон усилий на разрыв связей зерна с початком в разных частях початка будет существенно отличаться. Толщина зерен так же зависит от расположения их на початке. Также, в уравнение необходимо учесть условия, при которых наступает разрушение зерна.
	3	<p>Расчет работы, затрачиваемой на сообщение початку скорости, близкой к скорости барабана</p>	В домолачивающее устройство початок поступает уже с определенной

		$L = mV_{\sigma}^2,$ <p>где <math>L</math> – затрачиваемая работа,  <math>m</math> – масса початков в сек.,  <math>V_{\sigma}</math> – скорость молотильного барабана.</p>	<p>скоростью.          Необходима доработка математической модели с учетом затрат работы, для поддержания уже существующей скорости початка.</p>
1	2	3	4
Бобриков Н. А.	4	<p>Расчет работы на протаскивание одного початка одним штифтом</p> $A_{\sigma} = f_n \cdot R_{\sigma} \cdot \varphi \left( a - bc + \frac{bd}{2} \varphi^2 \right) \cdot K,$ <p>где <math>f_n</math> – коэффициент трения початка о деку,  <math>R_{\sigma}</math> – радиус молотильного барабана,  <math>\varphi</math> – угол поворота барабана в радианах,  <math>a, b, c, d</math> – коэффициенты, найденные опытным путем в зависимости от влажности початка,  <math>K</math> – опытные коэффициенты.</p>	<p>Коэффициент трения початка о деку будет изменяться в процессе обмолота початка. Коэффициенты <math>a, b, c, d</math> могут иметь большой диапазон значений, и в каждом случае будут требовать уточнения.</p>
Данилевич С. Ю.	5	<p>Неравенство, при соблюдении которого возможно разрушение зерновой ножки</p> $\operatorname{tg} 2\alpha \geq \frac{2\operatorname{tg} \varphi}{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi},$ <p>где <math>2\alpha</math> – угол при вершине клина;  <math>\varphi</math> – угол трения зерна по зерну.</p>	<p>В математической модели необходимо учесть условия, при которых наступает разрушение зерна при его контакте с шипом в процессе домолота.</p>
Серезина Н. В.	6	<p>Расчет вымолота зерна по длине барабана</p> $y = y_0 e^{-\frac{L^2 \cdot 8,68 \gamma_1 v^2 P}{S (P + \gamma_1 v^2)^2}},$ <p>где <math>y_0</math> – количество зерна в связанном состоянии, поступившего в молотильное устройство, 100 %;  <math>L</math> – длина барабана;  <math>S</math> – площадь поперечного сечения в приемной части, занятой початками;  <math>v</math> – поступательная скорость вдоль оси барабана;  <math>P</math> – давление в конце молотильного устройства, создаваемое регулируемой заслонкой;  <math>\gamma</math> – объемный вес, который отражает биологические особенности кукурузы и ее влажность в момент обмолота.</p>	<p>Давление <math>P</math> будет не постоянным, и зависит это от степени заполнения камеры обмолота. Также, для получения более точных расчетов, необходимо учитывать сход свободным зерном.</p>
	7	<p>Расчет производительности молотильного барабана с осевым перемещением материала</p> $q = \frac{\pi}{4} c (d_{\text{нод}}^2 - d_{\sigma}^2) \gamma^3 \sqrt{n},$ <p>где <math>c</math> – безразмерный коэффициент, характеризующий технологический процесс;  <math>d_{\text{нод}}</math> – диаметр подбарабанья;  <math>d_{\sigma}</math> – диаметр барабана;</p>	<p>Если дека конической формы, <math>d_{\text{нод}}</math> не может точно отображать необходимые данные. Также в формуле не уточнено положение обмолачивающего барабана относительно</p>

		$\gamma$ – объемный вес, который отражает биологические особенности кукурузы и ее влажность в момент обмолота; $n$ – обороты барабана.	горизонта.
1	2	3	4
Серезина Н. В.	8	<p>Расчет энергетических затрат на обмолот</p> $N = N_{xx} + kc^2 \frac{\pi}{4} (d_{nod}^2 - d_{\delta}^2) \gamma n,$ <p>где <math>N_{xx}</math> – мощность, потребляемая на холостой ход барабана; <math>k = 120</math>; <math>c</math> – безразмерный коэффициент, характеризующий технологический процесс; <math>d_{nod}</math> – диаметр подбарабана; <math>d_{\delta}</math> – диаметр барабана; <math>\gamma</math> – объемный вес, который отражает биологические особенности кукурузы и ее влажность в момент обмолота; <math>n</math> – обороты барабана.</p>	Не учтена мощность, затрачиваемая на сообщение початку скорости, близкой к скорости барабана. Если дека кнусной формы, $d_{nod}$ не может точно отображать необходимые данные. Также в формуле не уточнено положение обмолачивающего барабана и ротора относительно горизонта.
Креймерман Г.И.	9	<p>Расчет производительности винтовой части молотилки</p> $Q = 900 \cdot v_{\delta} D S \varphi \gamma, \text{ т/час},$ <p>где <math>D</math> – диаметр винта, м; <math>S</math> – шаг винта, м; <math>\gamma</math> – объемный вес материала в движении, т/м<sup>3</sup>; <math>\varphi</math> – коэффициент заполнения винта (число, показывающее, какая часть площади поперечного сечения винта занята перемещаемым материалом); <math>v_{\delta}</math> – окружная скорость барабана, м/сек.</p>	Коэффициент заполнения винта $\gamma$ будет изменяться в зависимости от изменения площади поперечного сечения камеры, занятого перемещением материала. Также необходимо учитывать количество зерна в связанном состоянии, поступившего в молотильное устройство.
	10	<p>Расчет общей потребляемой мощности</p> $N = 1,25(N_{xx} + QN_n), \text{ кВт},$ <p>где <math>N_{xx}</math> – мощность холостого хода, кВт; <math>Q</math> – производительность, т/час; <math>N_n</math> – удельная мощность, кВт.</p>	Необходимо учесть мощность, затрачиваемую на удар и на преодоление сил трения.
Кравченко В. С.	11	<p>Расчета мощности, потребляемой на процесс обмолота, применительно к аксиальному аппарату с винто-лопастным ротором</p> $N_{an(акс)} = N_0 + N_{y\delta} + N_{mnn} + N_{mnk} + N_{mnn\delta}, \text{ кВт},$ <p>где <math>N_0</math> – мощность на преодоление вредных сопротивлений, кВт; <math>N_{y\delta}</math> – мощность, потребляемая на удар и сообщения скорости, кВт; <math>N_{mnn}</math> и <math>N_{mnk}</math> – мощность, затрачиваемая на преодоление трения соответственно початков по початкам и початков по кожуху, кВт;</p>	Необходимо уточнение затрат мощности, необходимой на трение початков по початкам, так как в процессе обмолота зерно от початка отделяется, и соответственно появляется трение

		$N_{\text{мннб}}$ – мощность, потребляемая на преодоление трения початков по подбарабанью, кВт.	стержня по стержню. Также, необходимо уточнить мощность, затрачиваемую на преодоление трения початков по подбарабанью в зависимости от геометрических форм подбарабанья и расположение его относительно горизонта.
1	2	3	4
Кравченко В. С.	12	<p>Расчет мощности, потребляемой на преодоление сил трения</p> $N_{\text{мп}} = k \int ((R_{\text{бич}} + R_n) - \sqrt{R_{\text{бэ}}^2 + \rho_n^2 - 2R_{\text{бэ}} \rho_n \cdot \cos[\omega_{\text{б}} - \omega_{\text{он(об)ср}]}) \cdot t) \cdot (\omega_{\text{б}} - \omega_{\text{он(об)ср}}) \cdot \sqrt{R_{\text{бэ}}^2 + R_{\text{бич}}^2 + 2R_{\text{бэ}} \cdot R_{\text{бич}} \cos(\alpha_{\text{ом}} - \psi_{\text{ом}})},$ <p>где <math>k</math> – коэффициент пропорциональности закона сжатия початка, зависящий от сортовых особенностей кукурузы и схемы заземления. Для двухопорной схемы заземления <math>k = 300 - 460</math> кН/м;</p> $R_{\text{бич}}$ – радиус образующей окружности бича, м; $R_n$ – радиус початка, м; $R_{\text{бэ}}$ – радиус барабана с эксцентриситетом, м; $\rho_n^2$ – расстояние от центра окружности барабана до центра окружности початка, м; $\omega_{\text{б}}$ – допустимая угловая скорость барабана, рад/с; $\omega_{\text{он(об)ср}}$ – средняя угловая скорость центра окружности початка относительно центра окружности барабана, рад/с; $t$ – текущее время деформации, изменяемое от $t_1=0$ до $t=T$ ; $\alpha_{\text{ом}}$ – текущий угол наклона бича; $\psi_{\text{ом}}$ – текущая угловая координата точки контакта на профиле бича.	Радиус початка $R_n$ не корректно использовать как постоянную величину. Также необходимо учесть силу трения початка в зависимости от геометрической формы шипа, и количества шипов.
	13	<p>Расчет мощности, потребляемой на удар и сообщение скорости</p> $N_{\text{yo}} = m'V^2, \text{ кВт},$ <p>где <math>m'</math> – секундная подача массы, кг/с;  <math>V</math> – скорость лопасти, м/с. </p>	Мощность, затрачиваемую на удар необходимо рассчитывать с учетом геометрических форм шипа.
	14	<p>Расчет мощности, потребляемой на преодоление трения початков по початкам</p> $N_{\text{мнн}} = (M_{\text{мн}}q + M_{\text{мн}}\omega_n^2\rho_{\text{ч}})\omega_n R_n f_{\text{мн}}, \text{ кВт},$ <p>где <math>M_{\text{мн}}</math> – масса слоя початков, перемещающегося по початкам, кг/с;  <math>q</math> – усилие силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;</p>	Расстояние от оси лопасти до центра тяжести перемещающегося слоя $\rho_{\text{ч}}$ будет изменяться от степени заполнения

		$\omega_l$ – угловая скорость лопасти, рад/с; $\rho_{\psi}$ – расстояние от оси лопасти до центра тяжести перемещающегося слоя, м; $R_l$ – радиус лопасти, м; $f_{nn}$ – коэффициент трения початков по початкам.	домолачивающего устройства, а коэффициент трения початков по початкам $f_{nn}$ будет изменяться в зависимости от степени обмолоченности и постепенно перейдет в коэффициент трения стержня по стержню.
1	2	3	4
Кравченко В. С.	15	Расчет мощности, потребляемой на преодоление трения початков по кожуху $N_{mnk} = (-M_{nn}q + M_{nn}\omega_l^2\rho_{\psi}')\omega_l(R_l + Z)f_{nk}$ , кВт, где $\rho_{\psi}'$ – расстояние от оси лопасти до центра тяжести слоя, перемещающегося по кожуху, м; $f_{nk}$ – коэффициент трения початков по кожуху; $q$ – усилие силы тяжести, м/с <sup>2</sup> ; $M_{nn}$ – масса слоя початков, перемещающегося по початкам, кг/с; $\omega_l$ – угловая скорость лопасти, рад/с; $R_l$ – радиус лопасти, м; $Z$ – зазор между лопастью и кожухом, м.	Значение коэффициента трения початков по подбарабанью $f_{nk}$ будет изменяться в зависимости от степени их обмолота.
	16	Расчет мощности, потребляемой на преодоление трения початков по подбарабанью $N_{mn\delta} = (M_{mc}q + M_{nn}\omega_l^2\rho_{\psi}')V_{oc}f_{n\delta}$ , кВт, где $M_{mc}$ – масса початков не вращающегося (мертвого) слоя, кг; $V_{oc}$ – скорость перемещения початков вдоль барабана, м/с; $f_{n\delta}$ – коэффициент трения початков по подбарабанью; $q$ – усилие силы тяжести, м/с <sup>2</sup> ; $\omega_l$ – угловая скорость лопасти, рад/с.	Необходимо уточнение массы початков не вращающегося (мертвого) слоя $M_{mc}$ в зависимости от конструкции деки, а так же от формы и размеров навивки ротора. Значение коэффициента трения початков по подбарабанью $f_{n\delta}$ будет изменяться в зависимости от степени их обмолота.
Гуров И. Н.	17	Расчет скорости барабана, при которой наступает отделение зерна от початка $V_{\delta} = (1 + \frac{2b^2}{r^2}) \cdot \sqrt{\frac{2 \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta}{M}}$ , м/с, где $b$ – расстояние от центра масс початка до точки приложения ударного импульса, м; $r$ – радиус початка, м;	Радиус початка $r$ имеет определенный диапазон значений. Необходимо уточнить влияние этого диапазон значений на точность получаемых результатов. Вес

		$P$ – сила удара по початку кукурузы в молотильной камере, Н; $\delta$ – деформация початка при ударе в молотильной камере, м; $M$ – вес початка кукурузы, Н.	початков также не корректно принимать как постоянную величину. При расчете скорости барабана необходимо учитывать особенности конструкции деки и ее положение относительно горизонта.
--	--	---	---

Исходя из данных, приведенных в табл.1, можно сделать выводы о том, что процесс домолота початков кукурузы ещё изучено недостаточно, носит частичный и неадаптированный для конкретных условий характер. Не учтены многие важные составляющие технологического процесса в особенности попадание початков кукурузы в домолочивающее устройство уже частично обмолоченными.

#### **Выводы.**

1. В результате проведенного анализа не было найдено математических моделей, которые описывали бы взаимодействие частично обмолоченных початков кукурузы с шипами.

2. Не было найдено математических моделей, которые описывали бы форму шипа, необходимую для домолота початков кукурузы.

3. Были найдены математические модели, которые позволяют рассчитать мощность, затрачиваемую на обмолот початков кукурузы. Но данные математические модели требуют доработки, так как мощность затрачиваемая на домолот будет отличаться тем, что початки поступают в камеру домолота с уже разрушенными связями между початком и зерном.

4. В результате анализа выявлено, что наиболее подходящими математическими моделями процесса домолота початков кукурузы являются модели Н. В. Сережиной и В. С. Кравченко (см. табл. 1, модель № 5, № 7).

5. Усовершенствование модели Н. В. Сережиной требует включения показателя, который точно мог бы описывать геометрические параметры деки домолочивающего устройства и ротора. В свою очередь, совершенствованная модель В. С. Кравченко должно включения показателя, которые отображали бы изменение затрат мощности, расходуемой на преодоление трения початков по початкам с учетом их обмолоченности. Также необходимо учесть возможность кратковременной перегрузки камеры домолота по причине разницы в размерах початков. Необходимо учесть и тот факт, что початки поступают в домолочивающее устройство уже частично обмолоченными. Значительные затраты мощности пойдут на взаимодействие шипов с початками и преодоление нагрузок при вдавливании шипов в пневмоподушку.

#### **Список литературы**



1. Брагинец Н.В. Анализ конструкций домолочивающих устройств, применяемых в системах обмолота початков кукурузы / Брагинец Н. В., Бахарев Д. М., Коваленко А. В., Бурнукин А. Е. // Науковий Вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. - Луганськ: ЛНАУ, 2012. - №41 – с. 16 – 21.

2. Бобриков Н. А. Исследование рабочих органов молотильных аппаратов для обмолота кукурузы: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01«Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Н. А. Бобриков – Ростов-на-Дону, 1963. – 22 с.

3. Данилевич С.Ю. Исследование процесса обмолота початков кукурузы: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01«Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / С.Ю. Данилевич – Киев, 1963. – 16 с.

4. Серезина Н.В. Исследование винтового молотильного устройства на обмолоте початков кукурузы: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01«Технологии и средства механизации сельского хозяйства»/ Н. В. Серезина – Кишинев, 1967. – 21 с.

5. Креймерман Г.И. Обмолот початков кукурузы / Креймерман Г.И. – М.: Колос, 1966. – 104 с.

6. Кравченко В. С. Параметры и режимы обмолота початков кукурузы: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01«Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / В.С. Кравченко – Зерноград, 1997. – 37 с.

7. Курасов В.С. Совершенствование технологического процесса обмолота початков кукурузы в первичном семеноводстве: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01«Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / – Краснодар, 1989. – 24 с.

8. Гуров И.Н. Механико-технологические основы обмолота кукурузы: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01«Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / – Новочеркасск, 1965. – 37 с.

## **Анотація**

### **Аналіз існуючих математичних моделей для опису процесу домолоту качанів кукурудзи**

Брагінець М.В., Бахарєв Д.М., Бурнукін А.Є.

*Проведено аналіз основних математичних моделей теорії обмолоту качанів кукурудзи. Виявлено найбільш адекватні математичні моделі, найбільш прийнятні для опису процесу домолоту качанів кукурудзи, уточнення яких дозволить розробляти більш ефективний домолочуючий пристрій.*

## **Abstract**

**Analysis of existing mathematical models to describe the process of threshing corn cobs**

N. Braginets, D. Bakharev, A. Burnukin

*The analysis is of the basic theory of mathematical models of threshing corn cobs. Identify the most appropriate mathematical models, specification of which will develop more efficient devices for threshing corn cobs.*