ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR THE AGROINDUSTRIAL COMPLEX

Научная статья

УДК 551.4: 631.439: 631.434
EDN: TXUXYT
https://doi.org/10.24412/2949-2211-2025-3-3-47-58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБМОЛОТА, СЕПАРАЦИИ И ПОВРЕЖДЕНИЯ СЕМЯН СОИ В МОЛОТИЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ КОМБАЙНА ДВУХФАЗНОГО ОБМОЛОТА

Ирина Михайловна Присяжная, Серафима Павловна Присяжная, Котенко Дмитрий Станиславович

Всероссийский научно-исследовательский институт сои, г. Благовещенск, Россия,
irenpris@mail.ru, psp@vniisoi.ru

Аннотация. Целью исследований была разработка модели технологического процесса обмолота и сепарации зерна в комбайне двухфазного обмолота и определение влияния данной модели на снижение потерь за счёт обеспечения высокого качества выделяемых семян при обмолоте и сепарации первым и вторым молотильными барабанами.

Определено неравномерное дробление зерна сои по зонам МСУ комбайна двухфазного обмолота, при этом наибольшее повреждение приходится на первый барабан. Исследовано, что повышение производственной эффективности при уборке сои во многом зависит от качества семян, которое можно повысить за счёт снижения дробления и микроповреждений зерна. Агротехническая оценка качества бункерного зерна с использованием новых эффективных комбайнов выявила рост доли сорной примеси до 4,8 % и увеличение долей дробления и микроповреждения до 9,1 %, что обосновывает необходимость послеуборочной обработки для получения семян требуемого качества. Обосновано, что на участке первого барабана сепарируется около 70 % обмолоченного зерна сои с минимальным уровнем дробления 2,2...2,7 %, что обеспечивает получение качественных семян при последующем выделении. Анализировано значительное увеличение механического повреждения зерна при двухфазном обмолоте сои, связанное с высокой окружной скоростью бичей первого барабана (>14,0 м/с), недостаточной подачей в молотилку (<3 кг/с) и низкой влажностью зерна до 9 %. Представлена оценка качественных показателей процесса обмолота в зависимости от ряда действующих факторов. На основе технических характеристик выпускаемых новых комбайнов рассмотрены разные скорости воздействия бичей первого и второго барабанов, которые в меньшей степени повреждают зерно сои, и предложено целесообразное использование комбайнов на уборке репродукционных семян.

Ключевые слова: соя, зерно, комбайн, барабан, обмолот, сепарация, влажность, дробление, окружная скорость бичей.

Для цитирования: Присяжная И. М., Присяжная С. П., Котенко Д. С. Моделирование процесса обмолота, сепарации и повреждения семян сои в молотильном устройстве комбайна двухфазного обмолота // Агронаука. 2025. Том 3. № 3. С. 47-58. EDN: TXUXYT. https://doi.org/10.24412/2949-2211-2025-3-3-47-58

Original article

MODELLING THE PROCESS OF REVIEW, SEPARATION AND DISEASE OF SOYA SEEDS IN THE MOLOTIAL DEVICE OF THE COMBINE OF TWO-FAX REVIEW

Irina M. Prisyazhnaya, Serafima P. Prisyazhnaya, Dmitry S. Kotenko

Russian Soybean Research Institute, Blagoveshchensk, Russia, irenpris@mail.ru , psp@vniisoi.ru

Abstract. The purpose of the research was to develop a model of the technological process of threshing and separating grain in a two-phase threshing combine and to determine the effect of this model on reducing losses by ensuring high quality of the seeds released during threshing and separation by the first and second threshing drums.

Uneven crushing of soybean grain in the zones of the MCU of a two-phase threshing combine was determined, with the greatest damage occurring in the first drum. It has been investigated that the increase in production efficiency during soybean harvesting largely depends on the quality of the seeds, which can be improved by reducing crushing and micro-damage of the grain. An agrotechnical assessment of the quality of bunker grain from using new efficient combines revealed an increase in the proportion of weeds to 4.8 % and an increase in the proportion of crushing and micro-damage to 9.1 %, which justifies the need for post-harvest treatment to obtain seeds of the required quality. It is proved that about 70 % of the threshed soybean grain is separated at the site of the first drum with a minimum crushing level of 2.2...2.7 %, which ensures the production of high-quality seeds during subsequent separation. A significant increase in mechanical damage to grain during two-phase soybean threshing was analyzed, associated with a high circumferential speed of the first drum whips (>14.0 m/s), insufficient feed to the thresher (<3 kg/s) and low grain moisture of up to 9 %. An assessment of the qualitative indicators of the threshing process is presented, depending on a number of operating factors. Based on the technical characteristics of the new combines being produced, the impact rates of the whips of the drums are considered and the expedient use of combines for harvesting reproductive seeds, which cause less damage to soybean grain, is proposed.

Keywords: soy, threshed, plank deck, separation, crushing, seeds, circumferential speed of whips.

For citation: Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP, Kotenko DS. Modeling the process of review, separation and disease of soya seeds in the molotial device of the combine of two-fax review [Modelirovanie processa obmolota, separacii i povrezhdenija semjan soi v molotil'nom ustrojstve kombajna dvuhfaznogo obmolota]. *Agronauka = Agroscience*. 2025;3:3:47-58 (in Russ.). EDN: TXUXYT. https://doi.org/10.24412/2949-2211-2025-3-3-47-58

Введение

Обмолот, сепарация и повреждение зерна сои зависят от многих факторов, в том числе и от скорости воздействия молотильного барабана (частоты вращения, длины деки), а достоверная оценка влияния длины деки молотильно-сепарирующего устройства двухфазного обмолота на его обмолачивающую, сепарирующую способность и повреждение (дробление) семян сои определяется только экспериментально [1–3].

Разделяют процесс обмолота растений сои на два периода: а) период первой стадии процесса включает обмолот за счёт воздействия мотовила, режущего аппарата, транспортера жатки и наклонной камеры при перемещении, и рыхлении вороха приемным битером; б) во второй стадии процесса происходит вымолот зерна и сепарация его через деку молотильного устройства, при неизменных внешних условиях и регулировках молотильного устройства. При этом установлено, что случайный процесс обмолота семян сои из бобов зависит, в частности, от сортов сои, полноты созревания растений и предварительного обмолота на первой стадии подвода растений к обмолоту (среза, перемещения и подачи в молотильное устройство) и соответственно описывается различными уравнениями [4–6].

Разработка модели технологического процесса обмолота, сепарации и дробления семян в комбайне при обмолоте играет важную роль в исследовании явления об-

молота, сепарации и повреждения зерна сои. Этот процесс позволяет глубже изучить работу дополнительных узлов молотильно-сепарирующего устройства комбайна двухфазного обмолота и их влияние на качество получаемых семян сои при уборке комбайном двухфазного обмолота [7–9].

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные ранее, показали, что обмолот зерна и сепарация его через деку молотильного устройства представляет собой единый, установившийся вероятностный процесс, при неизменных внешних условиях и регулировках молотильного устройства. При этом установлено, что случайный процесс вымолота семян сои из бобов зависит от возделываемых сортов сои, их созревания и описывается различными уравнениями [10–12].

Многие сорта сои имеют одно-, двух-, трёх- или даже четырёх семенные бобы, состоящие из двух створок. Причём, створки имеют ячейки в зависимости от количества семян и зависят они от сортов сои по группам спелости, возделываемых по региону. При первой стадии обмолота сои происходит разрушение створок или связей между ними независимо от того имеется ли независимый контакт боба с рабочим органом или нет. Изменение влажности растений сои в период уборки, скорости воздействия и ускорения пучка или отдельных растений при перемещении к молотильному устройству могут быть достаточными, чтобы возникающие силы инерции семян в бобах, действуя изнутри, раскрывали створки бобов. Вторая стадия обмолота характеризуется трением, деформацией сжатия, удара, защемления и разрушения соевой растительной массы и бобов [13–15].

Цель исследований – разработка модели технологического процесса обмолота, и сепарации зерна в комбайне двухфазного обмолота и определение влияния данной модели на снижение потерь за счет качества выделяемых семян при обмолоте и сепарации первым и вторым молотильными барабанами.

Новизна исследования состоит в разработке модели технологического процесса обмолота и сепарации семян сои первым и вторым молотильным барабаном, а также в отдельном сборе борлее качественных семян данной культуры.

Условия, материалы и методы

Исследования проводили в ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои. Проверку полученных выражений по данным сепарации семян, выделенных и собранных в комбайне по зонам. При исследовании молотильного аппарата комбайна двухфазного обмолота с двумя бильными барабанами с углом обхвата по 128°, промежуточным четырёх лопастным битером на сое сортов селекции ВНИИ сои с влажностью семян – 10,3 %, стеблей 19,4 % створок – 15,7 %, массой 1000 семян – 147 г. Опыты проводили при отношении окружной скорости бичей первого и второго барабанов V_1/V_2 = 13,2/17,6; 10,9/17,6 и 8,6/17,6 м/с и молотильных зазоров 24/12 и 18/9 мм. Под молотильно-сепарирующим устройством комбайна закреплялись пробоотборники, которые разделили его на пять секций. Ворох, сходящий с соломотряса, собирался в отдельный пробоотборник. В каждой секции из общих образцов делителем выделяли 4 навески по 2 кг и определяли сепарацию семян, их недомолот и содержание свободных и повреждённых семян при выходе по зонам вымолота.

Результаты и обсуждение

По данным исследований в первой стадии обмолота количество невымолоченных семян X_1 составляет:

$$X_1 = N_0 e^{-A}, \quad (1)$$

где N_0 – общее количество семян, содержащихся в срезанных растениях и поступивших в молотильное устройство;

$A_1 \ldots A_3$ – коэффициенты, учитывающие обмолот у первой планки деки первого и второго молотильного барабана, зависящий от сортов сои, их созревания и влажности.

Во второй стадии процесса обмолота (активный обмолот за первой планкой и до

конца деки) количество невымолоченных семян (X_2) составит:

$$X_2 = N_0 e^{-A-q0l-}, \quad (2)$$

где l – текущая координата положения материала по длине деки;

q_{01} – коэффициент, характеризующий интенсивность обмолота семян в молотильном устройстве первого барабана (принимаемый постоянный по всей длине деки).

Обмолот растений сои с использованием обмолота по двум стадиям с образующимися повреждениями семян подобен аналитической задаче, когда при относительно большом числе воздействий, вымолачивается и растёт содержание целых и повреждённых семян в соевом ворохе, испытывающим деформирование от удара и трения при пассивном и активном обмолоте в соответствующих устройствах комбайна и определяется суммарно.

В цикле разгрузки зернового вороха, после обмолота, при снятии напряжения сжатия с соевого вороха бобов и семян, в трущихся поверхностях образовавшиеся микротрещины в створках и семенах сои проскальзывают относительно друг друга с появлением сухого трения. Присущие эффекты появления микротрещин при малой нагрузке определяются пластическими свойствами створок бобов и семян, а с превышением нагрузки бобы и семена неограниченно деформируются и разрушаются.

Процесс сепарации целых и повреждённых семян сои через соломистый слой и деку начинается одновременно с появлением в слое вороха вымолоченных и повреждённых семян N_0. Рассматривая процесс выделения обмолоченных и повреждённых семян через слой вороха и деку, как вероятностный процесс, С. А. Алферов и ряд исследователей [9, 10] получили общие его закономерности:

$$N_{сх} = N_{01} e^{-\mu l}, \quad (3)$$

$$N_{пр} = (1 - e^{-\mu l}), \quad (4)$$

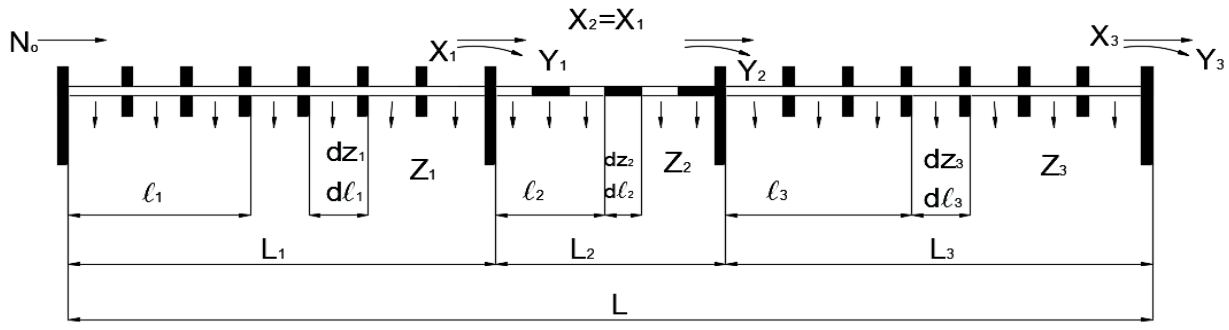
где $N_{сх}$ – содержание вымолоченных семян в ворохе, поступающем на сепарирующую решётку (деку);

$N_{пр}$ – количество семян, прошедших через решётку (деку);

N_{01} – количество свободных (обмолоченных) семян;

μ – коэффициент, характеризующий интенсивность сепарации семян через деку.

Принимаем, что при движении массы на втором участке L_2 обмолот семян промежуточным битером не производится.



L_1, L_3 – длина сепарирующей решётки (деки) первого и второго барабанов; L_2 – длина сепарирующей решётки промежуточного битера; N_0 – количество семян, поступающих в молотильно–сепарирующее устройство. Направление движения обмолачиваемой массы показано стрелками.

Рисунок 1 – Схема процесса обмолота и сепарации семян сои по длине молотильно-сепарирующего устройства комбайна двухфазного обмолота

Figure 1 – Diagram of the soybean seed threshing and separation process along the length of the threshing and separating device of a two-phase threshing combine

При движении массы на участке L_2 обмолот зерна промежуточным битером не производится; тонкий слой сепарирующей решетки является своеобразным «частично-поглощающим экраном», у которого интенсивность прохода семян на расстоянии ℓ от начала решётки пропорциональна у – количеству обмолоченных семян (проходовых частиц) на решётке в данном месте, то есть:

$$\frac{dZ}{d\ell} = \mu y . \quad (5)$$

Тогда на основании изложенных допущений можно считать, что процесс обмолота и сепарации семян через решетки деки и промежуточного битера можно также считать единым установившемся вероятностным процессом при неизменных условиях работы и регулировках молотильного устройства.

Уравнение материального баланса для участка деки первого молотильного барабана, ограниченного длиной L_1, в относительных единицах (при $N_o = 1$) будет иметь вид:

$$Z_1 + У_1 + X_1 = 1 , \quad (6)$$

где Z_1 – количество семян, прошедших через деку на участке длиной L_1.

$У_1$ и X_1 – количество свободных и невымолоченных семян в ворохе, сходящих с участка деки длиной L_1 и поступающих на участок L_2.

Используя предыдущие работы [8, 9], получили количество не вымолоченных, свободных и прошедших семян сои для участка деки длиной L_1:

$$X_1 = e^{-A_1-\mu_{01}L_1} , \quad (7)$$

$$Z_1 = 1 - e^{-\mu_1 L_1} + \frac{\mu_1 e^{-A_1}(e^{-\mu_{01}L_1} - e^{-\mu_1 L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} , \quad (8)$$

$$У_1 = e^{-\mu_1 L_1} + \frac{\mu_1 e^{-A_1-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-A_1-\mu_{01}L_1}}{\mu_{01} - \mu_1} , \quad (9)$$

где e^{-A_1} – количество невымолоченных семян на первой планке деки первого барабана;

μ_{01} – коэффициент, характеризующий интенсивность процесса обмолота семян по длине L_1 деки первого барабана; принято, что μ_{01} = const по всей длине деки;

μ_1 – коэффициент, характеризующий интенсивность процесса сепарации семян; μ_1 = const по всей длине L_1 деки;

e – основание натуральных логарифмов.

На участок промежуточного битера L_2 поступит невымолоченных семян X_1 (выражение (7)) и свободных семян $У_1$ (выражение (9)). Но так как промежуточный битер не производит вымолота семян, то сепарация их на данном участке, с учётом выражения (4) составит:

$$Z_2 = У_1 (1 - e^{-\mu_2 L_2}) , \quad (10)$$

где μ_2 – коэффициент, характеризующий интенсивность процесса сепарации зерна на длине L_2: принято, что μ_2 = const на всей длине L_2 решётки промежуточного битера.

Суммарная сепарация семян на участке L_2 составит:

$$Z = 1 - e^{-\mu_1 L_1 - \mu_2 L_2} - e^{-A_1-\mu_{01}L_1} - \frac{e^{-A_1-\mu_2 L_2}(\mu_1 e^{-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-\mu_{01}L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} . \quad (11)$$

Уравнение материального баланса для участка L_2 будет иметь вид:

$$Z + X_1 + У_2 = 1 , \quad (12)$$

где $У_2$ – количество свободных семян, прошедших с участка L_2 и поступивших на участок второго барабана L_3. Подставляя в выражение (13) значение Z и X_1, получим выражение для количества свободных семян $У_2$, которое после преобразований примет вид:

$$У_2 = e^{-\mu_1 L_1 - \mu_2 L_2} + \frac{e^{-A_1-\mu_2 L_2}(\mu_1 e^{-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-\mu_{01}L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} . \quad (13)$$

Если принять, что μ_3 – коэффициент сепарации семян на третьем участке, то сепарация семян через участок деки второго барабана L_3 будет равна величине:

$$Z_3 = (X_1 - X_1 e^{-A_3})(1 - e^{-\mu_3 L_3}) +$$

$$+ Y_2(1 - e^{-\mu_3 L_3}) + \Delta Z_3, \qquad (14)$$

где $X_1 e^{-A_3}$ – количество невымолоченных семян, содержащихся в первой стадии обмолота второго барабана; A_3 – коэффициент, учитывающий обмолот у первой планки деки второго барабана;

$(X_1 - X_1 e^{-A_3})$ – количество невымолоченных семян в первой стадии процесса обмолота второго барабана;

$Y_2(1 - e^{-\mu_3 L_3})$ – увеличение количества прошедших семян на участке деки L_3 с учётом свободных семян, поступивших с участка L_2;

ΔZ_3 – увеличение количества прошедших семян на участке деки длиной L_3 за счёт дополнительного обмолота вторым барабаном во второй стадии процесса обмолота при $0 < \ell_3 \le L_3$.

Величина ΔZ_3 определяется суммированием дополнительных проходов семян dz_3 на участке деки длиной $d\ell_3$, каждый за счёт приращений свобод, где X_3 – количество невымолоченных семян за вторым барабаном.

$$X_3 = X_1 e^{-A_3 - \mu_{03}\ell_3} = e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_{03}\ell_3}, \qquad (15)$$

тогда $$d(x_1 - x_3) = \mu_{03}\, e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_{03}\ell_3}, \qquad (16)$$

а $$dZ_3 = d(X_1 - X_3)\left[1 - e^{-\mu_3(L_3 - \ell_3)}\right] d\ell_3, \qquad (17)$$

где $(L_3 - \ell_3)$ – длина оставшегося участка деки второго барабана, на котором еще возможна сепарация только что вымолоченных семян $d(X_1 - X_3)$.

Подставляя из (18) в (16) и интегрируя, получим:

$$\Delta Z_3 = \int_0^{L_3} \mu_{03} e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_{03}\ell_3} \left[1 - e^{-\mu_3(L_3 - \ell_3)}\right] d\ell_3, \qquad (18)$$

или $$\Delta Z_3 = e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3} + \frac{\mu_3 e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_{03}L_3} - \mu_{03} e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_3 L_3}}{\mu_{03} - \mu_3}. \qquad (19)$$

Принимая, что $\ell_3 = L_3$, получим сепарацию семян Z_3 на всей длине деки второго барабана L_3.

$$Z_3 = (X_1 - X_1 e^{-A_3})(1 - e^{-\mu_3 L_3}) + Y_2(1 - e^{-\mu_3 L_3}) + \Delta Z_3 =$$

$$= e^{-A_1 - \mu_{01}L_1} - e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - \mu_3 L_3} - e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3} + e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_3 L_3} + e^{-\mu_1 L_1 - \mu_2 L_2} +$$

$$+ \frac{e^{-A_1 - \mu_2 L_2}(\mu_1 e^{-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-\mu_{01}L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} - \frac{e^{-A_1 - \mu_2 L_2 - \mu_3 L_3}(\mu e^{-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-\mu_{01}L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} -$$

$$- e^{-\mu_1 L_1 - \mu_2 L_2 - \mu_3 L_3} + e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3} + \frac{\mu_3 e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_{03}L_3} - \mu_{03} e^{-A_1 - \mu_{01}L_1 - A_3 - \mu_3 L_3}}{\mu_{03} - \mu_3}. \qquad (20)$$

Суммарная сепарация семян Z на участке L_3 составит

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 . \quad (21)$$

После подстановки и преобразований уравнение (21) примет вид:

$$Z = 1 - e^{-\mu_1 L_1 - \mu_2 L_2 - \mu_3 L_3} - e^{-A_1 - \mu_{01} L_1 - \mu_3 L_3} -$$

$$- \frac{e^{-A_1 - \mu_2 L_2 - \mu_3 L_3} (\mu_1 e^{-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-\mu_{01} L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} -$$

$$- \frac{\mu_3 e^{-A_1 - \mu_{01} L_1 - A_3} (e^{-\mu_{03} L_3} - e^{-\mu_3 L_3})}{\mu_{03} - \mu_3} . \quad (22)$$

Анализируя выражение (23), видим, что при $L_3 = 0$ оно примет вид уравнения (14), т.е. вначале зоны второго барабана суммарное количество прошедших семян равно количеству семян, выделенных в конце участка L_2.

Для определения количества свободных семян $У_3$, сошедших с деки второго барабана, воспользуемся уравнением материального баланса для участка L_3, которое будет иметь вид:

$$X + У + Z = 1 . \quad (23)$$

$$У_3 = e^{-\mu_1 L_1 - \mu_2 L_2 - \mu_3 L_3} + e^{-A_1 - \mu_{01} L_1 - \mu_3 L_3} +$$

$$+ \frac{e^{-A_1 - \mu_2 L_2 - \mu_3 L_3} (\mu_1 e^{-\mu_1 L_1} - \mu_{01} e^{-\mu_{01} L_1})}{\mu_{01} - \mu_1} +$$

$$\frac{\mu_3 e^{-A_1 - \mu_{01} L_1 - A_3} (e^{-\mu_{03} L_3} - e^{-\mu_3 L_3})}{\mu_{03} - \mu_3} -$$

$$- e^{-A_1 - \mu_{01} L_1 - A_3 - \mu_{03} L_3} . \quad (24)$$

Таким образом, получена система уравнений, определяющая динамику процесса двухфазного обмолота.

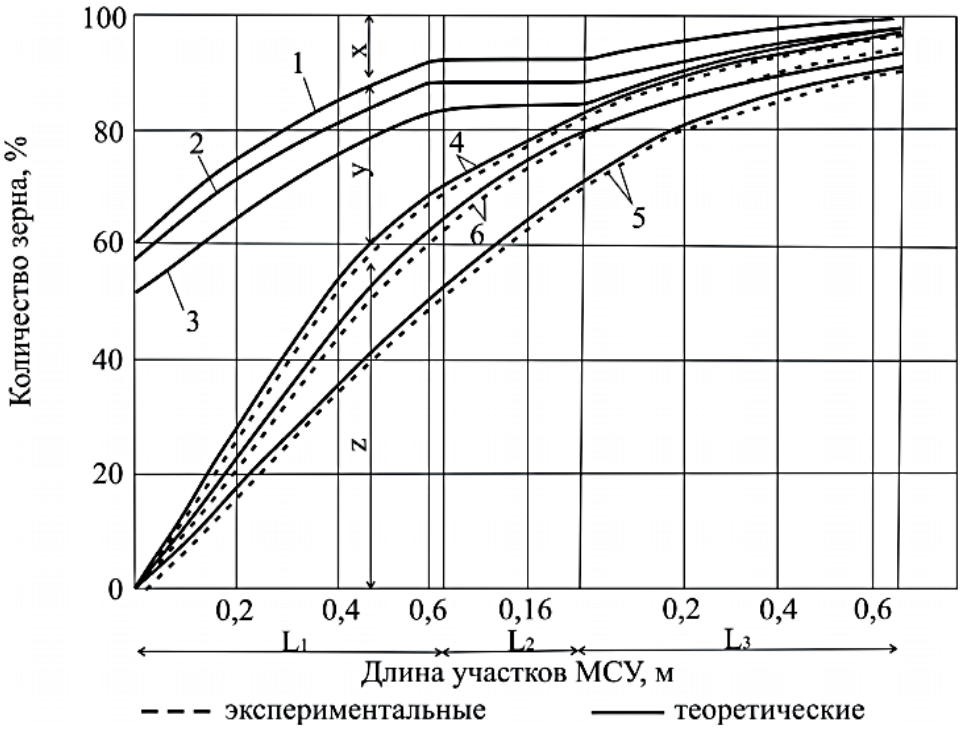
В результате проведённых исследований установлено, что наиболее интенсивно семена сои сепарируются в начале молотильно-сепарирующего устройства комбайна двухфазного обмолота. Так, например, в зоне первого молотильного барабана сепарируется до 88,5 % целых семян и до 65,1 % общего числа дроблёных семян сои при подаче в молотилку с нагрузкой 1,76 кг/с. С увеличением подачи происходит перераспределение сепарации семян сои по остальным рабочим органам молотильной группы и соломотряса. При повышении подачи до 4,9 кг/с снижается сепарация семян сои через деку первого барабана на 17,7 %, но при этом возрастает сепарация семян – от 16,0 до 28,5 % через деку второго барабана и увеличивается выход семян на соломотряс – от 0,6 до 2,8 %. Распределение соломистых примесей по сепарирующей поверхности молотилки комбайна показывает, что основная их часть (63,6…72,2 %) приходится на промежуточный битер, второй барабан и соломотряс.

По мере продвижения обмолачиваемой массы в молотильном устройстве концентрация семян сои в ворохе снижается. Содержание обмолоченных семян в зоне первого подбарабанья составляет 70,4…81,6 %, и лишь 18,4…29,6 % приходится на почву, солому, полову и невымолоченные бобы. При увеличении нагрузки на молотилку от 1,8 до 4,9 кг/с концентрация семян в ворохе, поступающая со второго барабана и клавишей соломотряса, увеличивается соответственно от 13,0 до 36,4 % и от 2,3 до 20,6 %. Состав компонентов вороха показывает, что с увеличением подачи соевой массы в молотилку от 1,8 до 4,9 кг/с, содержание дроблёных семян в мелком соевом ворохе после первого барабана снижается от 3,5…4,0 до 2,2…2,7 %. Преобладающими видами компонентов в соломистых примесях являются полова и створки бобов. Они занимают соответственно 7,3…12,1 % и 2,6…11,8 % в зоне первого молотильного барабана и в зоне второго молотильного барабана, их содержание доходит соответственно до 60,6 и 30,7 %.

Существенное влияние на изменение

состояния соевого вороха в молотильном аппарате двухфазного обмолота оказывает и окружная скорость бичей барабанов. Исследования процесса обмолота и сепарации семян сои по длине молотилки показали, что при отношении окружной скорости бичей первого и второго барабанов V_1 / V_2 = 13,24/17,56 м/с в зоне первой деки сепарируется 70,8 % семян. В зоне промежуточного битера и деки второго барабана сепарируется соответственно 12,7 и 13,7 %. При снижении окружной скорости бичей первого барабана и отношении её к окружной скорости второго барабана V_1/V_2 = 8,63/17,56 м/с сепарарируется семян сои в зоне первой деки лишь 53,6 % семян сои.

При этом количество семян, выделенных в зоне промежуточного битера и деки второго барабана, возрастает соответственно до 18,9 и 19,9 % (рисунок 2). Это происходит из-за того, что при снижении окружной скорости бичей первого барабана снижается интенсивность обмолота семян у первой планки деки первого подбарабанья и по ее длине. Об этом свидетельствует снижение от 0,916 до 0,693 коэффициента A_1, учитывающего обмолот у первой планки деки, и от 2,7 до 1,668 коэффициента μ_{01}, характеризующего интенсивность обмолота по длине деки. При этом снижается количество свободных (обмолоченных) семян в этой зоне, а содержание необмолоченных семян в сходе с первого барабана (в конце участка L_1) возрастает от 7,1 до 17,2 (зависимости 1, 2, 3 на рисунке 2) [9].



1, 2, 3 – обмолот семян по длине молотилки; 4, 5, 6 – сепарация семян сои по длине молотилки

Рисунок 2 – Влияние отношения окружных скоростей бичей барабанов на изменение соотношения соевого вороха в молотильном аппарате комбайна двухфазного обмолота
Figure 2 – The influence of the ratio of the circumferential speeds of the whip drums on the change in the ratio of the soybean pile in the threshing machine of a two-phase threshing combine

При дальнейшем движении соевой массы в молотильном аппарате вымолот зерна производится у первой планки деки второго барабана и по её длине. Причём при снижении окружной скорости бичей первого барабана от 13,24 до 8,63 м/с [16] повышает-

ся интенсивность обмолота семян. Об этом свидетельствует повышение от 0,767 до 1,41 коэффициента обмолота у первой планки деки второго барабана A_3 и от 3,186 до 3,295 – коэффициента μ_{03}, который характеризует соответственно обмолот у первой планки деки второго барабана и по её длине. Зависимости обмолота семян (2, 3) на участке L_3 возрастают более интенсивно относительно кривой (1). Содержание необмолоченных семян в сходе со второго барабана при этом увеличивается от 0,43 до 0,51 %.

Построенные на основании полученных данных аналитические зависимости коэффициентов обмолота и сепарации от величины суммарной сепарации семян сои по длине молотильно-сепарирующего устройства комбайна описываются следующими уравнениями:

$$\left.\begin{array}{c} A_1 = 1{,}979\, Z_{L\,1} + 0{,}124;\ \ \mu_{01} = 5{,}8136 Z_{L1} - 1{,}516;\ \ \mu_1 = 4{,}0698 Z_{L1} - 0{,}0514\ ; \\ A_3 = -13{,}5582 Z_{L3} + 13{,}9676;\ \mu_{03} = -2{,}2703 Z_{L3} + 5{,}3927;\ \mu_3 = 24{,}3675 Z_{L3} - 20{,}435\ ; \\ \mu_2 = -6{,}8205 Z_{L2} + 8{,}8401. \end{array}\right\} \quad (25)$$

Аналитические зависимости процессов сепарации семян сои по длине молотильно-сепарирующего устройства комбайна двухфазного обмолота, полученные с учётом определённых коэффициентов (26), согласуются с экспериментальными данными, при относительной погрешности 0,11...0,41 %.

Анализ качества семян, выделенных по длине молотильно-сепарирующего устройства, комбайна двухфазного обмолота показывает (смотреть таблицу), что по мере продвижения обмолачиваемой массы в молотильном устройстве количество семян с механическим повреждением увеличивается, а масса 1000 семян снижается.

Таблица – Характеристика семян сои сортов селекции ВНИИ сои, выделенных по длине молотильно-сепарирующего устройства комбайна двухфазного обмолота
Table – Characteristics of soybean seeds of varieties selected by the All-Russian Research Institute of Soybeans according to the length of the threshing and separating device of a two-phase threshing combine

Зоны	Дробление семян, %	Микроповреждение семян, %	Всего механически повреждённых семян, %	Масса 1000 семян, г
1	2,1	7,5	9,6	153,4
2	2,6	5,4	8,0	151,0
3	5,3	12,6	17,9	148,2
4	27,6	9,4	37,0	146,9
5	24,3	14,0	38,3	141,3

В результате проведённых исследований модернизированного комбайна двухфазного обмолота с двухпоточной очисткой на разделение после обмолота, сепарации, очистки и отдельного сбора семян сои после первого и второго барабанов установлено, что количество дроблёных семян в зоне первого барабана составляет 2,1...2,6 %, а микроповреждённых – 5,4...7,5 %. Средняя масса 1000 семян, обмолоченных и выделенных в зоне первого барабана, на 6,8 г выше средней массы семян, выделенных в зоне второго барабана.

Выводы

На основании проведённых исследований установлены зависимости и определены коэффициенты, характеризующие процесс обмолота и сепарации семян сои на участках молотильно-сепарирующего устройства комбайна двухфазного обмолота. При увеличении окружной скорости бичей первого

барабана от 8,1 до 13,2 м/с изменяются значения коэффициентов:

- у первой планки деки показатель коэффициента обмолота семян сои первого барабана (A_1) варьировал от 0,693 до 0,916, а первой планки деки второго барабана (A_3) – от 0,41 до 0,77;

- коэффициент интенсивности обмолота семян на участке деки первого барабана (μ_{01}) составил от 1,67 до 2,7, у деки второго барабана (μ_{03}) – от 3,29 до 3,30;

- коэффициент интенсивности сепарации семян на участке деки первого барабана (μ_1) – от 2,10 до 2,81, на решете промежуточного битера (μ_2) – от 3,86 до 3,12; на деки второго барабана (μ_3) – от 2,17 до 3,33;

Установлено, что наиболее интенсивно вымолачиваются и сепарируются семена сои в начальной зоне молотильно-сепарирующего устройства двухфазного обмолота. В зоне первой деки сепарируется до 70 % биологически полноценных вызревших семян, массовая доля которых на 4,1...6.8 г выше массы 1000 семян, выделенных вторым барабаном. Модернизация комбайна с двухпоточной воздушно-решётной очисткой, выделение и сбор семян отдельным потоком, вымолачиваемых первым барабаном, позволит снизить суммарные потери зерна и выделить отдельным потоком до 60 % полноценных семян сои с пониженным содержанием дробления и сорной примеси для использования их на посеве без подработки.

Список источников

1. 100 вопросов и ответов о возделывании сои (рекомендации для руководителей и специалистов сельскохозяйственных предприятий) / Под общей ред. М. О. Синеговского. Благовещенск: ООО «Одеон», 2021. 79 с.

2. Иовлев Г. А., Голдина И. И. Обзор испытаний зерноуборочных комбайнов на качество выполнения технологического процесса обмолота зерновых культур: Россия, Беларусь // Теория и практика мировой науки. 2017. № 11. С. 56–61.

3. Совершенствование процесса обмолота, сепарации и транспортирования для повышения качества семян при комбайновой уборке сои: монография / И. М. Присяжная, С. П. Присяжная, М. М. Присяжный, П. П. Проценко. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2018. 192 с.

4. Чаплыгин М. Е, Жалнин Э. В., Алдошин Н. В. Оценка эффективности работы молотилки комбайна по потерям зерна при рабочих режимах / Тракторы и сельхозмашины. 2025. № 92 (1). С. 81–87. https://doi.org/10.17816/0321-4443-636682

5. Aldoshin N. V. Comparative assessment of combines for harvesting white lupine. Rural machine operator. 2015;11:10–13.

6. Zhalnin E. V., Chaplygin M. E. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. Engineering technologies and systems. 2023;33(3):403–416. https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416

7. Оборская Ю. В., Ран О. П. Влияние физико-механических свойств семян различных сортов сои на степень их травмирования // Современные технологии производства и переработки сельскохозяйственных культур: сборник научных статей научно-практической конференции (с международным участием), посвященной 105-летию со дня рождения селекционера, заслуженного агронома РФ. Т. П. Рязанцевой. Благовещенск: ООО «Типография», 2017. С. 257–265.

8. Prisyazhnaya I. M. Checking the validity of soy threshing and separation models using experimental data // Irina Prisyazhnaya, Serafima Prisyazhnaya, Valentina Sinegovskaya, Mikhail Sinegovskiy // Lecture Notes in Networks and Systems. International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East». 1(353) (2022) 522260, (Vol. 1 (353), 06, 2022). P. 230–237. ISSN: 2367-3370. E-ISSN: 2367-3389. ISBN 978-303091401-1. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

9. Присяжная И. М., Присяжная С. П. Совершенствование процесса уборки сои для получения семян в комбайне двухфазного обмолота: монография. Благовещенск: ООО «Типография», 2024. 208 с.

10. Алферов С. А., Брагинец В. С. Обмолот и сепарация зерна в молотильных устройствах как еди-

ный вероятностный процесс // Тракторы и сельхозмашины. 1972. № 4. С. 23–26.

11. Гиевский А. М., Оробинский В. И., Чернышев А. В., Баскаков И. В., Дружинин Р. А. Обоснование выбора типа комбайна для уборки посевов сои на кормовые и семенные цели // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 1 (72). С. 12–22. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243-2022-1-12

12. Гиевский А. М., Чернышев А. В., Маслов Д. Л., Мигульнов В. Ю. Обоснование режима работы молотильно-сепарирующего устройства комбайна при уборке сои // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. № 1 (60). С. 50–56.

13. Бумбар И. В. Уборка сои: монография. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2006. 240 с.

14. Результаты исследования динамической прочности семян некоторых масличных культур // Бюллетень научно-технической информации по масличным культурам ВНИИМК. Краснодар: Изд-во ВНИИМК, 1970. С. 66–70.

15. Технологии возделывания сои / РосАгроХим, ГНУ ВНИИ сои, ГНУ ДальНИИМЭСХ. М.: РосАгроХим, 2010. 46 с.

16. Присяжная И. М. Разработка адаптирующих устройств комбайна для получения качественных семян при уборке сои / И. М. Присяжная, С. П. Присяжная, А. В. Липкань // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 2. С. 84–88. https://elibrary.ru/item.asp?id=50513218

References

1. 100 voprosov i otvetov o vozdelyvanii soi (rekomendatsii dlya rukovoditelei i spetsialistov sel'skokhozyaistvennykh predpriyatii) [100 of questions and answers about soybean cultivation (recommendations for managers and specialists of agricultural enterprises)] / Pod obshchei redaktsiei M. O. Sinegovskogo. Blagoveshchensk: IPK "ODEON, 2021;79. (In Russ.).

2. Iovlev GA, Goldina II. Review of tests of grain harvesters on the quality of performance of the technological process of threshing grain crops: Russia, Belarus. *Theory and practice of world science*. 2017;11:56–61. (In Russ.).

3. Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP, Prisyazhnniy MM, Proczenko PP. Sovershenstvovanie protsessa obmolota, separatsii i transportirovaniya dlya povysheniya kachestva semyan pri kombainovoi uborke soi: monografiya [Improving the process of threshing, separation and transportation to improve the quality of seeds in soybean harvester harvesting: monograph. Blagoveshchensk: Amurskii gosudarstvennyi universitet, 2018;192. (In Russ.).

4. Chaplygin ME, Zhalnin EV, Aldoshin NV. Evaluation of the combine harvester's thresher efficiency by grain losses at operating conditions. *Traktory i sel'skokhozyaistvennye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(1):81–87. (In Russ.) https://doi.org/10.17816/0321-4443-636682

5. Aldoshin NV. Comparative assessment of combines for harvesting white lupine. *Rural machine operator*. 2015;11:10–13. (In Russ.)

6. Zhalnin EV, Chaplygin ME. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. *Engineering technologies and systems*. 2023;33(3):403–416. (In Russ.). https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416

7. Oborskaya, Yu, Ran OP. Vliyanie fiziko-mekhanicheskikh svoistv semyan razlichnykh sortov soi na stepen' ikh travmirovaniya [Influence of physical and mechanical properties of seeds of different soybean varieties on the degree of their injury]. Sovremennye tekhnologii proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaistvennykh kul'tur: sbornik nauchnykh statei nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem), posvyashchennaya 105-letiyu so dnya rozhdeniya selektsionera, zasluzhennogo agronoma RF T.P. Ryazantsevoi. Blagoveshchensk: OOO Tipografiya, 2017;257–265. (In Russ.).

8. Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP, Sinegovskaya VT, Sinegovskiy MO. Checking the validity of soy threshing and separation models using experimental data. Lecture Notes in Networks and Systems. International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East». 1(353), (2022), 522260, (Vol. 1 (353), 06, 2022). P. 230–237. (In Russ.) ISBN 978-303091401-1. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

9. Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP. Sovershenstvovanie protsessa uborki soi dlya polucheniya semyan v kombaine dvukhfaznogo obmolota: monografiya [Improving the process of harvesting soybeans to obtain seeds in the combine of two-phase threshing: monograph]. FGBNU FNC VNII Soy Blagoveshchensk: OOO «Tipografiya», 2024;208. (In Russ.).

10. Alferov SA, Braginets BC. Grain threshing and separation in threshing devices as a single probabilistic process. *Traktory i sel'skokhozyaistvennye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 1972;4:23–26. (In Russ.).

11. Gievskij AM, Orobinskij VI, Chernyshov AV, et al. Justification of the choice of the type of combine harvester for harvesting soybean crops for fodder and seed purposes. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Agrarian University.* 2022;15:1(72):12–22. (In Russ.). https: // doi.org /10.53914/ ISSN 2071-2243-2022-1-12

12. Gievsky AM, Chernyshov AV, Maslov DL, Migulnov VY. Justification of the mode of operation of the threshing and separating device of the combine during soybean harvesting. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo* universiteta = Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2019;1(60):50–56. (In Russ.).

13. Boombar IV. Uborka soi: Monografiya [Cleaning of Soybeans: Monograph]. Blagoveshchensk: Izd-vo DalGAU, 2006. 240 p. (In Russ.).

14. Results research dynamically strength seeds some olives cultures. *Bulletin scientifically-technical information by olives cultures VNIIMK*. Krasnodar: Izd-vo VNIIMK, 1970;66–70. (In Russ.).

15. Tekhnologii vozdelyvaniya soi: Rekomendatsii [Soybean cultivation technologies: Recommendations]. RosAgroChem, Soybean Research Institute, GNY DalNIIMESH. Moskow: RosAgroHim, 2010. 46 p. (In Russ.).

16. Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP, Lipcan AV. Development of combine adaptors for obtaining quality seeds when harvesting soybeans. *Journal of Russian Agricultural Science*. 2023;2:84–88. (In Russ.). https:// elibrary.ru/item.asp?id=50513218

Информация об авторах

И. М. Присяжная – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник;
С. П. Присяжная – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник;
Д. С. Котенко – инженер-исследователь.

Information about the authors

I. M. Prisyazhnaya – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher;
S. P. Prisyazhnaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher;
D. S. Kotenko – Research engineer.

Статья поступила в редакцию 16.07.2025; одобрена после рецензирования 18.07.2025; принята к публикации 28.07.2025

The article was submitted 16.07.2025; approved after reviewing 18.07.2025; accepted for publication 28.07.2025