ИНЖЕНЕРНЫЕ АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ НАУКИ

DOI: 10.35523/2307-5872-2023-43-2-92-100
УДК 621.436

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ МАШИН ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Апажев А.К., ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»;
Шекихачев Ю.А., ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»;
Хажметов Л.М., ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»;
Пазова Т.Х., ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»;
Фиапшев А.Г., ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»;
Барагунов А.Б., ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»

Наиболее характерными показателями производственного качества отремонтированных агрегатов являются погрешности размеров формы деталей, взаимного расположения их поверхностей, величины замывавших звеньев размерных цепей механизмов, физико-механические свойства материалов и т.п. На ремонтном предприятии путем проведения соответствующих измерений определяются величины показателей производственного качества партий изделий. Затем в эксплуатации за этими изделиями ведется наблюдение с целью определения их потребительского качества. Потребительское качество отремонтированных изделий может выражаться рядом показателей, но наиболее целесообразным является использование такого показателя, как намотка до первого отказа, вызванного процессами старения (износ, усталостное разрушение и т.п.). При проведении исследований определяется номенклатура основных и вспомогательных показателей, характеризующих потребительское качество системы. Затем внутри системы выделяются отдельные подсистемы и рассматриваются их взаимные связи, каналы передачи и характер сигналов, определяются показатели производственного качества каждой подсистемы. В результате исследований получаем информацию о величинах показателей производственного качества подсистем и величинах наработки этих подсистем до отказа. Строятся корреляционные уравнения, связывающие потребительское и производственное качество подсистем и определяются показатели потребительского качества системы в целом. На основе этой информации строят математические модели, отражающие корреляционную связь производственного и потребительского качества отдельных подсистем. После этого производится построение общей математической модели системы в целом. Предложенные методы прогнозирования долговечности деталей машин и долговечности агрегатов и узлов по показателям долговечности их элементов могут служить научной основой для определения годности отремонтированных изделий.

Ключевые слова: *машина, агрегат, узел, ремонт, качество, долговечность, надежность, прогнозирование.*

Для цитирования: *Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М., Пазова Т.Х., Фиапшев А.Г., Барагунов А.Б. Методика прогнозирования долговечности агрегатов и узлов машин по показателям долговечности их элементов // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 2 (43). С. 92-100.*

Введение. Для повышения качества продукции одной его оценки недостаточно. Необходимо иметь не только сам оценочный показатель, но и заявить факторы, оказывающие влияние на формирование качества, и исследовать это влияние. Только тогда появляется возможность осуществлять управление качеством.

Производственное качество представляет собой совокупность свойств продукции (физических, химических, физико-механических и др.), полученных ею в процессе изготовления или ремонта. Потребительское качество продукции проявляется в процессе потребления (эксплуатации) и определяется совокупным воздействием всех характеристик производственного качества и условиями потребления. В фиксированных условиях потребления потребительское качество продукции зависит от производственного, и эта зависимость является корреляционной:

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n). \quad (1)$$

С помощью корреляционного уровня можно решить две основные задачи:

1) оперативная оценка качества на стадии производства (ремонта), основанная на прогнозировании потребительского качества проекции по известным значениям показателей ее производственного качества;

2) управление производственным качеством продукции в соответствии с заданным уровнем ее потребительского качества.

Цель исследования. Разработка методических рекомендаций для прогнозирования долговечности агрегатов и узлов машин по показателям долговечности их элементов.

Метод исследования. Для исследования качества отремонтированной продукции используем экономико-статистический метод.

Качество продукции рассматривается в двух аспектах: производственное и потребительское.

Агрегат рассматривается как сложное изделие, состоящее из ряда подсистем. Исследование связи производственного и потребительского качества ведется отдельно для каждой подсистемы [1-6].

Двигатель при исследовании качества рассматривается как система, состоящая из ряда подсистем. Каждая подсистема рассматривается как простое изделие. Определяются показатели ее производственного качества, находится связь с потребительским качеством, анализируются связи с другими подсистемами. На рис. 1 представлена схема исследования качества сложного изделия.

Исследование и оценка качества отремонтированной продукции рассматриваются на примере двигателя [7-13].

Общая методика исследования качества двигателей состоит в следующем:

- определяется номенклатура основных и вспомогательных показателей, характеризующих потребительское качество системы;
- внутри системы выделяются отдельные подсистемы и рассматриваются их взаимные связи, каналы передачи и характер сигналов;
- определяются показатели производственного качества каждой подсистемы;
- строятся корреляционные уравнения, связывающие потребительское и производственное качество подсистем;
- определяются показатели потребительского качества системы в целом;
- строится математическая модель, отражающая зависимость показателей потребительского качества системы от показателей производственного качества подсистем;

- в соответствии с существующими требованиями накладываются ограничения на показатели потребительского качества системы и определяются допустимые величины показателей производственного качества.

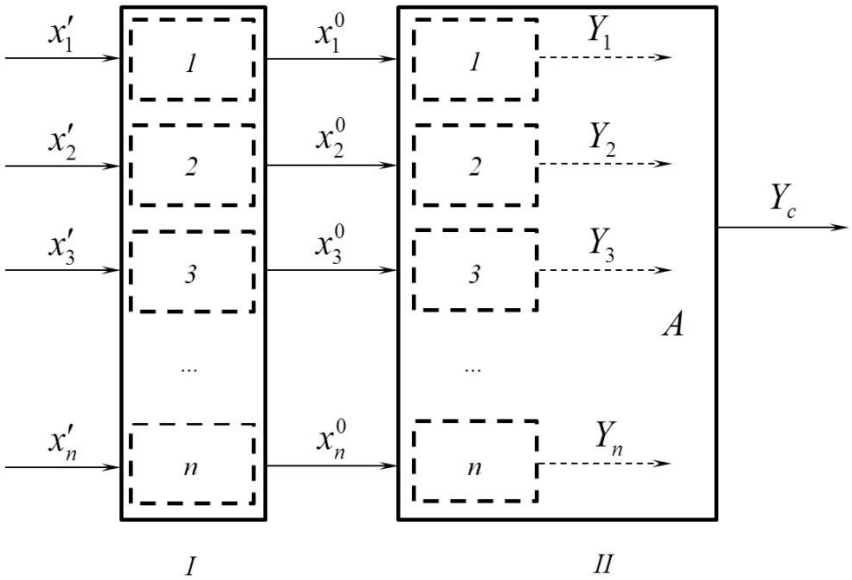


Рисунок 1 – Схема исследования качества сложного изделия: x'_i, x^0_i - совокупности соответственно первичных и комплексных показателей производственного качества i-ой подсистемы (i = 1, 2,..., n); Y_c - совокупность показателей потребительского качества системы; Y_i - совокупность показателей потребительского качества i-ой подсистемы; A - оператор, формирующий общий показатель; I - сборка изделия; II - эксплуатация изделия.

Результаты исследования. Производственное качество двигателей окончательно формируется в процессе сборки (приработка агрегатов не рассматривается). Входом процесса сборки является состояние деталей, которое характеризуется совокупностью первичных показателей x'. Производственное качество собранного изделия характеризуется совокупностью комплексных показателей x'', зависящих от первичных и качества выполнения сборочных операций. Комплексные показатели несут в себе больше информации о состоянии объекта, но измерить их не всегда возможно. В этих случаях для оценки производственного качества используются первичные показатели.

Основным показателем, объективно характеризующим потребительское качество ремонта двигателя, является величина его наработки до отказа одной из подсистем, вызванной процессами старения.

Часто экономическая оценка качества таких сложных изделий, как двигатель, не может учесть рад важных свойств, поэтому требуются дополнительные показатели, на которые накладываются соответствующие ограничения.

Для двигателей такими показателями являются мощность, устойчивость работы на малых оборотах, давление масла в магистрали, шум, вибрация, содержание вредных примесей в выхлопных газах, запас усталостной прочности деталей и др. Если величина какого-либо показателя выходит за допустимую границу, то изделие не считается годным и качество его не оценивается.

Наработка системы до отказа в условиях конкретной реализации определяется наработкой наиболее «слабой» подсистемы. Получив для этой подсистемы уравнение, связывающее ее производ-

ственное и потребительское качество, строится математическая модель для всей системы. Для решения этой задачи используется метод Монте-Карло и методы планирования экспериментов.

Условия работы подсистемы, а следовательно, и сроки их службы определяются как внутренними, так и внешними факторами. Внутренними факторами являются показатели производственного качества самой подсистемы, внешние факторы - это проявление воздействия окружения. Из общей совокупности факторов для исследования выделяется группа факторов, характеризующих качество ремонта.

Рассматривая двигатель как сложное изделие, по функциональному признаку можно выделить следующие подсистемы: питания; газораспределения; зажигания; цилиндро-поршневую группу; шатунно-поршневую группу; коленчатый вал - коренные подшипники; сцепления; смазки; охлаждения.

Для каждой подсистемы определяется номенклатура показателей, характеризующих, главным образом, их производственное качество; собирается исходная информация о производственном и потребительском качестве данной подсистемы, а затем строится математическая модель:

$$\bar{y}_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{in}), \qquad (2)$$

где $\bar{y}_i$ – среднее значение показателя потребительского качества i-ой подсистемы; $x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{in}$ – показатели производственного качества i-ой подсистемы.

После получения таких математических моделей для всех подсистем выполняется следующий этап - построение математической модели системы в целом.

Для определения наработки всего изделия (L) по известным значениям наработок его подсистем (L_i) используется метод Монте-Карло. Сущность этого метода заключается в использовании заработанных тем или иным образом случайных чисел с заданным законом распределения.

Решение задачи построения математической модели системы в целом осуществляется в два этапа на ЭВМ. На первом этапе разрабатывается алгоритм определения наработки системы (L) при заданных значениях показателей производственного качества отдельных подсистем (x). На втором этапе путем изменения исходных данных (x) определяются соответствующие значения наработки системы (L), и на основе этой информации уже строится непосредственно тематическая модель системы. Оба этапа выполняются на ЭВМ, т.е. натурные испытания двигателей заменяются машинным экспериментом.

Для выполнения первого этапа необходимо иметь математические модели, отражающие связь производственного и потребительского качества всех подсистем изделия:

$$L_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{in}). \qquad (3)$$

После этого необходимо знать схему наступления отказа, т.е. схему условного соединения элементов в системе.

За показатель потребительского качества двигателя принята наработка агрегата до первого отказа какой-нибудь подсистемы. То есть мы имеем дело с последовательным соединением элементов. Наработка каждого конкретного двигателя определяется наработкой наиболее «слабой» его подсистемы, т.е.:

$$L = \min(L_1, L_2, \ldots, L_n), \qquad (4)$$

где L - наработка двигателя до первого отказа; $L_1, L_2, \ldots, L_n$ - величины наработок отдельных его подсистем.

Решение первого этапа задачи выполняется в следующей последовательности.

1. В качестве исходных данных задаются определенные конкретные значения показателей производственного качества ($x_1, x_2, \ldots, x_n$).

2. Согласно заданным значениям x с помощью математических моделей подсистем вычисляются средние значения наработок $\overline{L_i}$ подсистем и их дисперсии $S^2(L)$.

3. Производится моделирование случайных значений наработок подсистем в соответствии с видом закона распределения и его параметрами. Величины наработок подсистем двигателя распределяются по нормальному закону. Оценками параметров распределений являются средняя величина наработки $\overline{L_i}$ и ее дисперсия $S^2(L)$.

На ЭВМ с помощью датчиков случайных чисел (ДСЧ) вырабатывается центрированное и нормированное случайное нормально распределенное число η. Математическое ожидание $M(\eta)$=0 (условие центрирования), дисперсия $D(\eta)$=1 (условие нормирования). Число распределяется по нормальному закону в диапазоне от -3 до +3. С помощью случайных чисел η моделируются случайные величины наработки подсистемы в j-той реализации. При моделировании производится денормирование числа η путем умножения его на величину его квадратического отклонения наработки подсистемы $S(L)$ и центрирование путем перемещения по числовой оси на величину $\overline{L_i}$, т.е. случайная величина наработки i-той подсистемы в j-той реализации равна:

$$L_{ij} = \overline{L_i} + \eta_j S(L). \tag{5}$$

Получив таким образом случайные значения наработок всех подсистем в j-той реализации ($L_{1j}, L_{2j}, \ldots, L_{nj}$), определяем величину наработки j-того двигателя, которая равна минимальной из всех величин наработок подсистем:

$$L_j = \min\left(L_{1j}, L_{2j}, \ldots, L_{nj}\right). \tag{6}$$

Полученное значение L_j является единичной реализацией (единичным наблюдением). Процесс моделирования наборов, состоящих из n случайных величин L_j, повторяется m раз. И каждый раз из n случайных величин наработок подсистем L_j выбирается минимальная, которая и является наработкой всего изделия до первого отказа в заданной реализации. Таким образом, набирается совокупность случайных величин наработки двигателя до отказа при заданных неизменных исходных значениях показателей производственного качества. Различные случайные значения L_{ij} в каждой j-той реализации и, соответственно, различные значения наработки всего двигателя L_j при неизменных значениях показателей производственного качества получаются за счет выработки с помощью ДСЧ, каждый раз новых случайных чисел η, участвующих в моделировании случайных величин L_{ij}.

4. После получения совокупности m случайных значений наработки двигателя L_j при заданных значениях показателей производственного качества x вычисляются характеристики этой совокупности. Среднее значение наработки двигателя:

$$L = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} L_j. \tag{7}$$

Выборочная дисперсия наработки двигателя:

$$S^2(L) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(L_j - \overline{L}\right)^2. \tag{8}$$

На первом этапе получены характеристики распределения наработки двигателя при определенных значениях показателей его производственного качества. В целом задача является

более широкой: необходимо построить математическую модель, отражающую влияние указателей производственного качества двигателя на его потребительское качество. Для этого необходимо весь процесс моделирования реализовать определенное число раз для различных значений указателей производственного качества.

Введение каждый раз новых исходных данных (x) ведет к соответствующему изменению средних наработок подсистем и, как следствие, к изменению наработки в целом. В этом случае эксперимент на ЭВМ заменяет натурный эксперимент, в котором производится длительная подконтрольная эксплуатация двигателей с различным производственным качеством. На основе получаемой таким образом информации строится математическая модель для двигателя.

Наработка системы до отказа определяется наиболее «слабой» в J-той реализации подсистемой:

$$L_j = \min\left(L_{1j}, L_{2j}, \ldots, L_{nj}\right). \tag{9}$$

где L_j - наработка системы до отказа в j-той реализации; $L_{1j}, L_{2j}, \ldots, L_{nj}$ - величины наработок $1,2,\ldots,n$-ой подсистем до отказа в j-той реализации.

Дифференциальный закон распределения случайной величины имеет вид:

$$y(L) = \sum_{k=1}^{n} y_k(L) \prod \int_{L}^{\infty} y_i(L_i) dL_i. \tag{10}$$

При исходных гаусовских распределениях случайных величин L_j, при качестве подсистем $n \le 10$, закон распределения незначительно отличается от нормального. Параметры закона распределения $y(L)$ математическое ожидание $M(L)$ и дисперсия $D(L)$ определяются формулами:

$$M(L) = \int_0^{\infty} L y(L) dL; \tag{11}$$

$$D(L) = \int_0^{\infty} [L - M(L)]^2 y(L) dL. \tag{12}$$

С учетом законов распределения $\varphi(L_i)$ получаем:

$$M(L) = \int_0^{\infty} L \sum_{n=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{2\pi} G_k(L)} e^{-\frac{[L - M_k(L)]^2}{2G_k^2(L)}} =$$

$$= \prod_{i=k} \int_0^{\infty} L \sum_{n=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{2\pi} G_k(L)} e^{-\frac{[L - M_i(L)]^2}{2G_i^2(L)}} dL. \tag{13}$$

$$D(L) = \int_0^{\infty} \left\{ [L - M(L)]^2 \sum_{n=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{2\pi} G_k(L)} e^{-\frac{[L - M_k(L)]^2}{2G_k^2(L)}} \right\} =$$

$$= \prod_{i=k} \int_0^{\infty} \left\{ [L - M(L)]^2 \sum_{n=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{2\pi} G_k(L)} e^{-\frac{[L - M_i(L)]^2}{2G_i^2(L)}} dL_i \right\} dL = \tag{14}$$

Интервалы в этих формулах не берется, поэтому для определения параметров закона распределения наработки системы использованы численные методы. С помощью метода Монте-Карло моделирует система, при этом представляется возможность не только вычислять оценки параметров распределения, но и проверить гипотезу о законе распределения.

Исходными данными при решении задачи являются показатели производственного качества x_i. По ним вычисляются соответствующие значения оценок параметров распределения величин наработок отдельных подсистем $\overline{L_i}$ и $S^2(L_i)$.

После этого по смоделированным нормально распределенным случайным числам отделяются случайные величины L_{ij}, где i - номер подсистемы; j - номер реализации.

По полученным значениям L_{ij} согласно выражению (9) определяется наработка системы до отказа L_j. При проведении эксперимента на ЭВМ целесообразно использовать теорию планирования эксперимента.

Полученная математическая модель позволяет решать две основные задачи:

1) прогнозирование наработки системы на стадии производства (ремонта) по известным значениям показателей производственного качества x_i;

2) определение допустимых значений показателей производственного качества по заданной наработке системы.

Для оперативной производственной оценки качества отремонтированных двигателей построена номограмма (рис. 2), позволяющая по известным значениям двух показателей производственного качества прогнозировать среднюю наработку двигателя.

Для прогнозирования наработки двигателя в соответствии со значением показателя x_2 выбирается нужная кривая на графике и по значению x_3 определяется величина $\overline{L}$. Оперативная оценка качества отремонтированных двигателей осуществляется на основе прогнозирования их наработки. Определив по результатам производственного контроля средние значения производственного качества двигателей, ремонтируемых на данном предприятии, представляется возможность с помощью прогнозирования наработки оценить качество выпускаемой продукции.

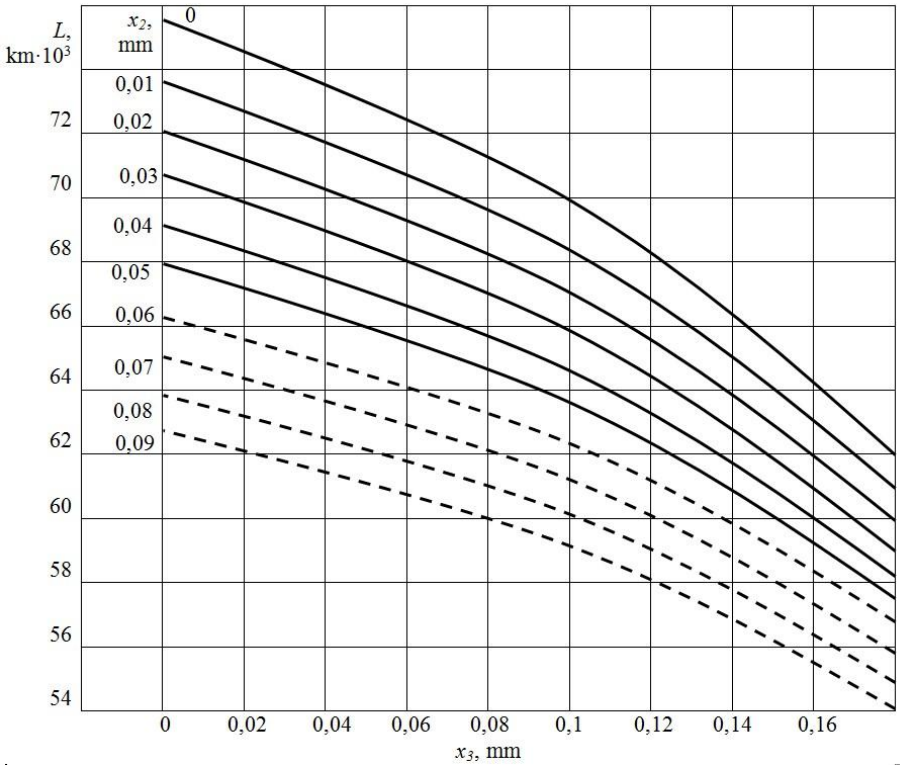


Рисунок 2 – Номограмма для прогнозирования наработки двигателя

Выводы. Предложенные методы прогнозирования позволяют определять распределения ресурса элементов машин и агрегатов в зависимости от качества изготовления (ремонта), условий эксплуатации и режимов работы.

При реализации предлагаемого подхода к оценке ресурса изделий необходимо использовать характеристики: сопротивления усталости деталей при многоцикловом нагружении; нагруженности деталей машин; износостойкости в конкретных условиях эксплуатации и вероятностно-статистические методы исследований.

Список используемой литературы

1. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Результаты определения оптимальных значений межремонтных наработок тракторов в аграрном производстве с учетом уровня их эксплуатации // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 2 (40). С. 87-90.
2. Хусаинов Р.К., Галиев И.Г. Обоснование расхода ресурса агрегатов и систем трактора с учетом диференцированного подхода при назначении технологических операций на плановый период // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2013. Т. 8. № 2 (28). С. 73-76.
3. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Обоснование выбора варианта ремонтных воздействий с учетом интенсивности расхода ресурсов агрегатов трактора // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2014. Т. 9. № 2. (32). С. 68-71.
4. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Определение весомости технологических операций и уровня расхода ресурса агрегатов и систем трактора Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2012. Т. 7. № 3 (25). С. 74-77.
5. Галиев И.Г., Зиганшин Б.Г., Абдрахманов Р.К., Хусаинов Р.К. Обоснование уровня дифференциации сельскохозяйственных работ по тракторам // Техника и оборудование для села. 2017. № 10. С. 28-31.
6. Khaliullin F.Kh., Matyashin A.V., Akhmetzyanov R.R., Medvedev V.M., Lushnov M.A. Prospects for using the bayes algorithm for assessing the technical condition of internal combustion engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic collection. 2019. С. 012016.
7. Yahin S., Gabdrafikov F., Khaliullin F., Khusainov R., Naficov I. Improving the operational efficiency of tractors by ensuring their ability to perform work // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2020. С. 00111.
8. Sinitsky S.A., Medvedev V.M., Lukmanov R.R., Pikmullin G.V., Makarova O.I. Investigation of the effect of air supply on the effective engine performance of a machine-tractor unit under unsteady load // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2020. С. 00025.
9. Galiev I., Khafizov C., Adigamov N., Khusainov R. Increase of efficiency of tractors use in agricultural production // Engineering for Rural Development. Proceedings. 2018. С. 373-377.
10. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Egozhev A.M., Shekikhacheva L.Z., Egozhev A.A. Improving the durability of machine parts connections IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 862(3). 032005.
11. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z. Influence of non-uniformity of fuel supply parameters on diesel engine performance // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. 1679. 042063.
12. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I. Technological support for the accuracy of the assembly of mechanisms Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. 1679. 042062.
13. Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z., Bolotokov A.L., Gubzhokov H.L. Prediction of service life of auto-tractor engine parts IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 862(3). 032001.

References

1. Galiev I.G., Khusainov R.K. Rezultaty opredeleniya optimalnykh znacheniy mezhremontnykh narabotok traktorov v agrarnom proizvodstve s uchetom urovnya ikh ekspluatatsii // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. T. 11. № 2 (40). S. 87-90.
2. Khusainov R.K., Galiev I.G. Obosnovanie raskhoda resursa agregatov i sistem traktora s uchetom diferentsirovannogo podkhoda pri naznachenii tekhnologicheskikh operatsiy na planovyy period // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. T. 8. № 2 (28). S. 73-76.
3. Galiev I.G., Khusainov R.K. Obosnovanie vybora varianta remontnykh vozdeystviy s uchetom intensivnosti raskhoda resursov agregatov traktora // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. T. 9. № 2. (32). S. 68-71.
4. Galiev I.G., Khusainov R.K. Opredelenie vesomosti tekhnologicheskikh operatsiy i urovnya raskhoda resursa agregatov i sistem traktora Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. T. 7. № 3 (25). S. 74-77.
5. Galiev I.G., Ziganshin B.G., Abdrakhmanov R.K., Khusainov R.K. Obosnovanie urovnya differentsiatsii selskokhozyaystvennykh rabot po traktoram // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2017. № 10. S. 28-31.
6. Khaliullin F.Kh., Matyashin A.V., Akhmetzyanov R.R., Medvedev V.M., Lushnov M.A. Prospects for using the bayes algorithm for assessing the technical condition of internal combustion engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic collection. 2019. S. 012016.
7. Yahin S., Gabdrafikov F., Khaliullin F., Khusainov R., Naficov I. Improving the operational efficiency of tractors by ensuring their ability to perform work // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2020. S. 00111.
8. Sinitsky S.A., Medvedev V.M., Lukmanov R.R., Pikmullin G.V., Makarova O.I. Investigation of the effect of air supply on the effective engine performance of a machine-tractor unit under unsteady load // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2020. S. 00025.
9. Galiev I., Khafizov S., Adigamov N., Khusainov R. Increase of efficiency of tractors use in agricultural production // Engineering for Rural Development. Proceedings. 2018. S. 373-377.
10. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Egozhev A.M., Shekikhacheva L.Z., Egozhev A.A. Improving the durability of machine parts connections IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 862(3). 032005.
11. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z. Influence of non-uniformity of fuel supply parameters on diesel engine performance // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. 1679. 042063.
12.Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I. Technological support for the accuracy of the assembly of mechanisms Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. 1679. 042062.
13. Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z., Bolotokov A.L., Gubzhokov H.L. Prediction of service life of auto-tractor engine parts IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 862(3). 032001.

DOI: 10.35523/2307-5872-2023-43-2-101-111
УДК 662.711.4

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ГРАНУЛ КОМПОЗИТНОГО БИОТОПЛИВА ОТ ИХ ТЕМПЕРАТУРЫ В ФИЛЬТРУЮЩЕМ СЛОЕ

Гонова О.В., ФГБОУ ВО «Верхневолжский ГАУ»;
Гонова В.А., ФГБОУ ВО ИГХТУ;
Семенчук Р.О., ФГБОУ ВО ИГХТУ

В последние десятилетия топливно-энергетический вопрос становится всё более актуальным для исследования. Первоочередной задачей для обеспечения потребностей нашей страны в данном виде ресурса является применение экологически чистого продукта в виде местного возобновляемого топлива, пригодного для дальнейшего технологического использования. Среди полезных ископаемых, требующих комплексного подхода к освоению, торф занимает особое место. По сложности состава и наличию большого количества химических веществ он представляет интерес для многих отраслей народного хозяйства, включая сельское хозяйство. Однако композитное биотопливо зачастую, обладает высокими теплотехническими свойствами (теплотой сгорания, зольностью и т.п.), что существенно влияет на эффективную работу систем автоматизации и механизации. Создание композитных топлив с заданными физико-механическими свойствами позволяет решить данную проблему. В статье авторами обобщены материалы экспериментов по сушке биотоплива на основе У:Т:О:М=7:5:3:0,4 и размера частиц hxd=10x10 мм для расчета функции влагосодержания материала от его температуры $U(t_м)$ и нагреванию гранулированного биотоплива, осложненного массообменом. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде графического отображения зависимости влагосодержания материала от его температуры $U(t_м)$ при различных значениях критерия Рейнольдса $Re_г$=3500-5000, а также зависимость температуры гранулы композитного биотоплива в слое и окружающей её среде от времени процесса нагрева. Таким образом, получены рациональные технологические параметры формирования гранулированного композитного биотоплива заданного компонентного состава.

Ключевые слова: *торф, теплообмен, композитное биотопливо, гранулирование, лабораторная установка, экспериментальные исследования.*

Для цитирования: *Гонова О.В., Гонова В.А., Семенчук Р.О. Расчетно-экспериментальное исследование изменения влагосодержания гранул композитного биотоплива от их температуры в фильтрующем слое // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 2 (43). С. 101-111.*

Введение. Торф и продукты его переработки находят широкое применение в сельском хозяйстве, химической технологии, медицине, энергетике, охране окружающей среды. В последние годы значительно возрос интерес к торфу не только как к топливу, к сырью для производства органических удобрений, но и как к материалу для получения белковых и кормовых добавок, гранулированных удобрений, активных углей и сорбентов различного назначения, медицинских препаратов, разнообразных материалов для сельского хозяйства, бытовой химии, химической технологии. Торф представляет собой рыхлую бесформенную неоднородную массу, чаще всего добытую при помощи фрезерного оборудования либо экскавацией. В качестве одного из путей частичного решения проблемы неоднородного состава предлагается повысить технологичность торфа путём гранулирования. Гранулирование открывает возможность гомогенизировать смесь в отношении физико-химических свойств; увеличить поверхность тепломассообмена; регулировать структуру гранул и связанные с ней свойства [3,4,5]. Все это способствует интенсификации процессов, в ко-

торых используются гранулированные продукты, повышению производительности труда и культуры производства. Представляют научный и практический интерес анализ и выбор наиболее прогрессивных способов и составов рецептур для получения гранулированных композиционных материалов на основе торфа самого различного применения. Данный анализ необходим для выработки практических рекомендаций разработчикам оборудования для гранулирования.

Целью исследования является расчетно-экспериментальное исследование изменения влагосодержания гранул композитного топлива от их температуры в фильтрующем слое.

Методы исследования. Развитие техники сушки различных материалов во взвешенном состоянии требует расчетных уравнений, позволяющих определить длительность сушки. Большей частью коэффициенты уравнений зависят от искомых функций (температуры, влагосодержания). Учет такой зависимости приводит к нелинейным уравнениям переноса, которые могут быть решены лишь численными методами. Кроме того, физическая модель процесса переноса, применяемая при выводе дифференциальных уравнений, позволяет однозначно определить вид безразмерных переменных, которые должны использоваться при обобщении соответствующих экспериментальных данных.

Формулирование тех или иных граничных условий по существу сильно формализует внешнюю задачу о нахождении полей потенциалов переноса и скоростей в среде, окружающей влажный материал. Теория конвективного тепломассообмена в настоящее время не столь актуальна, как теория внутреннего переноса. Трудности здесь связаны с интегрированием системы уравнений конвективного переноса для трех пограничных слоев, в которых поля скоростей и потенциалов в общем случае не совпадают. В зависимости от гидродинамических условий обтекания пограничные слои могут быть частично турбулизованы, что в значительной степени усложняет и без того математически сложную задачу внешнего обмена [1,2].

Во взвешенном слое гидродинамическая обстановка около поверхности влажной частицы очень сложная. Обтекание отдельной частицы осложнено неопределенностью скоростей ее поступательного и вращательного движений в переменных полях скоростей и потенциалов переноса. Видимо, поэтому удовлетворительной теории процессов тепломассообмена, осуществляемых во взвешенном состоянии, пока нет.

Общность математических закономерностей переноса теплоты и массы позволяет в ряде случаев использовать полученные для теплообмена зависимости применительно к массообмену. Такой подход целесообразен еще и потому, что тепловые характеристики материалов значительно меньше изменяются в процессе сушки, чем массообменные, и для большинства материалов известны либо сравнительно просто определимы.

Вследствие интенсивного перемешивания твердых частиц их температура, концентрация влаги в них практически постоянна по всему объему псевдоожиженного слоя. Температура газа быстро изменяется в так называемой активной зоне вблизи распределительной решетки и практически неизменна в остальной части слоя. В процессе сушки во взвешенном слое высота слоя обычно значительно превышает высоту активной зоны, поэтому при удалении влаги с поверхности частиц задача всегда является балансовой [6,7]. Процесс определяется скоростью подвода теплоты к материалу. В пневмосушилках в этом случае лимитирующей стадией может быть перенос влаги и теплоты на границе частицы. В случае пористых материалов, особенно при глубокой их сушке, процесс может проходить в условиях внутренней или сложной задач переноса. В условиях внешней задачи переноса сопротивление переносу сосредоточено в пограничной пленке около твердой частицы. Процессы межфазного тепломассообмена в псевдоожиженном слое протекают в условиях внешней задачи только в случае достаточно крупных частиц или высоких скоростей теплоносителя, например, при сушке кристаллических материалов. Изменения температуры ожижающего агента и концентрации влаги в нем можно найти, решая совместно уравнения теплового и материального балансов [1]:

$$dQ = -wSdt = \alpha(t-\theta)dF \quad (1)$$

$$dW = wSdx = \beta(x_к - x_н)dF \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) приняты следующие условные обозначения: Q – расход теплоты; w – скорость газа; S – площадь поперечного сечения аппарата; t – температура газа; α – коэффициент теплоотдачи; θ – температура материала; F – площадь поверхности, через которую происходит обмен теплотой; W – расход влаги; x – влагосодержание газа; β – коэффициент массоотдачи.

Коэффициенты межфазного теплообмена α и массообмена β можно рассматривать, как функцию кондуктивной и конвективной составляющих:

Оценка α и β дается выражениями:

а) для теплообмена

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \frac{2}{d}\left(1 - \frac{d}{d_o}\right), \quad (3)$$

где d_o – диаметр шарообразной пленки, окружающей частицу диаметром d.

б) для массообмена

$$Nu' = \frac{\beta_д d}{D_д}, \quad (4)$$

где $D_д$ – коэффициент диффузии, $\beta_д$ – коэффициент массоотдачи.

Различие в свойствах исследуемых систем и условиях экспериментов, методах измерения и обработки результатов не позволяют пока описать данные разных авторов единым уравнением.

Результаты исследования и их анализ. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, изображенной на рисунке 1.

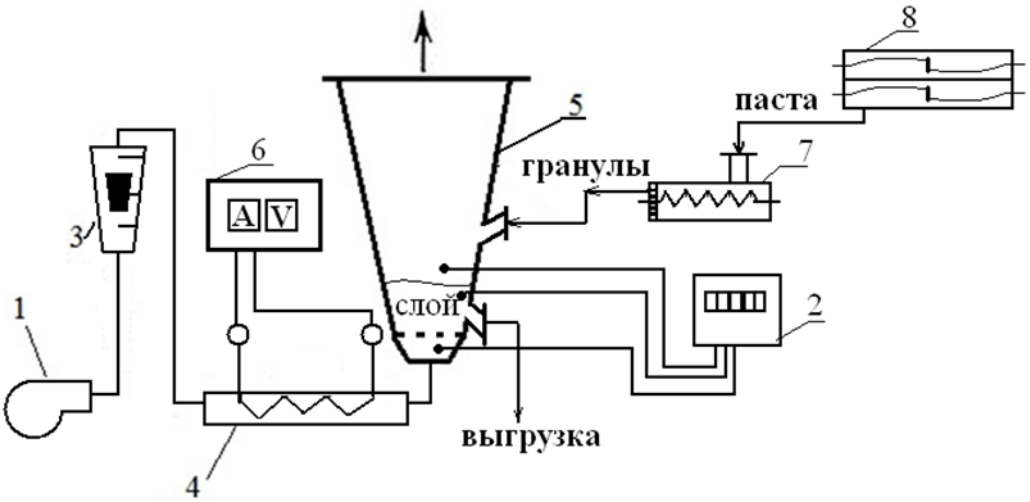


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для сушки гранулированного биотоплива: 1 – газодувка РГН – 427; 2 – прибор для измерения температуры УМКТ – 34 (8 точечный); 3 – ротаметр; 4 – электрокалорифер; 5 – сушилка; 6 – электрощит; 7 – шнековый гранулятор; 8 – «Z»-образный смеситель.

Основные результаты экспериментальных исследований тепломассообмена представлены в таблицах 1 и 2. Экспериментальные исследования предполагали определение изменения массы влажных гранул во времени в конвективной сушилке с плотным слоем при различных расходах воздушного теплоносителя в диапазоне от 40 до 50 $м^3$/ч. Исследования процесса сушки проводились в периодическом режиме за время опыта, не превышающем 38 минут. Время измерения массы слоя за счет убыли влаги из гранул, находящихся в кювете, не превышало 2 минут. Для осуще-

ствления последующего измерения кювета с гранулами вновь помещалась в сушилку. Общее количество взвешиваний составляла 19 измерений. По результатам изменения убыли влаги в образцах рассчитывалась абсолютная или относительная влажность материала по формулам [1]:

а) абсолютная влажность:

$$U_{абс} = \frac{G_{нач.} - G_{кон.}}{G_{а.б.с}} \quad (5)$$

б) относительная влажность:

$$U_{отн} = \frac{G_{нач.} - G_{кон.}}{G_{нач.}} \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) необходимы для построения кривых сушки.

Эквивалентный диаметр частицы:

$$d_{экв} = \sqrt[3]{\frac{V_ч \cdot 6}{\pi}}, \quad (7)$$

где $V_ч$ – объем частицы цилиндрической формы, м^3.

Объем частицы цилиндрической формы:

$$V_ч = 0{,}785 \cdot d_ч^2 \cdot h_ч \quad (8)$$

Фиктивная скорость воздуха:

$$w_ф = \frac{Q}{F_р \cdot 3600}, \quad (9)$$

где $F_р$ – площадь поперечного сечения аппарата на уровне решетки, м^2, Q – объемный расход воздуха, м^3/ч

Площадь решетки:

$$F_р = 0{,}785 \cdot Dp^2 . \quad (10)$$

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований сушки влажных гранул биотоплива на основе угля, торфа опилок и модификатора при разном расходе воздуха 40-50 м^3/ч и постоянной температуре воздуха под решеткой 80°С.

Исходя из многочисленных исследований функции влагосодержания различных материалов от их температуры, исследователями установлено наиболее приемлемая ее математическая формулировка в виде:

$$U=a \cdot e^{b \cdot tм} \quad (11)$$

Для расчета экспериментальных коэффициентов ‘a’ и ‘b’ в показательной функции вида $U=a \cdot e^{b \cdot tм}$ нами использовался метод наименьших квадратов (МНК). Математическая обработка экспериментальных исследований позволила с использованием МНК получить экспериментальную зависимость влагосодежражния гранулированного биотоплива от его температуры в виде уравнения:

$$U = 0{,}165e^{-0{,}063tм} \quad (12)$$

Уравнение (12) получено для гидродинамических режимов движения газового теплоносителя через фильтрующий слой гранулированного топлива в диапазоне значений критерий Рейнольдса $Re_г$=3500-5000.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по сушке биотоплива на основе У:Т:О:М=7:5:3:0,4 и размере частиц hxd=10x10мм для расчета функции влагосодержания материала от его температуры $U(t_м)$

№	Номер эксперимента									
	№1				№2			№3		
	Расход воздуха под решеткой, м³/ч									
	40				45			50		
	Время	Масса слоя, гр	Влажность гранул		Масса слоя, гр	Влажность гранул		Масса слоя, гр	Влажность гранул	
	мин		Абс. (масс.%)	Отн. (масс. %)		Абс. (масс. %)	Отн. (масс. %)		Абс. (масс. %)	Отн. (масс. %)
1	0	29	79,29	42,21	29	79,29	42,04	29	80,18	42,75
2	2	26,18	61,35	36,01	26,87	66,31	37,66	27,39	69,94	39,39
3	4	24,18	48,62	30,72	25,8	59,56	35,07	25,6	58,55	35,15
4	6	23,69	45,50	29,21	24,76	52,94	32,35	24,2	49,61	31,40
5	8	22,17	35,83	25,77	23,81	46,90	29,65	23,12	42,11	28,20
6	10	21,69	32,77	22,77	22,99	41,68	27,14	22,2	36,91	25,22
7	12	21,21	29,72	21,02	22,19	36,51	24,51	21,43	32,01	22,54
8	14	20,25	23,61	17,28	21,5	32,20	22,0	20,75	27,68	20.14
9	16	19,8	20,74	15,40	20,92	28,51	19,91	20,17	23,99	17,69
10	18	19,5	18,83	14,10	20,36	24,92	17,73	19,66	20,74	15,56
11	20	19,14	16,54	12,48	19,86	21,76	15,65	19,23	18,01	13,67
12	22	18,79	14,31	10,85	19,37	18,64	13,51	18,82	15,40	11,79
13	24	18,55	12,79	9,70	18,97	16,10	11,71	18,42	12,85	9,88
14	26	18,32	11,32	8,56	18,59	13,68	9,89	18,09	10,75	8,23
15	28	18,11	9,99	7,50	18,23	11,39	8,11	17,77	8,71	6,58
16	30	17,95	8,97	6,68	17,75	8,33	5,63	17,5	7,01	5,14
17	32	17,81	8,08	5,95	17,42	6,23	3,84	17,2	5,09	3,48
18	34	17,7	7,38	5,36	17,01	3,62	1,52	16,9	3,18	1,77
19	38	16,75	1,33	1,25	16,75	1,97	1,31	16,6	1,27	1,20

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования по нагреванию гранулированного биотоплива, осложненного массообменом

№	Номер эксперимента															
	№1						№2					№3				
	Расход воздуха под решеткой, м³/ч															
	40						45					50				
	Время	Масса слоя,	Температура воздуха				Масса слоя,	Температура воздуха				Масса слоя,	Температура воздуха			
	мин	гр	в слое	в грануле	над слоем	под реш.	гр	в слое	в грануле	над слоем	под реш.	гр	в слое	в грануле	над слоем	под реш.
1	0	29	51,5	27,3	54,1	80	29	51,5	27,3	54,1	80	29	51,5	27,3	54,1	80
2	2	26,18	68,9	37,5	69,9	80	26,02	73	38,4	71,2	80	25,75	73,8	38,7	72,6	80
3	4	24,18	72,1	42,4	70,6	80	24,10	75,0	43,4	71,5	80	24,06	75,3	43,5	72,4	80
4	6	23,69	72,7	46,2	71,1	80	24,76	76,8	47,7	74,2	80	24,2	76,3	47,9	76	80
5	8	22,17	73,7	48,5	72	80	23,81	77,3	49,1	76,2	80	23,12	77,4	49,5	76,9	80
6	10	21,69	74,4	50,3	72	80	22,99	78,1	50,9	77,1	80	22,2	78,2	51,7	77,4	80
7	12	21,21	75	51,6	72,4	80	22,19	77,4	52,1	78,7	80	21,43	78,4	52,9	78,7	80
8	14	20,25	75,3	52,5	72,6	80	21,5	78,4	55,3	78,9	80	20,75	78,7	53,8	78,9	80
9	16	19,8	76	53,5	73,2	80	20,92	78,8	56,1	79,3	80	20,17	79,1	55,5	79	80
10	18	19,5	76,4	54,3	73,4	80	20,36	79,2	56,9	79,8	80	19,66	79,6	57,2	79,8	80
11	20	19,14	76,8	55	74	80	19,86	79,6	57,9	79,8	80	19,23	79,8	59,1	79,8	80
12	22	18,79	77,1	55,7	73,9	80	19,37	79,7	58,2	79,9	80	18,82	79,8	59,7	79,8	80
13	24	18,55	77,5	56,4	74	80	18,97	79,8	58,5	79,9	80	18,42	79,9	59,9	79,9	80
14	26	18,32	77,8	56,9	74,4	80	18,59	79,8	58,8	79,9	80	18,09	79,9	60,2	79,9	80
15	28	18,11	77,8	57,5	74,4	80	18,23	79,9	59,2	79,9	80	17,77	79,9	60,5	79,9	80
16	30	17,95	77,8	57,9	74,4	80	17,75	79,9	59,5	79,9	80	17,5	79,9	60,7	79,9	80
17	32	17,81	77,9	58,7	74,6	80	17,42	79,9	59,8	79,9	80	17,2	79,9	61,1	79,9	80
18	34	17,7	77,9	58,7	74,6	80	17,01	79,9	59,8	79,9	80	16,9	79,9	61,5	79,9	80
19	36	16,75	77,9	58,7	74,6	80	16,75	79,9	59,8	79,9	80	16,6	79,9	61,9	79,9	80
20	38	16,54	77,9	58,7	74,6	80	16,44	79,9	59,8	79,9	80	16,4	79,9	62,2	79,9	80

Результаты экспериментальных исследований можно проиллюстрировать на рис. 2 – 5, характеризующих зависимости влагосодержания от температуры материала $U = f(t_м)$ при различных значениях критерия $Re_г = 3500 – 5000$ и постоянной температуре воздуха под решеткой 80 °С.

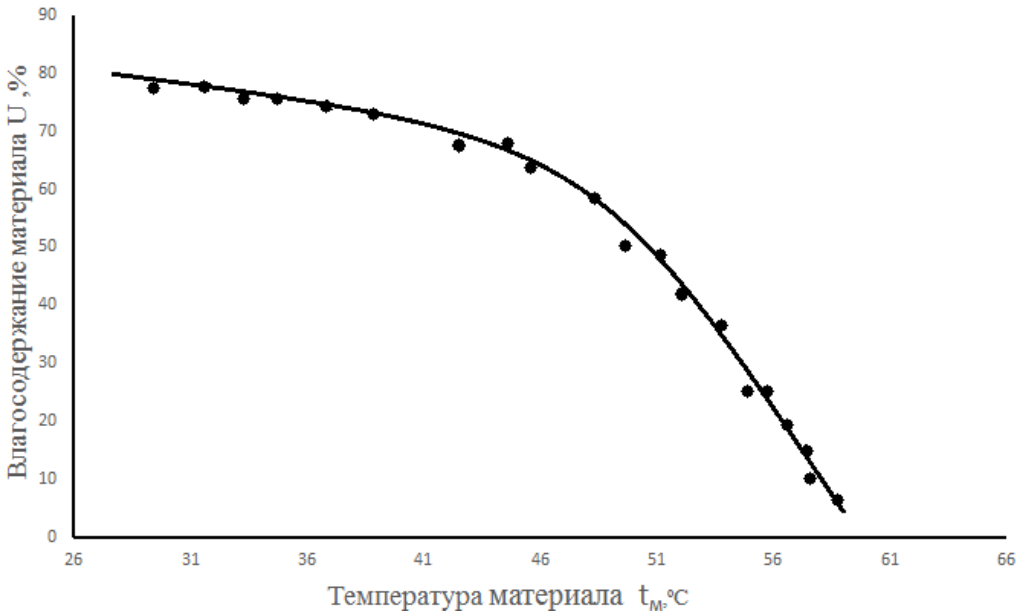


Рисунок 2 – Зависимость влагосодержания материала от его температуры $t_м$: $Re_г$ = 3862; расход газа V=40 м^3/ч; температура воздуха под решеткой 80 °С; У:Т:О:М=7:5:3:0,4; размер частиц hxd=10x10мм

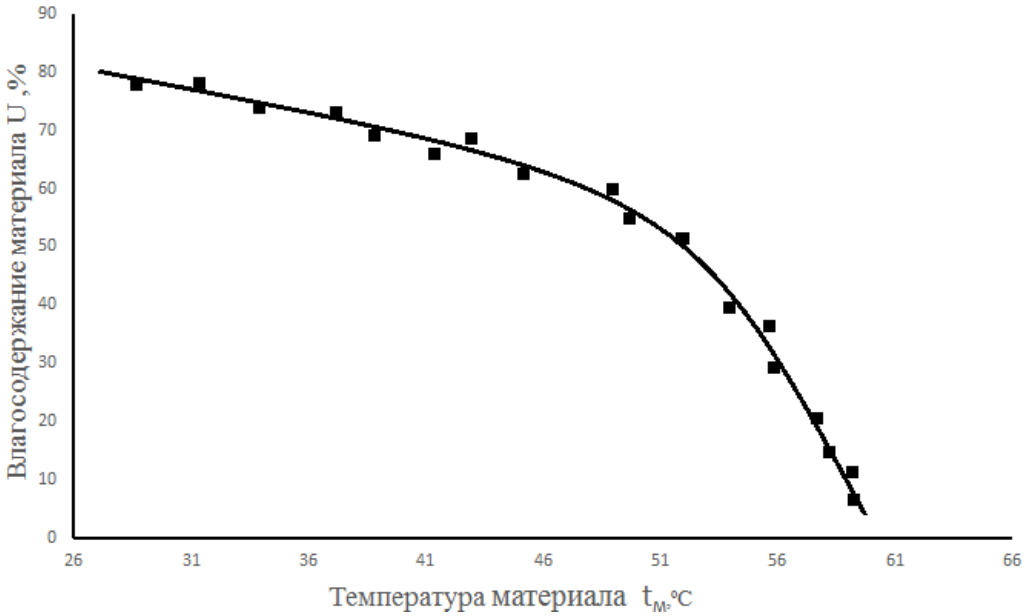


Рисунок 3 – Зависимость влагосодержания материала от его температуры $t_м$: $Re_г$ = 4389; расход газа V=45 м^3/ч; температура воздуха под решеткой 80 °С; У:Т:О:М=7:5:3:0,4; размер частиц hxd=10x10мм

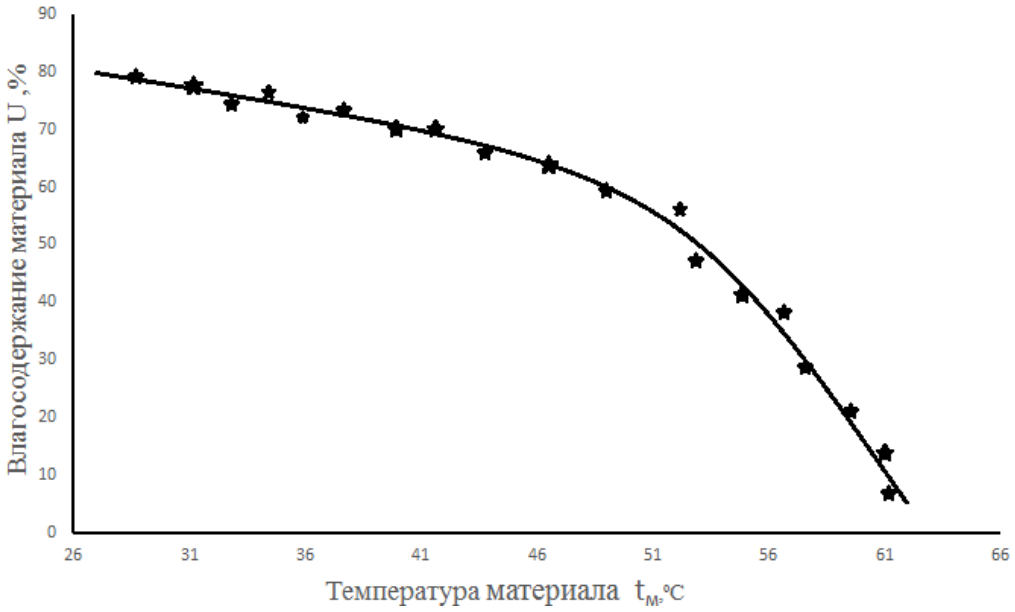


Рисунок 4 – Зависимость влагосодержания материала от его температуры $t_м$: $Re_г$ = 4916; расход газа V=50 м^3/ч; температура воздуха под решеткой 80 °С; У:Т:О:М=7:5:3:0,4; размер частиц hxd=10x10мм

Из графиков видно, что при увеличении расхода нагретого воздуха, подаваемого в аппарат, изменение влагосодержания гранул от их температуры в плотном слое практически не изменяется, что наглядно отображено на рисунке 5.

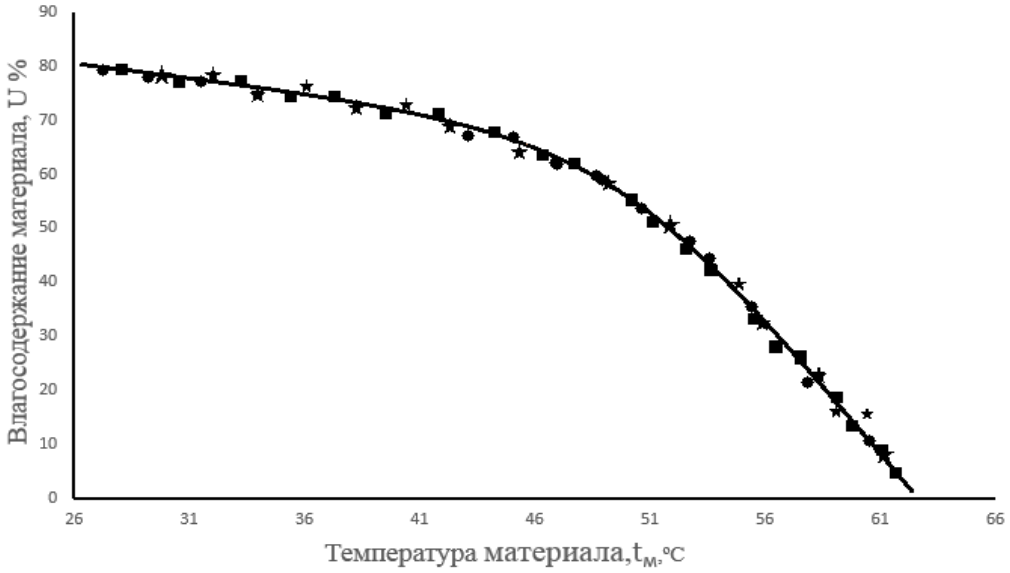


Рисунок 5 – Обобщающая зависимость влагосодержания материала от его температуры $U(t_м)$ при различных значениях критерия Рейнольдса $Re_г$=3500-5000, соответствующих следующим видам экспериментальных точек:

● - $Re_г$=3862;
■ - $Re_г$=4389;
★ - $Re_г$=4916.

На следующем этапе проводились экспериментальные исследования изучения изменения температуры частиц и окружающей ее среды (воздуха) в нестационарном процессе теплообмена при различных значениях критерия Рейнольдса ($Re_г$). Эксперименты осуществлялись на установке при

следующих исходных данных: расход воздуха 40-50 м^3/ч; размер гранул hxd, 10x10, мм; температура воздуха под решеткой 80°С; вес слоя сухих гранул 16,4 г.

Результаты экспериментальных исследований по изменению температуры гранулы и окружающей среды воздуха от времени в нестационарных условиях теплообмена представлены на рис. 6-8.

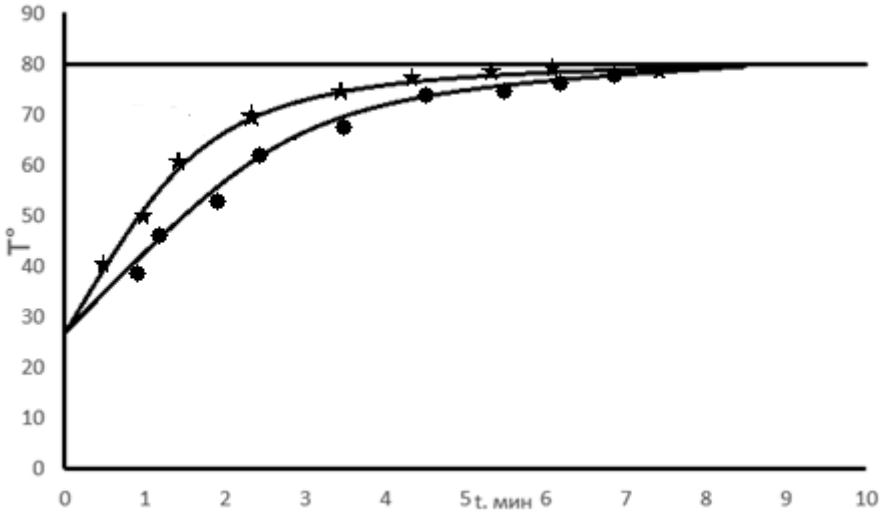


Рисунок 6 – Зависимость температуры гранулы в слое и окружающей её среды от времени процесса нагрева: расход воздуха под решеткой 40 м^3/ч; температура воздуха под решеткой 80°С; ★- температура окружающей среды; ● - температура гранулы

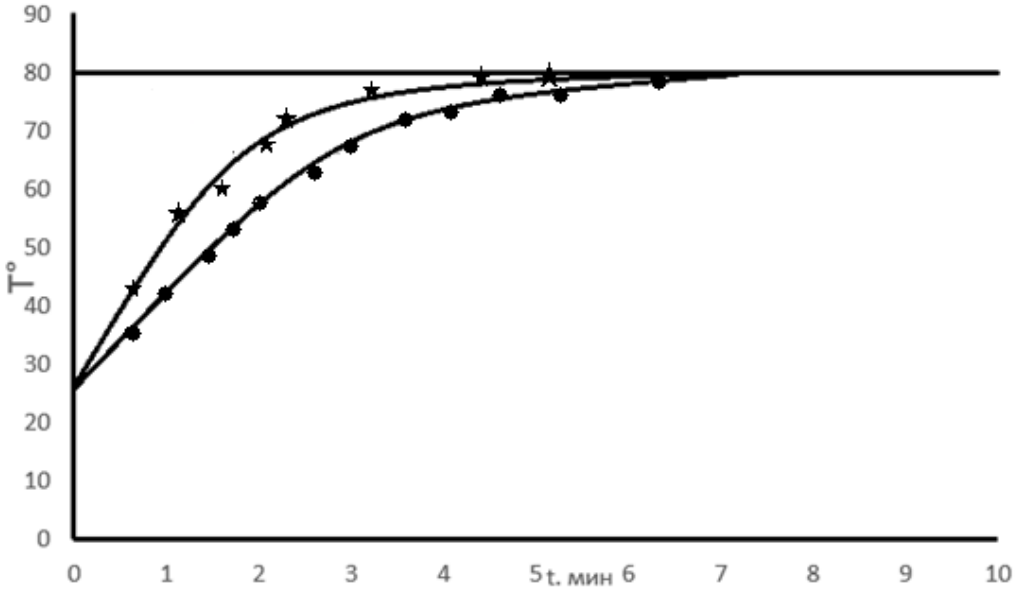


Рисунок 7 – Зависимость температуры гранулы в слое и окружающей её среды от времени процесса нагрева: расход воздуха под решеткой 45 м^3/ч; температура воздуха под решеткой 80°С; ★- температура окружающей среды; ● - температура гранулы

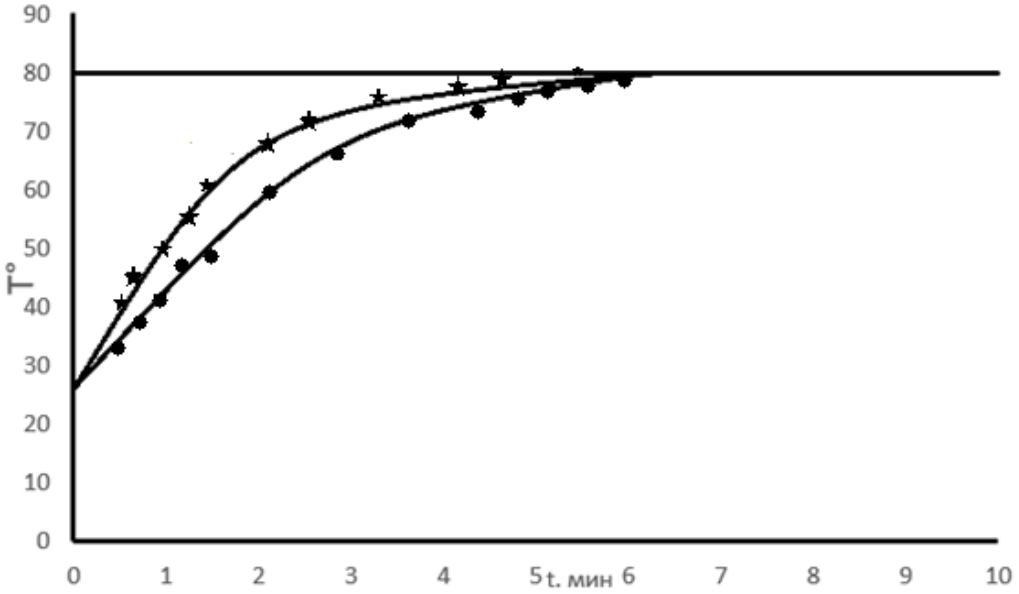


Рисунок 8 – Зависимость температуры гранулы в слое и окружающей её среды от времени процесса нагрева: расход воздуха под решеткой 50 м^3/ч; температура воздуха под решеткой 80°С;★ - температура окружающей среды;● - температура гранулы

Из анализа графических зависимостей (рис. 6-8) можно сделать вывод о том, что с увеличением расхода воздуха, т.е. соответственно, его скорости в аппарате, конвективная составляющая теплообмена от газа к частицам плотного слоя возрастает, что приводит к более быстрому выходу газовой фазы окружающей среды и температуры частиц на стационарный режим теплообмена.

Выводы и предложения.

1. Предложена лабораторная установка для гранулирования и сушки биотоплива на основе измельченного торфа, угля, опилок, модификатора.
2. Осуществлены расчётно-экспериментальные исследования тепломассообмена в плотном слое гранулированного биотоплива. Получена критериальная зависимость влагосодержания материала от его температуры U = f(tм) при различных значениях критерия Рейнольдса.
3. Получена критериальная зависимость теплообмена в системе газ - твердое при нагревании гранул композитного топлива в фильтрующем слое.
3. Результаты расчетно-экспериментального исследования могут рассматриваться в качестве конкретных указаний по организации процесса формования гранул предложенного состава, а также как алгоритм действий при вовлечении в оборот новых видов топлива и создании топливных гранул на их основе.

Список используемой литературы

1. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Высшая школа, 1978.
2. Марьяндышев А. и др. Исследование процесса термического разложения и горения торфяного топлива // Химия твердого топлива. 2019. № 5. С. 33–38.
3. Табакаев Р. Б. Твердое композитное топливо из низкосортного сырья // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325, № 4. С. 56–64.
4. Томсон А. Э. Торф и продукты его переработки. Минск: Беларус. навука, 2009.
5. Овчинников Л.Н. и др. Экспериментальное и расчетное исследование формирования композитного гранулированного топлива // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 91–100.

6. Laitinen S. Exposure to Biological and Chemical Agents at Biomass Power Plants // Biomass Bioenergy. 2016. Vol. 93. P. 78–86.
7. Christoforou E. Advances in Solid Biofuels // Springer Nature Switzerland AG, 2019.

References

1. Akhnazarova S.L. Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii. M.: Vysshaya shkola, 1978.
2. Maryandyshev A. i dr. Issledovanie protsessa termicheskogo razlozheniya i goreniya torfyanogo topliva // Khimiya tverdogo topliva. 2019. № 5. S. 33–38.
3. Tabakaev R. B. Tverdoe kompozitnoe toplivo iz nizkosortnogo syrya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii v energetike. 2014. T. 325, № 4. C. 56–64.
4. Tomson A. E. Torf i produkty ego pererabotki. Minsk: Belarus. navuka, 2009.
5. Ovchinnikov L.N. i dr. Eksperimentalnoe i raschetnoe issledovanie formirovaniya kompozitnogo granulirovannogo topliva // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. obedineniy SNG. 2023. T. 66, № 1. S. 91–100.
6. Laitinen S. Exposure to Biological and Chemical Agents at Biomass Power Plants // Biomass Bioenergy. 2016. Vol. 93. P. 78–86.
7. Christoforou E. Advances in Solid Biofuels // Springer Nature Switzerland AG, 2019.

DOI: 10.35523/2307-5872-2023-43-2-112-117
УДК: 631.3.312.021

ОЦЕНКА РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ИЗНОШЕННЫХ НОЖЕЙ СОСТАВНЫХ ЛЕМЕХОВ (НА ПРИМЕРЕ ПЛУГОВ КОМПАНИИ “ЛЕМКЕН”)

Михальченков А.М., ФГБОУ ВО Брянский ГАУ;
Феськов С.А., ФГБОУ ВО Брянский ГАУ;
Лещев М.О., ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

Использование импортных плугов на полях Российской Федерации позволило улучшить качество вспашки и ее производительность. Сравнительно высокий их ресурс в последнее время уже не компенсирует затраты на покупку из-за высокой рыночной цены. Поэтому встает вопрос о восстановлении данного изделия. Имеющаяся же информация об износах, их численном значении и геометрии, позволяющая обоснованно подойти к разработке технологии реставрации ножей, недостаточна. Более того, не существует оценок ремонтопригодности и предельного состояния этих конструктивных элементов. Поэтому в работе была поставлена задача, определить критерии ремонтопригодности и предельного состояния изношенных ножей составных лемехов на примере пахотных агрегатов компании “Лемкен”. В качестве технологии восстановления рассматривался метод приварки термоупрочненного компенсирующего элемента вместо изношенной части. Анализ технического состояния деталей проводился по остаточной ширине детали, измеряемой в сечениях, проходящих через крепежные отверстия hi; остаточному расстоянию от первого крепежного отверстия до носка детали - li; ti- остаточной толщины лемеха. Установлено, что максимальное значение ti равно 9 мм, а минимальное − 5 мм, и это позволяет сделать заключение о возможности дальнейшего использования ножа по данному геометрическому параметру. Остаточное li находится в пределах 175-202 мм и является достаточной для обеспечения четкой стыковки ножа с долотом. Контроль hi обусловлен таким параметром, как ремонтопригодность, который регламентируется жесткостью неизношенной области. Показано, что изгиб восстановленных ножей проявляется при остаточной h1 менее 88 мм, т.е. восстановленные детали не отвечают условиям жесткости. При восстановлении ножей рекомендуется использовать три размерные группы. Исследования показали, что предельное состояние ножей плугов компании “Лемкен” регламентируется остаточной шириной менее 88 мм по критерию жесткости; 72 % деталей ремонтопригодны, т.к. не имеют деформации после восстановления.

Ключевые слова: *составной лемех, нож, долото, ремонтопригодность, предельное состояние, деформация, напряжение, жесткость.*

Для цитирования: *Михальченков А.М., Феськов С.А., Лещев М.О. Оценка ремонтопригодности изношенных ножей составных лемехов (на примере плугов компании “Лемкен”) // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 2 (43). С. 112-117.*

Введение. Пахотные орудия компании “Лемкен” [1, 2] нашли широкое применение на полях РФ в силу большой совокупности положительных факторов: агротехнических, эксплуатационных и конструкционных. Кроме того, детали их рабочих органов имеют сравнительно высокий ресурс. Прежде всего, это относится к лемехам [3, 4], которые состоят из двух частей, ножа и сменного долота.

Нож крепится на стойке плуга при помощи 3-х болтовых соединений. Он упрочнен наплавкой твердым сплавом с тыльной стороны. Вдоль полевого обреза имеется г-образный паз, пробранный на всю его длину, и предназначенный для стыковки с долотом. Рабочий чертеж ножа лемеха представлен на рисунке 1а.

Долото не является оборотным, в отличие от большинства конструкций таких деталей других зарубежных компаний [4, 5], и его крепление осуществляется непосредственно к стойке плуга.

Из многолетних наблюдений установлено, что такое конструктивное решение, а также технологическое исполнение позволяет лемеху достичь ресурса до 35-40 га при пахоте суглинистых и глинистых почв [6,7].

Сложный технологический процесс изготовления, высокая цена на рынке запчастей сельхозмашин (до 8 тыс. руб. за единицу), определенный дефицит фирменных деталей [8, 9] остро ставят вопрос о необходимости восстановления ножей.

В свою очередь информация, имеющаяся в открытом доступе об износах, их численном значении и геометрии, позволяющая обоснованно подойти к разработке технологии устранения дефектов формы, приобретенных в период эксплуатации, недостаточна [10, 11]. Например, отсутствуют сведения о возможности использования способа “термокомпенсирующих элементов (ТКЭ)” [12] для устранения износов в зависимости от жесткости оставшейся части детали (способ заключается в приваривании компенсирующей вставки вместо изношенной части детали). Кроме этого, необходимо определить критерии предельного состояния изделия на основании остаточных линейных размеров.

Цель исследований. Оценка ремонтопригодности изношенных ножей составных лемехов с учетом их жесткости, а также выявления критериев предельного состояния.

Методика исследования. Оценивались остаточные размеры деталей после снятия их с эксплуатации. Пахота осуществлялась на тяжелых глинистых и суглинистых почвах. В качестве энергетического агрегата использовался трактор Кировец К-703МА. Контроль технического состояния проводился по остаточной ширине детали (*h1, h2, h3*), измеряемой в сечениях, проходящих через крепежные отверстия (рисунок 1б); остаточному расстоянию от первого крепежного отверстия до носка детали-*li*; *ti*-остаточной толщины лемеха в точках, обозначенных на рисунке 1б.

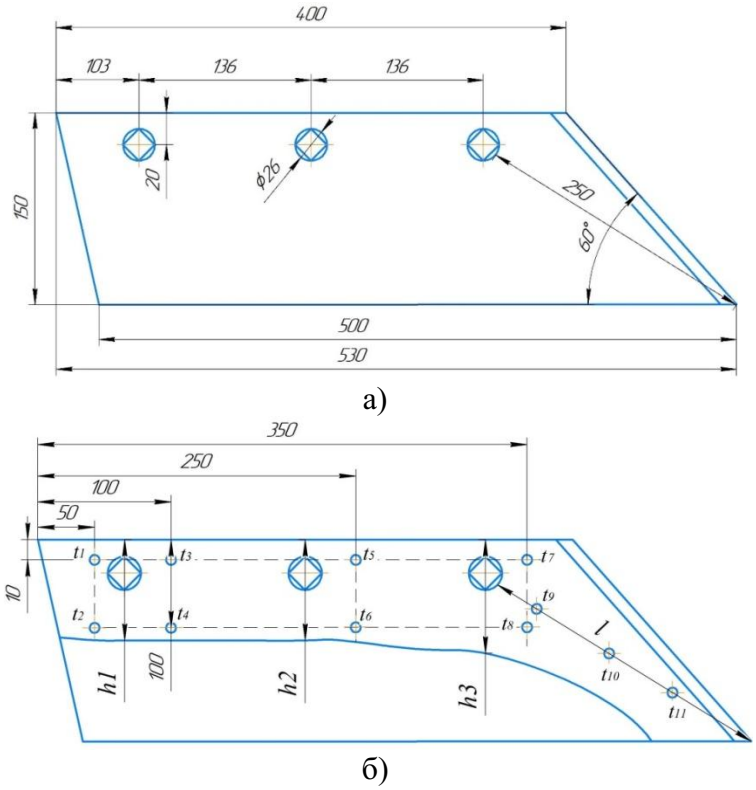


Рисунок 1 - Измерение остаточных размеров (а-рабочий чертеж ножа; б-схема измерения)

На рисунке 1б кривой линией показан типичный износ ножа.

Измерения проводились штангенциркулем с ценой деления 0,1 марки ШЦ 300-0,1.

При анализе размеров износов использовался персональный компьютер и программа MicrosoftExcel.

Результаты исследований и их анализ. Контроль изношенных ножей по толщине в 11-ти точках (в соответствии с методикой) показал, что максимальное значение *ti* равно 9 мм, а минимальное составляет 5 мм. Такие значения остаточных толщин позволяют сделать заключение о возможности использования ножа по данному геометрическому параметру [13].

Остаточное расстояние от первого крепежного отверстия до носка детали может служить критерием надежной стыковки долота с ножом путем совмещения г-образных пазов обеих изделий. Измерениями установлено, что *li* находится в пределах 175-202 мм при номинальном значении 250 мм. Следовательно, остаточная длина паза ножа будет достаточной для обеспечения четкого сопряжения с долотом. Таким образом, по параметру *li* ножи пригодны к восстановлению.

Необходимость контроля *hi* для деталей, поступивших на восстановление, обусловлена таким параметром, как ремонтопригодность, который в данном случае регламентируется жесткостью неизношенной области. Если коэффициент жесткости *(K)* относительно невелик, восстановление ножа методом ТКЭ не представляется возможным, вследствие нарушения его размерной стабильности из-за высокого уровня деформации. Причиной появления деформации являются остаточные напряжения, возникающие при приваривании термоупрочненого компенсирующего элемента. Проявление действия напряжений выражается в виде изгиба восстановленного ножа (рисунок 2). Безусловно, такая форма ножа не позволяет выполнить агротехнические требования при проведении вспашки.

Рисунок 2 - Нож после восстановления

Как уже отмечалось, жесткость восстановленной детали зависит от остаточных напряжений, которые во многом определяются техникой сварки, размерами ножа после эксплуатации и размерами ремонтной вставки (попытки снизить влияние напряжений за счет различной техники сварки к положительным результатам не привели, вследствие наличия закалочных структур в термоупрочненном элементе). Поэтому необходимо определить количество деталей, пригодных к восстановлению по критерию жесткости.

Теоретический расчет остаточных напряжений, являющихся следствием сварки, затруднен вследствие многочисленности факторов, имеющих место при реализации этого процесса. Поэтому авторы при определении остаточных размеров, обеспечивающих отсутствие изгибов реставрированных ножей, опирались на собственный многолетний опыт, а также опыт инженерных служб ряда сельскохозяйственных предприятий Брянской области.

Как следует из рисунка 1б, наименьшие остаточные размеры находятся в области пятки. Следовательно, на данном участке будет иметь место максимальный износ, определяющий толщину компенсирующей вставки.

Опытным путем установлено, что изгиб восстановленных ножей проявляется в том случае, когда *h1* не превышает 88 мм. В этом случае 28 % ножей, поступивших на восстановление, будут не ремонтопригодны по причине их низкой жесткости.

Предельное же состояние определяется шириной менее 88 мм.

Авторы сочли целесообразным распределить ремонтопригодные ножи по ремонтным группам с интервалом *h1* в 10 мм. (Исключением является размерная группа *h1* = 98 - 103). Таким образом, при восстановлении ножей используется три размерных группы: первая - диапазон размеров от 88 до 98 мм (количество – 40 %); вторая - диапазон размеров 98 - 103мм (количество 16 %); третья - диапазон размеров 98 - 103 мм (количество 16 %) (рисунок 3).

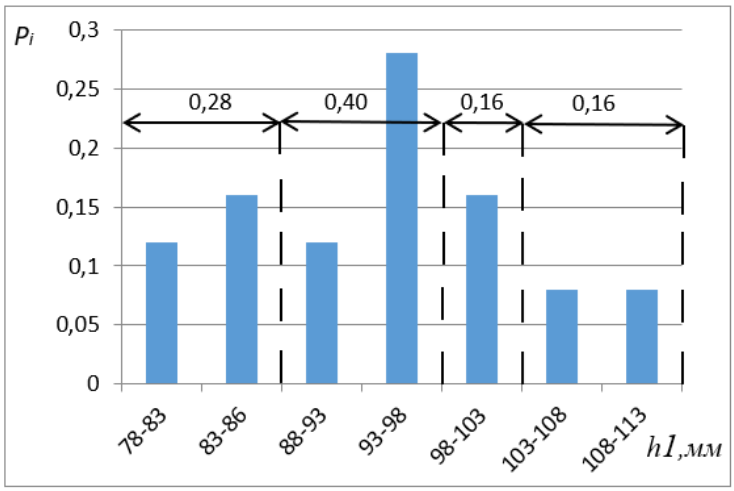


Рисунок 3 - Гистограмма распределения остаточных размеров по ширине ножа в сечение *h1*

Выводы.

1. Предельное состояние ножа плугов компании “Лемкен” регламентируется остаточной шириной менее 88 мм, при котором обеспечивается необходимая жесткость восстановленного ножа критерием жесткости.

2. Установлено, что 72 %, снятых с эксплуатации ножей ремонтопригодны, т.к. обеспечивают отсутствие заметных деформаций после их восстановления методом термоупрочненных компенсирующих элементов.

Список используемой литературы

1. Тырнов Ю.А., Ногтиков А.А., Миткин В.А., Мирнов С.В. Эффективность использования зарубежных агрегатов на основной обработке почвы и посеве // Техника и оборудование для села. 2010. № 3. С. 27-29.

2. Гуцан А.А., Тюрева А.А., Рыжик В.Н., Паседько Н.С. К вопросу о классификации лемехов плужных корпусов // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2020. № 1 (19). С. 50-57.

3. Михальченков А.М., Козарез И.В., Гуцан А.А., Гапонова В.Е. Геометрия остовов составных плужных лемехов компании "Кун" после их эксплуатации // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 148-153.

4. Лискин И.В., Миронов Д.А., Курбанов Р.К. Расположение лезвия накладного долота по отношению к направлению движения пахотного агрегата // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 6. С. 22-27.

5. Казанцев С.П., Михальченкова М.А., Поджарая К.С. Упрочняющие технологии восстановления и изготовления деталей почвообрабатывающих машин применением компенсирующих элементов и их преимущества // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 116. С. 102-107.

6. Лискин И.В., Миронов Д.А., Панов А.И., Горбачев И.В. Лемеха с накладным долотом для плугов общего назначения // Сельский механизатор. 2016. № 11. С. 14-15.

7. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Столин А.М., Бажин П.М., Савельев А.С. Повышение ресурса долот лемехов плугов электродуговой наплавкой свс-электродами // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 12. С. 19-23.

8. Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Титов Н.В., Тарасов В.А., Гайдар С.М., Прокошина Т.С., Пузряков А.Ф. Технология машиностроения // Лабораторный практикум / Санкт-Петербург, 2020.

9. Титов Н.В. Повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин путем нанесения металлокерамических покрытий // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 6. С. 27-31.

10. Соловьев С.А., Шахов В.А., Аристанов М.Г. Технология восстановления лемеха плуга фирмы Lemken // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 113. С. 245-248.

11. Козарез И.В., Михальченкова М.А., Лавров В.И., Синяя Н.В. Повышение абразивной износостойкости деталей варьированием техники наплавки двухслойных покрытий с твердой поверхностью // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 10. С. 38-40.

12. Новиков А.А. Штампосварной плужный лемех с увеличенными равнопрочностью и ремонтопригодностью // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 207-212.

13. Михальченков А.М., Бутарева Е.В., Михальченкова М.А. Изнашивание локально упрочненных деталей при свободном перемещении в абразивной среде (на примере плужного лемеха) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3 (111). С. 39-44.

References

1. TarnovYu.A., Nogtikov A.A., Mitkin B.A., MirnovS.V.The efficiency of using foreign aggregates for basic tillage and sowing // Machinery and equipment for the village. 2010. No. 3. pp. 27-29.

2. Gutsan A.A., Tyureva A.A., Ryzhik V.N., Pasedko N.S. On the classification of plowshares of plowshares // Design, use and reliability of agricultural machinery. 2020. № 1 (19). Pp. 50-57.

3. Mikhalchenkov A.M., Kozarez I.V., Gutsan A.A., Gaponova V.E. Geometry of the skeletons of composite plowshares of the company "Kun" after their operation // Technical service of machines. 2021. № 1 (142). Pp. 148 - 153.

4. Liskin I.V., Mironov D.A., Kurbanov R.K. The location of the blade of the overhead chisel in relation to the direction of movement of the arable unit // Agricultural machines and technologies. 2017. No. 6. pp. 22-27.

5. Kazantsev S.P., Mikhalchenkova M.A., Podzharaya K.S. Strengthening technologies for the restoration and manufacture of parts of tillage machines using compensating elements and their advantages // Works of GOSNITI. 2014. Vol. 116. p. 102 - 107.

6. Liskin I.V., Mironov D.A., Panov A.I., Gorbachev I.V. Ploughshare with overhead chisel for general purpose plows // Rural mechanic. 2016. No. 11. p. 14 - 15.

7. Titov N.V., Kolomeichenko A.V., Stolin A.M., Bazhin P.M., Savelyev A.S. Increasing the resource of bits of ploughshares by electric arc surfacing with SHS-electrodes // Repair. Recovery.Modernization. 2016. No. 12. pp. 19-23.

8. Kolomeichenko A.V., Kravchenko I.N., Titov N.V., Tarasov V.A., Gaidar S.M., Prokoshina T.S., Puzryakov A.F. Technology of mechanical engineering // Laboratory practicum / St. Petersburg, 2020. 268c.

9. Titov N.V. Increasing the durability of the working bodies of tillage machines by applying metal-ceramic coatings // Tractors and agricultural machines. 2018. No. 6. pp. 27-31.

10. Soloviev S.A., Shakhov V.A., Aristanov M.G. Technology of restoration of Lemken plowshare // Proceedings of GOSNITI. 2013. Vol. 113. pp. 245-248.

11. Kozarez I.V., Mikhalchenkova M.A., Lavrov V.I., Sinaya N.V. Increasing the abrasive wear resistance of parts by varying the technique of surfacing two-layer coatings with a hard surface // Tractors and agricultural machines. 2016. No. 10. p. 38 - 40.

12. Novikov A.A. Stamp-welded plowshare with increased equal strength and maintainability // Proceedings of GOSNITI. 2016. Vol. 122. pp. 207-212.

13. Mikhalchenkov A.M., Butareva E.V., Mikhalchenkova M.A. Wear of locally hardened parts during free movement in an abrasive medium (on the example of a ploughshare) // Hardening technologies and coatings. 2014. № 3 (111). Pp. 39-44.

DOI: 10.35523/2307-5872-2023-43-2-118-125
УДК 631.559.2

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ И УБОРКИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

Сибирёв А.В., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»;
Мосяков М.А., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева;
Чистякова О.С., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

С учетом важности обеспечения населения качественной и доступной сельскохозяйственной продукцией в статье приводятся статистические данные посевных площадей, валового сбора и урожайности сахарной свёклы, возделываемой в хозяйства всех категорий. По данным за 2020 год Российская Федерация по количеству собранного урожая является вторым мировым производителем, но со средней урожайностью – 33,4 т/га, значительно уступающей ряду стран с высокой культурой земледелия. Источника сырья для получения сахара на продовольственном рынке России не в полной мере достаточно, поэтому встречается продукт, изготовленный из импортного сырца, в 2020 году это количество составило 6,8 тыс. тонн. Существует и импорт сахара белого, в 2021 году его значение составило 126 тыс. тонн. Потенциал продуктивности культуры недостаточно использован в существующих технологиях возделывания сахарной свеклы. Широкое применение энерго- и ресурсосбережения при возделывании и уборке сахарной свеклы в настоящее время сдерживается невозможностью современного комплекса машин обеспечивать технологические операции производства свеклы в соответствии с агротехническими требованиями. В статье выполнена систематизация основных проблем современных технологий возделывания и уборки сахарной свёклы, исходя из аналитико-синтетической переработки информации. Предложен и описан ряд технических решений, позволяющий при возделывании сахарной свеклы полностью использовать биологический потенциал посевного материала семян лучших гибридов. Интенсифицировать качество сепарирующего процесса уборочных машин, тем самым обеспечив агротехнические требования. Снизить потерю перевозимой продукции, ресурсо- и энергозатраты при её дальнейшей переработке.

Ключевые слова: *сахарная свекла, технология возделывания, систематизация основных проблем, уборка.*

Для цитирования: *Сибирёв А.В., Мосяков М.А., Чистякова О.С. Систематизация основных проблем технологий возделывания и уборки сахарной свеклы // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 2 (43). С. 118-125.*

Введение. Сахарная свёкла является одной из важнейших технических культур во многих регионах мира. Свыше 12 % мирового производства сахара получают из её корнеплодов [1].

По данным лидером мирового производства технической культуры в 2020 году стала Франция, материалы представлены в таблице [2].

Таблица – Мировые производители сахарной свёклы в 2020 году

№	Страна производитель сахарной свёклы	Собранный урожай, милл. тонн.
1	Франция	38
2	Российская Федерация	33,9
3	Германия	30
4	Соединенные Штаты Америки	28,5
5	Турция	16,8
6	Украина	16

7	Польша	13,5
8	Египет	11
9	Великобритания	9,4
10	Китайская Народная Республика	8

Цель исследований – снижение ресурсо- и энергозатрат при возделывании и уборке сахарной свеклы.

Материалы и методы. Средняя урожайность корнеплодов в мире составляет – 34,3 т/га, в странах с высокой культурой земледелия (Франция, США, Германия, Италия и другие) собирают – 50-60 т/га [3]. В Российской Федерации данная культура является единственным источником сырья для получения сахара в промышленных масштабах. В среднем на душу населения в 2021 году в России потребление сахара составило 31 кг, что в абсолютном значении достигло 5,6 млн. тонн сахара [4]. Динамика свеклосахарного производства в России представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Производство сахара в Российской Федерации по годам

На продовольственном рынке остается доля сахара, который изготовлен из импортного сырца, это порядком (без учета торговли со странами ЕАЭС) 8,3 тыс. тонн (в 2020 году - 6,8 тыс. тонн). Объем импорта в Россию сахара белого (по данным ФТС России, с учетом торговли со странами ЕАЭС) в 2021 году составил 126 тыс. тонн [5].

Мировые цены на сахар-сырец последнее время показывают уверенный рост, что позволяет производителям расширять воспроизводство сахарной свёклы [6]. Это видно из графика на рисунке 2, где представлена динамика оптовых цен на сахар.

.

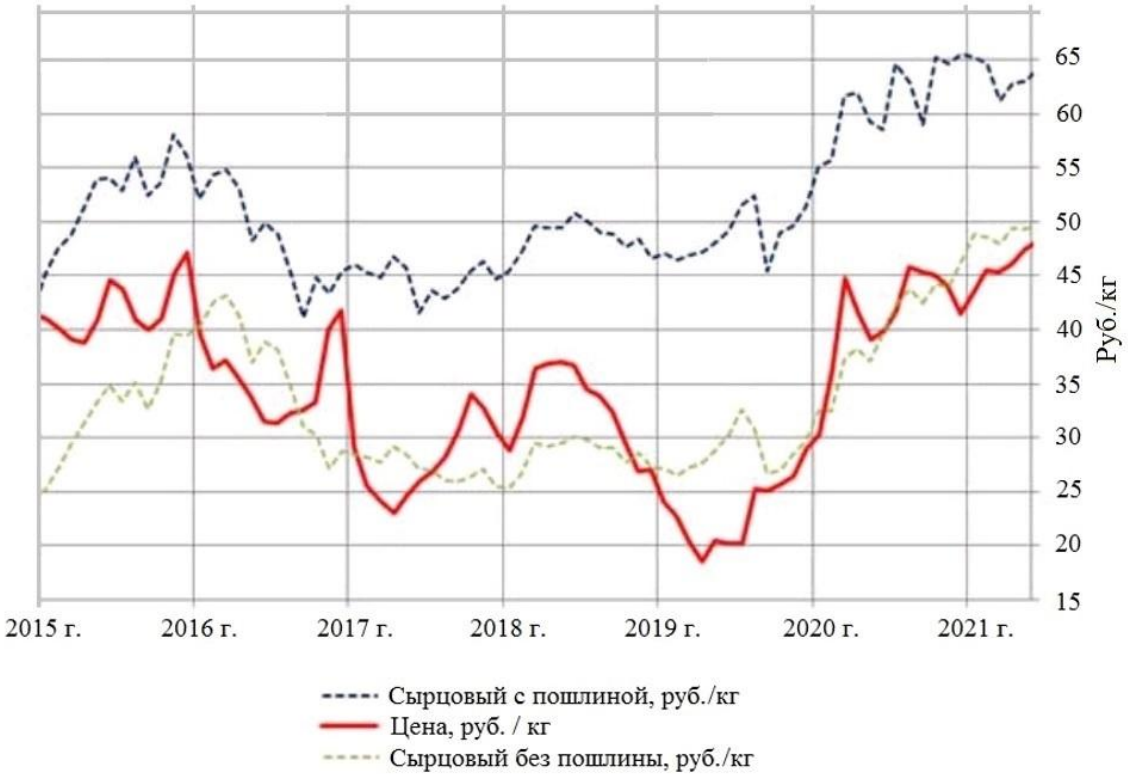


Рисунок 2 – Динамика изменения оптовой стоимости сахара на российских и мировых рынках, цены в руб./кг с НДС

Сахарная свёкла имеет большое народнохозяйственное значение, это одна из немногих технических культур, которая полностью идет на переработку. В процессе свеклосахарного производства из перерабатываемых корнеплодов образуются большие объемы побочных продуктов и отходов, которые являются ценным сырьем для многих отраслей легкой промышленности [7].

В химический состав корнеплодов входят сухие (зольные и органические) вещества (20-25 %) и вода (75-80 %). Основную часть органических веществ корня составляет сахар. В корнеплоде его содержится в среднем 18-19 %, а в отдельных корнях – до 23-24 %. Кроме сахара, в состав сухих веществ входит клетчатка (4-5 %), белки (1-2 %) и следы жира. Общее количество зольных веществ в корне обычно не превышает 0,8 %. Велика и кормовая ценность сахарной свёклы. Высокие кормовые качества свекловичной ботвы, жома, мелассы. Химический состав зеленых свекловичных листьев: вода 78-85 %, сухие вещества 15-22 %, в том числе зольные элементы около 2 %, клетчатка около 2 %, другие углеводы 9-15 %, азотистые вещества около 2 % [8]. Сахарная свёкла очень экономически выгодная культура для сельхозтоваропроизводителей, обладающая высоким потенциалом продуктивности. По рентабельности производства в последние годы культура существенно превосходит остальные, это отражается в представленной на рисунке 3 графической зависимости количества посевных площадей в хозяйствах всех категорий по годам, урожайности и валовому сбору.

Рисунок 3 – Количество посевных площадей, валовый сбор и урожайность сахарной свёклы в РФ по годам [9].

Урожайность культуры во многом зависит от почвенно-климатических и технологических условий. Агроклиматические условия районов свеклосеяния в Российской Федерации весьма разнообразны, культуру возделывают в основном в четырех зонах: достаточного увлажнения – ЦФО; недостаточного увлажнения – ПВО и засушливой – ЮФО, СФО.

Результаты и обсуждение. Сахарная свёкла имеет важное экономическое значение, культура обладает высоким потенциалом продуктивности, который в настоящее время используется недостаточно. В государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию по результатам на 2021 год, было зарегистрировано около 370 различных сортов сахарной свёклы [10]. Урожайность и сбор сахара зависит от почвенно-климатических условий. Но разные природные условия – не главная причина низкого уровня производства сахарной свёклы в Российской Федерации. В основном это во многом связано с неиспользованием в полной мере достижений научно-технического прогресса [11].

Широкое применение энерго- и ресурсосбережения при возделываниии уборки сахарной свеклы в настоящее время сдерживается невозможностью современного комплекса машин обеспечивать технологические операции производства свеклы в соответствии с предъявляемыми агротехническими требованиями. При возделывании сахарной свеклы используют семена лучших гибридов как отечественного, так и иностранного производства, заявленная всхожесть семян доходит до 99 %. К посеву приступают, когда почва на глубине 5-10 см прогреется до 6-8°С, достигнет физической спелости, минует опасность попадания всходов под весенние заморозки. Срок посева семян зависит от погодных условий и состояния почвы. В зависимости от сорта свекла требует 170-220 дней для роста и развития до процесса уборки.

Одной из нерешенных проблем является несовершенство конструкций современных машин для посева семян сахарной свеклы. Для посева в зависимости от выбранной схемы используют сеялки

(механические, пневматические) с различными исполнениями бороздораскрывающих рабочих органов: килевидные, анкерные, полозовидные и двойные дисковые сошники. Семена высевают на глубину 2…4 см с равномерным распределением семян по ширине и глубине борозды, с отклонением не более ±0,5 см. Отечественные и зарубежные сеялки для высева семян сахарной свёклы в основном оснащены копирующими и прикатывающими опорными катками до и после высева семян. Прикатывающая секция сеялки должна способствовать образованию над семенами рыхлого слоя почвы, как указывают В.Т. Фогель и Н.А. Ламан [12] плотность почвы над семенами должна составлять такую, какую почва имеет без уплотнения, при оптимальном уплотнении ложа на глубине посева семян составляющее 1,3-1,4 г/см³ при влажности почвы от 14 до 26 %. Так как приборы контроля уровня прикатывания на выпускаемых сеялках отсутствуют, это не позволяет в полной мере обеспечить рекомендованное уплотнение семенного ложе. После посева остро стоит проблема, связанная с выдуванием ранее заделанных семян с частью пахотного слоя. В дальнейшем в местах отсутствия всходов производится пересев культуры, а это дополнительные ресурсо- и энергозатраты. Для минимизации негативных последствий необходимо дифференцированно уплотнять, одновременно восстанавливая капиллярность ранее разрыхленной почвы, тем самым влагу из нижних слоев поднимать на вверх, повышая влажность в зоне укладки семян с оптимальной плотностью посевного слоя почвы [13, с.1-10; 14, с.1].

Следующей, не менее важной проблемой, является несовершенство конструкций современных свеклоуборочных комбайнов, в особенности отечественного производства. В процессе уборки не в полной мере обеспечивают выполнение агротехнических требований при сложных погодных условиях: потери корнеплодов сахарной свеклы не должны превышать 6 %; допустимая общая загрязненность корнеплодов – не более 10 %, в том числе растительной массой – не более 2 %; количество корнеплодов с поврежденными глубокими слоями ткани не должно превышать 8 %, а с отрывом хвостовой части диаметром более 1 см – 3 %; потери ботвы не должны превышать 18 %, а загрязненность её почвой – 0,5 % (при сборе и использовании на корм животным); плоскость среза не должна быть ниже «спящих» глазков, количество корнеплодов с низким и косым срезами допускается до 8 % [15].

Невозможность в обеспечении агротехнических требований на операции уборки сахарной свеклы связана прежде всего с несовершенством конструкции системы просеивающих звезд, архаичностью устройства отчистки, выполненного в виде рабочих органов – чистиков, выполняющих процесс отчистки налипший почвы с этих рабочих органов. От качества выполнения работы системой отчистки в значительной степени зависят показатели эффективности функционирования всего уборочного агрегата. Интенсификации качества сепарирующего процесса возможно достичь применением системы, в которой воздуховоды будут подводить к просеивающей звезде отработавшие газы от силовой установки. Они будут способствовать подсыханию и уменьшению сил сцепления с рабочей поверхностью сепарирующего диска почвенных примесей повышенной влажности. Использование тепловой энергии выхлопных газов для очистки сепарирующей поверхности позволит повысить сепарирующую способность в зависимости от влажности и механического состава почвы [16, с. 1-8].

Проблемой не менее важной является конструктивная неприспособленность современных транспортных средств для перевозки убранной массы клубнеплодов с поля в период отрицательных температур. Для существенного повышения качества процесса транспортировки клубнеплодов сахарной свеклы используют автотранспорт, с помощью которого доставляют корнеплоды на завод. Дальность перевозок автотранспортом достигает 50 км и более. Вывоз корней с поля в основных зонах свеклосеяния продолжается вплоть до конца декабря – начала января. Для их транспортировки в основном используют самосвалы-сельхозники, с возможностью выгрузки продукции на три стороны. Данные кузова предназначены для перевозки различных сыпучих сельскохозяйственных, промышленных и строительных (за исключением скальных пород и булыжника) грузов по всем видам дорог и бездорожью в любых климатических условиях. Так как в зонах свеклосея-

ния, с октября месяца можно наблюдать отрицательные температуры, а самосвальный кузов не защищен от примерзания сельскохозяйственных грузов при эксплуатации, это может привести к потере, и к повышенным энергозатратам при дальнейшей их переработке. В связи с этим предложена его модернизация, заключающаяся в разработке системы обогрева отработавшими газами основания кузова. Поток отработавших газов направляется в систему распределения потока, и проходя через поперечные балки, равномерно обогревает все основание кузова. Данная конструкция позволит отработавшим газам, проходя по сформированным змеевиковым регистрам-теплообменников равномерно обогревать всё основание самосвального кузова. Отработавшие газы, пройдя через регистры, выбрасываются в атмосферу. Использование самосвального кузова, обогреваемого отработавшими газами для перевозки сахарной свеклы, позволит снизить потерю перевозимой продукции, ресурсо- и энергозатраты при её дальнейшей переработке [17, с. 1-9].

На рисунке 4 представлена схема существующей технологии возделывания и уборки сахарной свеклы, жирным выделены технологические операции, где предлагаются новые технические решения [18].

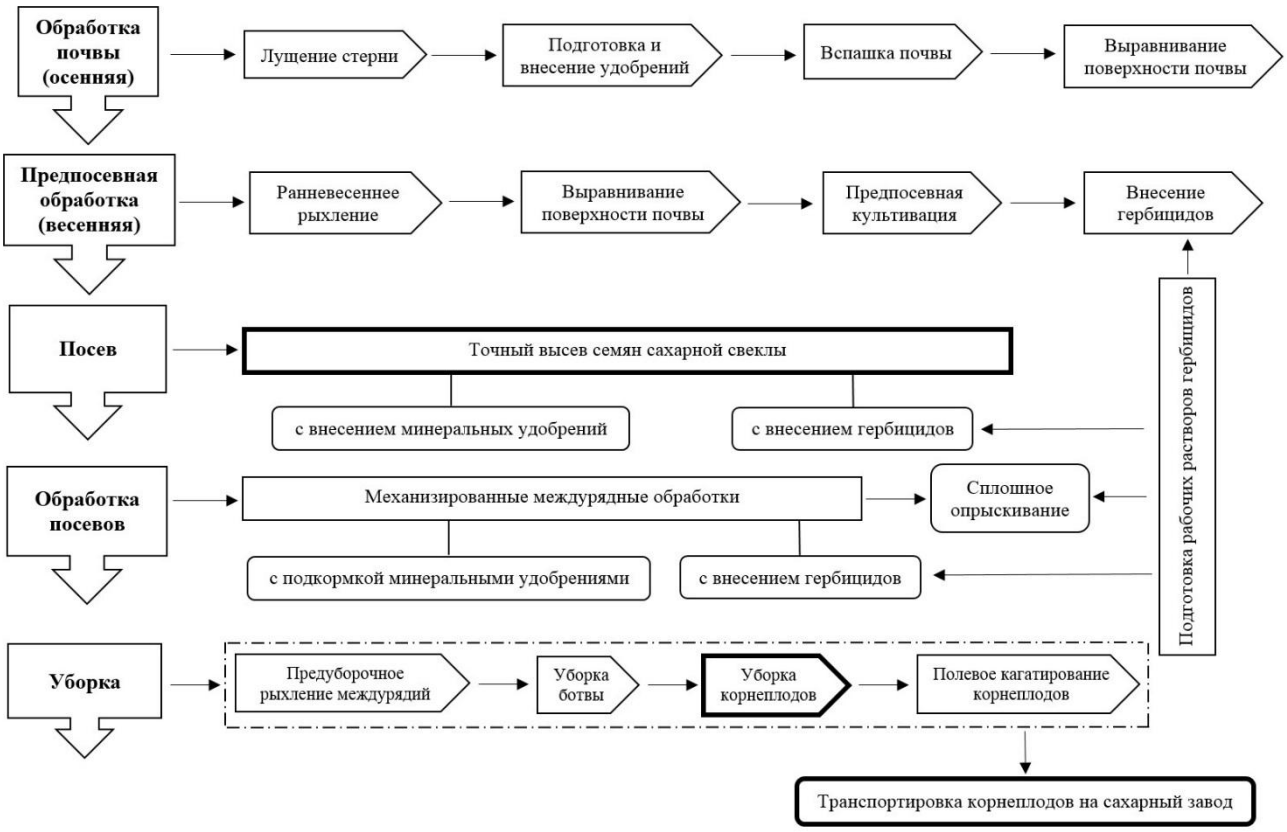


Рисунок 4 – Систематизация проблем при возделывании и уборки корнеплодов сахарной свеклы

Выводы. На основе систематизации основных проблем технологий возделывания и уборки сахарной свеклы был предложен ряд технических решений, подтвержденных Федеральным институтом промышленной собственности Российской Федерации. Целью совершенствования технологии является снижение ресурсо- и энергозатрат при возделывании и уборки сахарной свеклы.

Применение автоматизированного прикатывающего катка секции сеялки, может повысить качество посева семян на 10…15 % за счет контроля и автоматизированной регулировки силы его давления на почву, путем формирования оптимального уплотнения ложа.

Использование тепловой энергии выхлопных газов для очистки сепарирующей поверхности может повысить сепарирующую способность на 12…17 % в зависимости от влажности и механи-

ческого состава почвы, за счет снижения залипания почвой просветов сепарирующей поверхности; ускорить процесс сепарации, повысить качество очистки.

Эксплуатация самосвального кузова для перевозки сельскохозяйственных грузов может снизить потерю перевозимой продукции и энергозатраты на 10…15 % при её дальнейшей переработке.

Список используемой литературы

1. [Электронный ресурс]. URL: https://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-sahara/ (дата обращения: 17.01.2023).

2. [Электронный ресурс]. URL: https://agroupp.ru/zlakovye/strany-gde-vyrashhivayut-saharnuyu-sveklu-i-saharnyj-trostnik.html (дата обращения: 17.01.2023).

3. [Электронный ресурс]. URL: https://sibagrocentr.ru/downloads/sahsvekla.pdf (дата обращения: 17.01.2023).

4. [Электронный ресурс]. URL: https://www.moshol14.ru/press-centr/novosti-rynka/sahar-i-svekla/) (https://www.kommersant.ru/doc/5016932 (дата обращения: 17.01.2023).

5.[Электронный ресурс]. URL: https://tass.ru/ekonomika/13309893?utm_source=google.com&utm_ (дата обращения: 17.01.2023).

6. [Электронный ресурс]. URL: http://ikar.ru/1/lenta/ (дата обращения: 17.01.2023).

7. Федоренко В.Ф., Мишуров Н.П., Щеголихина Т.А., Минакова О.А., Бартенев И.И., Макаров В.А., Еремин П.А. Инновационные технологии производства, хранения и переработки сахарной свеклы: аналит. обзор. М.:ФГБНУ «Росинформагротех», 2020.

8. Зубенко В.Ф. Свекловодство. Проблемы интенсификации и ресурсосбережения / В.Ф. Зубенко. Киев: Альфа-стевия ЛТД, 2005. С. 77–94.

9. [Электронный ресурс]. URL: (https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226) (дата обращения: 17.01.2023).

10.[Электронный ресурс]. URL:https://gossortrf.ru/wp-content/uploads/2021/04/Итоговый-реестр-2021.pdf (дата обращения: 17.01.2023).

11. Шпаар Д., Дрегер Д., Захаренко А. и др. Сахарная свекла (выращивание, уборка, хранение). М.: ИД ООО «DLVАГРОДЕЛО», 2006.

12. Плахов С.Н. Обоснование технологического процесса и основных параметров виброротационной сортировки картофеля: дисс. ... канд. техн. наук. Калуга, 2014.

13. Дорохов А.С. и др. Патент РФ № 2760579. Автоматизированный прикатывающий каток секции сеялки. Заявка №2021112062; заявл. 27.04.2021; опубл. 29.11.2021. Бюл. № 34.

14. Дорохов А.С. и др. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022610305. Программа для микроконтроллера главного пульта управления прикатывающим катком секции сеялки. Заявка № 2021681768; заявл. 27.12.2021; опубл. 11.01.2022.

15. [Электронный ресурс]. URL: https://studref.com/612514/ agropromyshlennost/ (дата обращения: 17.01.2023).

16. Дорохов А.С. и др. Патент РФ № 2754037. Сепарирующая система с тепловой энергией очистки. Заявка № 2021101220; заявл. 21.01.2021; опубл. 25.08.2021. Бюл. № 24.

17. Дорохов А.С. и др. Патент РФ № 2783007. Самосвальный кузов для перевозки сельскохозяйственных грузов, обогреваемый отработавшими газами. Заявка № 2022109211; заявл. 07.04.2022; опубл. 08.11.2022. Бюл. № 31.

18. Балашов А.В. Совершенствование технологии возделывания и уборки сахарной свеклы агрегатами блочно-модульного построения на базе интегрального энергосредства: дисс. ... д-р. техн. наук. Тамбов, 2020.

References

1. [Elektronnyy resurs]. URL: https://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-sahara/ (data obrashcheniya: 17.01.2023).

2. [Elektronnyy resurs]. URL: https://agroupp.ru/zlakovye/strany-gde-vyrashhivayut-saharnuyu-sveklu-i-saharnyj-trostnik.html (data obrashcheniya: 17.01.2023).

3. [Elektronnyy resurs]. URL: https://sibagrocentr.ru/downloads/sahsvekla.pdf (data obrashcheniya: 17.01.2023).

4. [Elektronnyy resurs]. URL: https://www.moshol14.ru/press-centr/novosti-rynka/sahar-i-svekla/) (https://www.kommersant.ru/doc/5016932 (data obrashcheniya: 17.01.2023).

5. [Elektronnyy resurs]. URL: https://tass.ru/ekonomika/13309893?utm_source=google.com&utm_ (data obrashcheniya: 17.01.2023).

6. [Elektronnyy resurs]. URL: http://ikar.ru/1/lenta/ (data obrashcheniya: 17.01.2023).

7. Fedorenko V.F., Mishurov N.P., Shchegolikhina T.A., Minakova O.A., Bartenev I.I., Makarov V.A., Yeremin P.A. Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva, khraneniya i pererabotki sakharnoy svekly: analit. obzor. M.:FGBNU «Rosinformagrotekh», 2020.

8. Zubenko V.F. Sveklovodstvo. Problemy intensifikatsii i resursosberezheniya / V.F. Zubenko. Kiev: Alfa-steviya LTD, 2005. S. 77–94.

9. [Elektronnyy resurs]. URL: (https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226) (data obrashcheniya: 17.01.2023).

10.[Elektronnyy resurs]. URL:https://gossortrf.ru/wp-content/uploads/2021/04/Itogovyy-reestr-2021.pdf (data obrashcheniya: 17.01.2023).

11. Shpaar D., Dreger D., Zakharenko A. i dr. Sakharnaya svekla (vyrashchivanie, uborka, khranenie). M.: ID OOO «DLVAGRODYeLO», 2006.

12. Plakhov S.N. Obosnovanie tekhnologicheskogo protsessa i osnovnykh parametrov vibrorotatsionnoy sortirovki kartofelya: diss. ... kand. tekhn. nauk. Kaluga, 2014.

13. Dorokhov A.S. i dr.Patent RF № 2760579. Avtomatizirovannyy prikatyvayushchiy katok sektsii seyalki. Zayavka №2021112062; zayavl. 27.04.2021; opubl. 29.11.2021. Byul. № 34.

14. Dorokhov A.S. i dr.Svidetelstvo o registratsii programmy dlya EVM №2022610305. Programma dlya mikrokontrollera glavnogo pulta upravleniya prikatyvayushchim katkom sektsii seyalki. Zayavka № 2021681768; zayavl. 27.12.2021; opubl. 11.01.2022.

15. [Elektronnyy resurs]. URL: https://studref.com/612514/ agropromyshlennost/agrotehnicheskie_trebovaniya_uborke_saharnoy_svekly (data obrashcheniya: 17.01.2023).

16. Dorokhov A.S. i dr. Patent RF №2754037. Separiruyushchaya sistema s teplovoy energiey ochistki. Zayavka № 2021101220; zayavl. 21.01.2021; opubl. 25.08.2021. Byul. №24.

17. Dorokhov A.S. i dr. Patent RF №2783007. Samosvalnyy kuzov dlya perevozki selskokhozyaystvennykh gruzov, obogrevaemyy otrabotavshimi gazami. Zayavka № 2022109211; zayavl. 07.04.2022; opubl. 08.11.2022.Byul. №31.

18. Balashov A.V. Sovershenstvovanie tekhnologii vozdelyvaniya i uborki sakharnoy svekly agregatami blochno-modulnogo postroeniya na baze integralnogo energosredstva: diss. ... d-r. tekhn. nauk. Tambov, 2020.

DOI: 10.35523/2307-5872-2023-4 3- 2-126-131
УДК 622.734

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО МАТЕРИАЛА В ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Терентьев В.В., ФГБОУ ВО «Верхневолжский ГАУ»;
Смирнов С.Ф., ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет»;
Краснов А.А., Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

В статье представлены основные машины, применяемые для измельчения различных материалов. Отмечены перспективы использования вибрационных мельниц для тонкого измельчения материалов в условиях мало- и среднетоннажного производства. Для повышения эффективности их работы отмечена важность учета времени пребывания измельчаемого материала в вибрационных мельницах. Указано, что время пребывания материала в вибрационной мельнице является одним из определяющих факторов, влияющих на кинетику измельчения. Представлены результаты моделирования процесса измельчения на основании уравнения одномерной фильтрации через мелющую среду. Отмечено влияние на время нахождения материала в мельнице уровня материала на входе и выходе из мельницы. В процессе исследований были разработаны математические модели, которые описывают изменение высоты материала, скорость прохождения материала по вибрационной мельнице и время пребывания материала в ней. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной и изготовленной стендовой вибрационной мельнице. В качестве мелющих тел использованы стальные шары диаметром d=15 мм, с максимальной допустимой шаровой загрузкой φ=0,8. Представлены экспериментальные данные зависимости высоты измельчаемого материала на входе и на выходе из вибрационной мельницы в зависимости от производительности. Экспериментально на разработанной стендовой вибрационной мельнице установлена зависимость времени пребывания материала в мельнице от производительности. Отмечено, что существует оптимальное значение производительности и подачи измельчаемого материала в вибрационную мельницу, превышение которых не приведет к изменению времени нахождения материала в вибрационной мельнице и повышению степени измельчения материала.

Ключевые слова: измельчение, вибрационная мельница, шаровая загрузка, уровень материала, производительность

Для цитирования: *Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Краснов А.А. Моделирование времени пребывания измельчаемого материала в вибрационной мельнице // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 2 (43). С. 126-131.*

Введение. Процесс измельчения играет ключевую роль в получении тонкодисперсных материалов и полуфабрикатов в пищевой промышленности, сельском хозяйстве, химической промышленности и т.д.

Для реализации процесса измельчения в настоящее время используются измельчители различных конструкций и принципа действия. Широкое применение нашли центробежные измельчители ударного действия (молотковые дробилки, дисмембраторы, и т.д.). Данные машины в основном применяются для мелкого и среднего дробления.

Одними из применяемых машин ударного действия для тонкого помола материалов являются дезинтеграторы. Известно, например, применение дезинтеграторной технологии при производстве смазочных материалов [1-3]. При этом за счет процесса механоактивации снижается время синтеза смазочного материала, увеличивается выход готового продукта.

Одним из основных недостатков измельчителей ударного действия является низкая долговечность рабочих органов (лопаток, бил, молоткови т.п.).

Для тонкого размола широко применяются измельчители ударно-истирающего действия (барабанные шаровые мельницы, струйные и кольцевые мельницы и т.д).

В мало - и среднетоннажных производствах важное место отводится вибрационным мельницам. Вибрационные мельницы позволяют осуществлять как сухое, так и мокрое измельчение материалов. Вследствие большой удельной поверхности энергообмена с мелющими телами и больших ускорений мелющих тел они позволяют получить высокую тонкость измельчения при высокой удельной производительности.

Основными факторами, определяющими эффективность процесса измельчения в вибрационных мельницах, являются [4]: частота вибрации помольной камеры, коэффициент загрузки мельницы материалом, коэффициент загрузки помольной камеры мелющими телами и т.д. Время пребывания материала в вибрационной мельнице является одним из определяющих факторов, влияющих на кинетику измельчения [5]. Связь между производительностью и временем пребывания материала является достаточно сложной. В промышленных условиях возможно изменение производительности мельницы при смене режима работы, режима загрузки, что приводит к изменению тонкости измельчения.

Цель и задачи. Разработка математической модели, адекватно описывающей время пребывания измельчаемого материала в вибрационной мельнице, оценка влияния времени пребывания измельчаемого материала на величину размола при изменении подачи измельчаемого материала в вибрационную мельницу.

Условия, материалы и методы исследований. При создании математической модели учитывалось уравнение одномерной фильтрации через мелющую среду. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной и изготовленной стендовой вибрационной мельнице. На стендовой вибрационной мельнице с частотой колебаний 320 рад/с, диаметром d =2r = 130 мм и длиной L=260 мм с разгрузочным устройством в виде экрана были проведены эксперименты по исследованию движения сыпучего материла, в качестве которого был взят сухой речной песок с плотностью 1,3 г/см^3.

Для измерения высоты загрузки материалом на входе и на выходе из мельницы торцы вибрационной мельницы выполнены из органического стекла. В качестве мелющих тел использованы стальные шары диаметром d=15 мм, с максимальной допустимой шаровой загрузкой φ=0,8 [5]. Непосредственно измерялись уровни материала на входе и на выходе из мельницы при разной производительности Q.

Результаты исследований. Для построении модели движения измельчаемого материала полагают, что он находится в виброожиженном состоянии, поэтому можно использовать уравнение одномерной фильтрации через мелющую среду [6, 7]:

$$dh= --\lambda \cdot v^2 dz/2gd, \quad (1)$$

где z – координата процесса, направленная вдоль оси мельницы;

h - высота слоя материала в барабане вибрационной мельницы;

v - средняя скорость движения материала;

d- диаметр мелющего шара;

g - ускорение свободного падения;

λ - коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления определяется из выражения:

$$\lambda = a / Re^n, \quad (2)$$

где a– константа;

$Re = v \cdot d_h / \eta$ – число Рейнольдса;

d_h- гидравлический диаметр зазора между шарами;

η- кинематическая вязкость виброожиженного материала.

При турбулентной фильтрации согласно [7] значение показателя степени в (2) принимается равным нулю (n= 0).

Рассмотрим модель сечения мельницы с прямоугольным основанием b. При установившемся режиме движения поток Q через любое сечение A(h) будет постоянным, следовательно, скорость движения v=Q/A(h)=Q/bh. Подставим выражение для скорости в (4) и разделяя переменные, получим:

$$h^2 dh = -aQ^2 \frac{1}{b^2 2gd} dz = -C \cdot dz. \quad (3)$$

Интегрируем уравнение (3) и получим:

$$h = \sqrt[3]{h_0^3 - 3Cz}, \quad (4)$$

где h_0 -начальный уровень (высота) материала.

Тогда скорость движения материала будет являться функцией координаты z, т.е. v=v(z).

На основании (4) примем для вибрационной мельницы с круглым поперечным сечением математическую модель изменения материала по высоте в виде выражения:

$$h(z) = \sqrt[3]{h_0^3 - k(Q)z}, \quad (5)$$

где $k(Q)$ – коэффициент, определяемый экспериментально.

Расход материала Q для круглого поперечного сечения [5] при установившемся режиме одномерной фильтрации определяем, учитывая модель движения (5), из выражения:

$$Q = \psi \cdot \varphi \cdot v(z) r^2 \left[arcsin\left(\frac{h(z)}{r} - 1\right) + \left(\frac{h(z)}{r} - 1\right)\left(\sqrt{1 - \left(\frac{h(z)}{r} - 1\right)^2}\right) + \frac{\pi}{2} \right], \quad (6)$$

где r – радиус мельницы,

ψ – степень заполнения мелющей загрузки измельчаемым материалом,

φ - шаровая загрузка вибрационной мельницы.

При заполнении вибрационных мельниц мелющей загрузкой в виде шаров (шаровая загрузка) экспериментально было получено значение ψ= 0,37 [5].

С учетом (5) из выражения для потока (6) получим зависимость скорости прохождения материала вдоль вибрационной мельницы при известной производительности Q:

$$v(z) = \frac{Q}{\psi \cdot \varphi} \cdot \frac{1}{r^2 \left[arcsin\left(\frac{h(z)}{r} - 1\right) + \left(\frac{h(z)}{r} - 1\right)\left(\sqrt{1 - \left(\frac{h(z)}{r} - 1\right)^2}\right) + \frac{\pi}{2} \right]}. \quad (7)$$

Следовательно, время пребывания материала в вибрационной мельнице можно рассчитать из выражения:

$$t = \int_0^L \frac{dz}{v(z)} = \frac{\psi \cdot \varphi \cdot r^2}{Q} \int_0^L \left[arcsin\left(\frac{h(z)}{r} - 1\right) + \left(\frac{h(z)}{r} - 1\right)\left(\sqrt{1 - \left(\frac{h(z)}{r} - 1\right)^2}\right) + \frac{\pi}{2} \right] dz. \quad (8)$$

Для подтверждения теоретических данных была разработана стендовая вибрационная мельница, схема которой представлена на рис. 1.

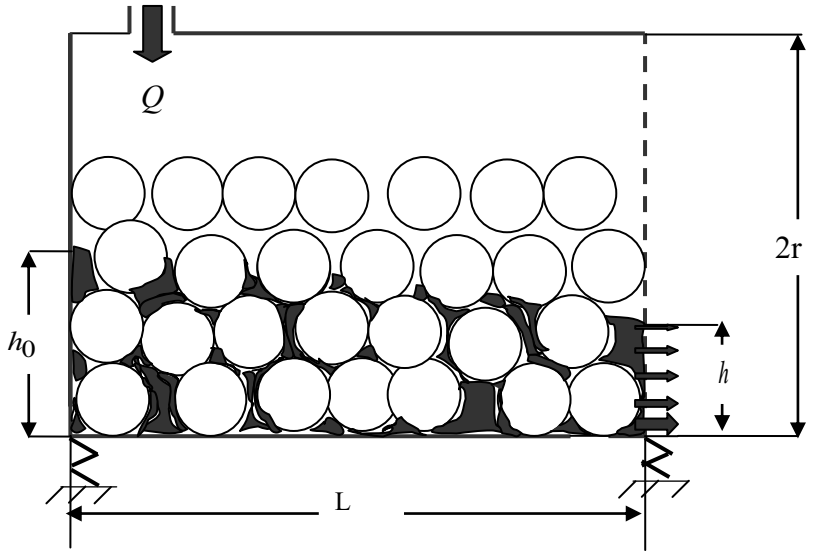


Рисунок 1 – Схема стендовой вибрационной мельницы

Экспериментальные данные зависимости высоты измельчаемого материала на входе и на выходе из вибрационной мельницы в зависимости от производительности приведены на рис. 2.

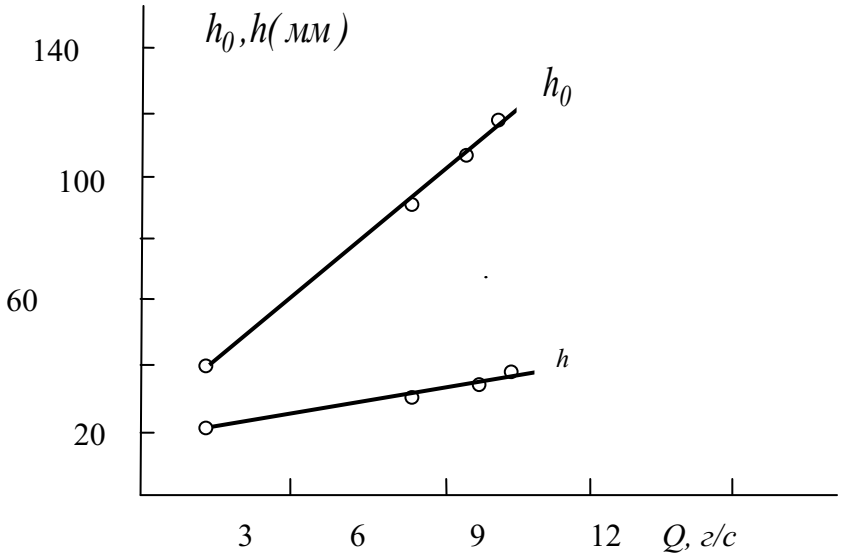


Рисунок 2 – Зависимость уровней материала на входе (h_0) и выходе (h) от производительности при φ = 0,8

По полученным данным были определены значения $k(Q)$, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Производительность,Q, г/с	$k(Q)$, мм^2
1,2	215,4
5,4	2700,0
6,7	4954,3
7,5	6435,1

При интегрировании выражения (8) были получены значения времени *t* пребывания материала при разгрузке через экран. Результаты расчета приведены на рис. 3.

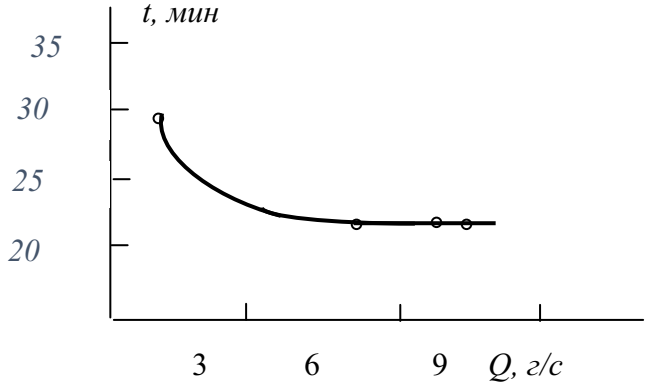


Рисунок 3 –Зависимость времени пребывания материала (t) от производительности (Q)

Применяя предложенную модель (5) изменения высоты материала, расчет показал, что время пребывания материала в вибрационной мельнице при разгрузке через экран, начиная при производительности *Q*=5,4 *г/с*до предельного значения, когда возможен «завал» мельницы, остается практически постоянным.

Это позволяет сделать вывод: тонкость измельчения будет оставаться практически одинаковой в достаточно большом диапазоне производительности, что важно при изменении величины подачи материала в вибрационную мельницу, при режиме работы в промышленных условиях эксплуатации.

Выводы. В процессе исследований разработана математическая модель, описывающая время пребывания материала в вибрационной мельнице.

Существует оптимальное значение производительности и подачи измельчаемого материала в вибрационную мельницу, превышение которых вплоть до предельных значений, не приведет к изменению времени нахождения материала в вибрационной мельнице и повышению степени измельчения материала.

Список используемой литературы

1. Акопова О.Б., Рязанцева А.В., Терентьев В.В. Использование дезинтеграторной технологии при создании экологичных смазочных композиций// Аграрный вестник Верхневолжья. 2016. № 4 (17). С. 40-45.

2. Терентьев В.В., Акопова О.Б., Баусов А.М., Галкин И.М., Твердов А.В., Телегин И.А. Исследование триботехнических характеристик смазочных материалов на основе растительного сырья // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Вып. 1. С. 69–73.

3. Акопова О.Б., А.В. Рязанцева А.В., Терентьев В.В., Телегин И.А. Получение экологичных смазочных композиций с использованием дезинтеграторной технологии. //Химические проблемы современности: Сборник тезисов докладов Второй международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. Т. 7. С.242-243.

4. Гаврунов А.Ю., Богданов Н.Э., Карагодина К.И., Шеховцова Ю.А. Влияние режима процесса измельчения в вибрационной мельнице на удельный расход энергии//Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 98-103.

5. Мизонов В.Е., Бернотат З., Поспелов А.А. К расчету среднего времени пребывания материала в размольной камере вибромельницы // Техника и технология измельчения сыпучих материалов. Иваново, 1991. С. 26–29.
6. Федосов С.В. Расчетно-экспериментальное исследование движения материала в вибромельнице // Вестник МГСУ. Москва, 2009. № 1. С. 160–163.
7. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.

References

1. Akopova O.B., Ryazantseva A.V., Terentev V.V. Ispolzovanie dezintegratornoy tekhnologii pri sozdanii ekologichnykh smazochnykh kompozitsiy// Agrarnyy vestnik Verkhnevolzhya. 2016. № 4 (17). S. 40-45.
2. Terentev V.V., Akopova O.B., Bausov A.M., Galkin I.M., Tverdov A.V., Telegin I.A. Issledovanie tribotekhnicheskikh kharakteristik smazochnykh materialov na osnove rastitelnogo syrya // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispolzovanie. 2014. Vyp. 1. S. 69–73.
3. Akopova O.B., A.V. Ryazantseva A.V., Terentev V.V., Telegin I.A. Poluchenie ekologichnykh smazochnykh kompozitsiy s ispolzovaniem dezintegratornoy tekhnologii. //Khimicheskie problemy sovremennosti: Sbornik tezisov dokladov Vtoroy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Rostov-na-Donu: Izdatelstvo Yuzhnogo federalnogo universiteta, 2016. T. 7. S.242-243.
4. Gavrunov A.Yu., Bogdanov N.E., Karagodina K.I., Shekhovtsova Yu.A. Vliyanie rezhima protsessa izmelcheniya v vibratsionnoy melnitse na udelnyy raskhod energii//Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. 2017. № 5. S. 98-103.
5. Mizonov V.Ye., Bernotat Z., Pospelov A.A. K raschetu srednego vremeni prebyvaniya materiala v razmolnoy kamere vibromelnitsy // Tekhnika i tekhnologiya izmelcheniya sypuchikh materialov. Ivanovo, 1991. S. 26–29.
6. Fedosov S.V. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie dvizheniya materiala v vibromelnitse // Vestnik MGSU. Moskva, 2009. № 1. S. 160-163.
7. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. M.: Mashinostroenie, 1975.

DOI: 10.35523/2307-5872-2023-43-2-132-137
УДК 631.35

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ КОНВЕЙЕРА ПРИ СГРЕБАНИИ ТРАВЯНОЙ МАССЫ

Чернышев А.Д., Рязанский институт (филиал) Московского Политехнического университета, Рязань;
Еремин П.А., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»;
Костенко М.Ю., Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, Рязань

Производство качественных кормов позволяет увеличить продуктивность животных. Отдельным видам животных, например, крупному рогатому скоту требуются грубые корма. Потери при сгребании и подборе травяной массы являются ощутимыми при заготовке кормов. У подвяленных растений листья и соцветия быстро высыхают, переплетаются в валке, сцепляясь со стеблями соседних растений, поэтому они более подвержены отрыву при сгребании и подборе. В результате грабления происходит процесс ворошения растений, собранных в пучок, интенсивное воздействие отдельной граблины вызывает отрыв листьев и соцветий. Целью работы является снижение потерь при сгребании травяной массы механизмом механических граблей ротационно-конвейерного типа. Многочисленные исследования ротационно-конвейерных граблей показали, что в процессе работы механизма граблей возникает изменение потоков мощностей во время их движения в зависимости от размеров граблей. Очевидно, что процесс сгребания имеет разный характер в различных зонах сгребания и зависит от траектории сгребания, которая задается конструкцией машины. При перемещении конвейерных граблей по полю частицы сена участвуют в двух видах движений: переносное в направлении движения агрегата по прокосу и относительное движение с граблины вместе с конвейерной лентой. Накопленная травяная масса на граблинах оказывается пропорциональна квадрату ширины захвата граблей. Необходимая работа и мощность на привод конвейерного полотна граблей будет в большей степени определяться шириной захвата и скоростью движения машины. Теоретическими исследованиями установлены параметры граблей: ширина захвата 5 метров, скорость 3,5 м/с.

Ключевые слова: *сено, граблина, грабли, заготовка кормов, ротационно-конвейерные грабли*

Для цитирования: *Чернышев А.Д., Еремин П.А., Костенко М.Ю. Исследование силового воздействия рабочих органов конвейера при сгребании травяной массы // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 2 (43). С. 132-137.*

Введение. Производство качественных кормов позволяет увеличить продуктивность животных. Отдельным видам животных, например, крупному рогатому скоту требуются грубые корма. Сено является важным источником витаминов и питательных веществ. Сено - это травяная масса, скошенная в зеленом виде до достижения полного созревания. Также подсушенная трава, влажность которой составляет от 50-55 %, является основой для сенажа. Для заготовки сена в сложных условиях применяют специальные технологические средства, такие как кормоуборочные комбайны, косилки и даже радиоуправляемые косилки. Их применение позволяет автоматизировать процесс кошения травы, также позволяет увеличить скорость заготовки. Однако процесс сгребания и ворошения сена является значительной проблемой [1].

Потери при сгребании и подборе травяной массы являются ощутимыми при заготовке кормов. Листья и соцветия обладают главной питательной ценностью. У подвяленных растений они быстрей высыхают, переплетаются в валке, сцепляясь со стеблями соседних растений, поэтому они более подвержены отрыву при сгребании и подборе. При этом при сгребании травы происходит и ее

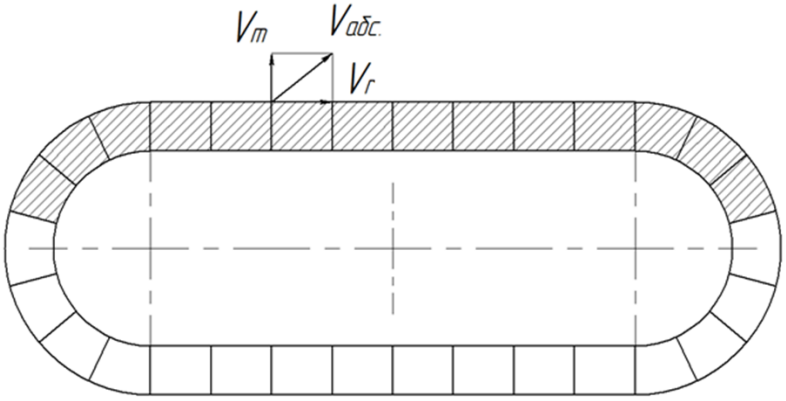
ворошение рабочими органами граблей. В результате грабления происходит процесс ворошения растений, собранных в пучок, в результате воздействия отдельной граблиной возможен отрыв листьев и соцветий. Потери при сгребании связаны с комплексом причин, главные из которых – обивание, разрыв валка и потеря массы скошенной травы граблиной [2, с. 48-52]. При этом типы рабочих органов машины ротационно-конвейерных граблей постоянно совершенствуются. Исследования по определению коэффициента трения при перемещении травяной массы по различным поверхностям привели к созданию новых машин с активными рабочими органами. Однако общая картина процесса сгребания до сих пор недостаточно изучена. Очевидно, что процесс сгребания имеет разный характер в различных зонах сгребания и зависит от траектории сгребания, которая задается конструкцией машины. Остаются неясными и закономерности, связанные с воздействием граблины на валок различной влажности, массы и видов растений, входящих в него. Сложность состоит в том, что процесс сгребания быстротечен и нагрузка на рабочие органы проявляется неравномерно.

Цель и задачи. Целью работы является снижение потерь при сгребании травяной массы механизмом механических граблей ротационно-конвейерного типа.

Задачи исследований: теоретические исследования динамики процесса сгребания сена; обоснование зависимости мощности привода конвейерных граблей от скорости движения и скорости движения граблины.

Материалы исследований. В настоящее время ротационно-конвейерные рабочие органы находят широкое применение для сгребания и ворошения скошенной массы. Рабочий орган ротационно-конвейерного типа является новым и перспективным устройством. Многочисленные исследования ротационно-конвейерных граблей показали, что в процессе работы механизма граблей возникает изменение потоков мощностей во время их движения в зависимости от размеров граблей. Также при передвижении граблины происходит изменение нагрузки в зависимости от ее расположения в процессе сгребания. При этом рабочий орган ротационно-конвейерного типа является новым и перспективным устройством [3]. Меньшая металлоемкость и энергоемкость дает возможность применять его на сгребающих устройствах малой мощности, например, в агрегате с мотоблоком. Он хорошо копирует рельеф и имеет захват рабочего органа от 2 до 6 метров, с успехом применяется на сгребании и перемещения валков большого объема при работе даже на косогорах. По показателям качества работы и производительности он превосходит все известные устройства [4].

Рассмотрим процесс сгребания ротационно-конвейерными граблями. При перемещении конвейерных граблей по полю частицы сена участвуют в двух видах движений: переносное в направлении движения агрегата по прокосу и относительное движение с граблины вместе с конвейерной лентой (рис. 1) [5. с. 9-11].



V_m – скорость движения машины; $V_г$ – скорость перемещения конвейера с граблинами; $V_{абс.}$ – абсолютная суммарная (векторная) скорость пучка сена

Рис. 1 – Схема сгребания прокоса конвейерными граблями

Анализируя рисунок 1 видно, что абсолютная скорость определится выражением:

$$V_{абс} = \sqrt{V_m^2 + V_г^2} \quad (1)$$

Сделаем следующие допущения:

1. Травяная масса распределена равномерным слоем по площади прокоса.
2. Граблина захватывает массу пучками равными по весу.
3. Пучки не смешиваются и не внедряются один в один (не прессуется).

Масса сгребаемой (перемешенной) травяной массы пропорциональна скошенной площади и записывается в виде выражения:

$$m = S \cdot y, \quad (2)$$

где S– скошенная площадь;
y – урожайность сено.

В то же время масса сена определится в следующем виде:

$$m = S \cdot h \cdot \rho, \quad (3)$$

где h – высота слоя в прокосе;
ρ – объемная масса.

Перемещение сена в продольном направлении на расстояние описывается следующей формулой:

$$L_m = \int_0^t V_m(t)dt \quad (4)$$

Аналогично записывается перемещение в поперечном направлении:

$$L_г = \int_0^t V_г(t)dt \quad (5)$$

Учитывая, что скорость машины и граблины на установившемся режиме движения постоянна, то перемещение сена можно записать следующими выражениями:

$$L_m = V_m t \quad (6)$$

$$L_г = V_г t \quad (7)$$

Определяем приращение массы на граблинах при сгребании по формуле:

$$m = V_m \cdot V_г \cdot t^2 \cdot h \cdot \rho = V_m \cdot V_г \cdot t^2 \cdot y \quad (8)$$

С другой стороны, время сгребания сена t зависит от скорости движения граблин $V_г$ (в данном случае будем считать пока только от скорости без учета их количества ширины, длины, расстановки на одном метре ширины захвата)

$$t = \frac{B}{V_г}, \quad (9)$$

где B – ширина захвата граблей;
$V_г$ – скорость движения граблины.

Подставив выражение (8) в выражение (7), получим:

$$m = \frac{V_m \cdot B^2}{V_г} \cdot h \cdot \rho = \frac{V_m}{V_г} \cdot B^2 \cdot y \quad (10)$$

Таким образом, накопленная масса на граблинах оказывается пропорциональна квадрату ширины захвата граблей.

Для продвижения захваченной массы необходимо преодолеть силу трения, которая возникает при движении массы сена по стерне

$$F_{тр} = f_{тр} \cdot m \cdot g, \quad (11)$$

где $f_{тр}$– коэффициент трения сена о стерню;
g – ускорение свободного падения.

Введем допущение, что движение происходит с постоянной скоростью, тогда можно считать, что захваченное граблиной сено находится в равновесии. Таким образом, в процессе сгребания не меняется количество пучков, то есть общая масса не меняется [6].

Мощность привода, необходимая для обеспечения перемещения кормовой массы по стерне, можно определить о формуле

$$N = F_{тр} \cdot V_{абс}, \quad (12)$$

где $V_{абс.}$ – абсолютная суммарная (векторная) скорость граблины пучка сена.

Подставив в формулу (14) формулы (11, 12, 13), получим

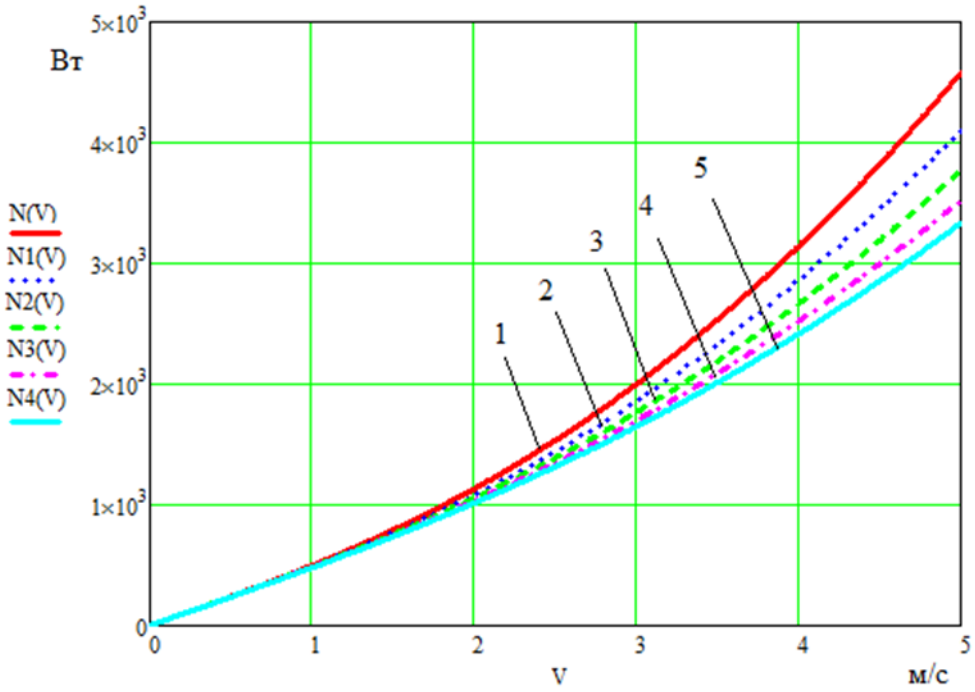
$$N = f_{тр} \cdot \frac{V_m}{V_г} \cdot y \cdot B^2 \cdot g \cdot V_{абс} \quad (13)$$

Работа по перемещению сена в поперечном направлении определяется следующим выражением:

$$A = f_{тр} \cdot \frac{V_m}{2 \cdot V_г} \cdot y \cdot g \cdot B^3 \quad (14)$$

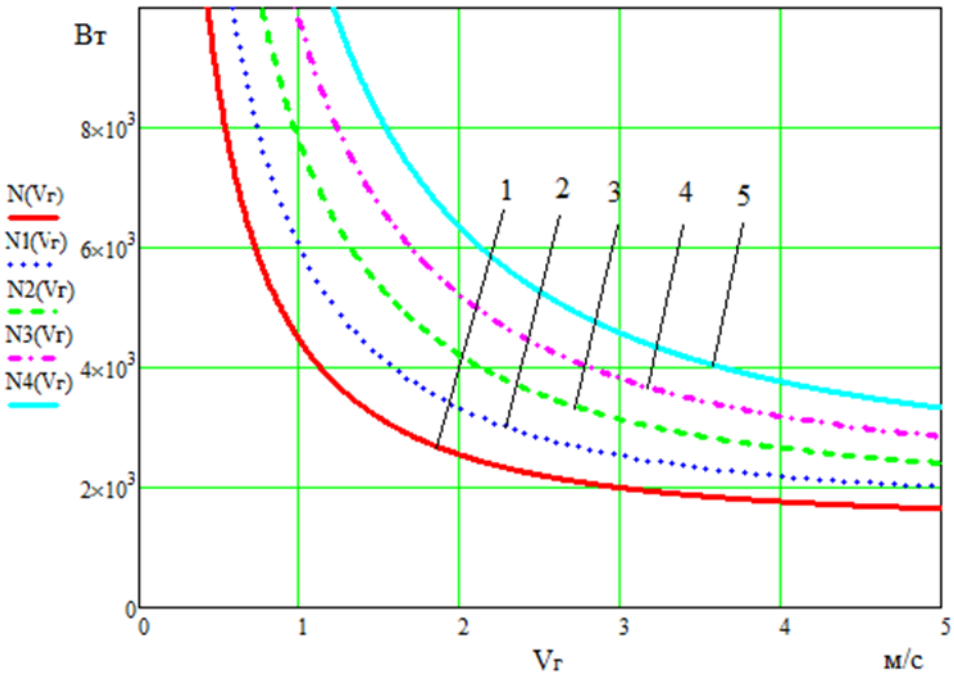
Таким образом, необходимая работа и мощность на привод конвейерного полотна граблей будет в большей степени определяться шириной захвата *B* и скоростью движения машины V_m.

На основании формулы (14) в программе MathCad были построены графики зависимостей потребляемой мощности на привод конвейерных граблей от скорости движения машины (рис. 2) и зависимость потребляемой мощности на привод конвейерных граблей от скорости движения граблины (рис. 3) [7].



1 – ширина захвата 3,5 м; 2 – ширина захвата 4 м; 3 – ширина захвата 4,5 м; 4 – ширина захвата 5 м; 5 – ширина захвата 5,5

Рис. 2 – Зависимость потребляемой мощности на привод конвейерных граблей от скорости движения машины



1 – ширина захвата 3,5 м; 2 – ширина захвата 4 м; 3 – ширина захвата 4,5 м; 4 – ширина захвата 5 м; 5 – ширина захвата 5,5

Рис. 3 – Зависимость потребляемой мощности на привод конвейерных граблей от скорости движения граблины

Анализируя рисунок 2, видно, что мощность на привод конвейерных граблей интенсивно возрастает со скорости движения машины 2 м/с. Также мощность определяется шириной захвата конвейерных граблей. Теоретическими исследованиями установлено, что рациональными параметрами конвейерных граблей является: ширина захвата 5 метров, рабочая скорость машины 3,5 м/с.

Анализ рисунка 3 показал, что мощность привода конвейерных граблей интенсивно снижается от изменения скорости движения граблины. Для уточнения рациональных параметров были проведены дополнительные исследования (численное моделирование), в результате которого установлено, что скорость движения граблины составляет 4,5-5 м/с, что соответствует значению мощности движения машины.

Выводы. Теоретическими исследованиями установлено, что мощность определяется шириной захвата конвейерных граблей. Накопленная травяная масса на граблинах оказывается пропорциональна квадрату ширины захвата граблей. Необходимая работа и мощность на привод конвейерного полотна граблей будет в большей степени определяться шириной захвата и скоростью движения машины. Мощность привода конвейерных граблей интенсивно снижается при увеличении скорости движения граблины. Для уточнения рациональных параметров были проведены дополнительные исследования (численное моделирование), в результате которого установлено, что скорость движения граблины составляет 4,5-5 м/с. Теоретическими исследованиями установлено, что рациональными параметрами конвейерных граблей является: ширина захвата 5 метров, рабочая скорость машины 3,5 м/с.

Список используемой литературы

1. Орсик Л. С. Инновационные технологии и комплексы машин для заготовки и хранения кормов, Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса. Москва: Российский науч-

но-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2008.

2. Еремин П. А. Рабочие органы горизонтально-конвейерного типа для сгребания травяной массы, сельскохозяйственные машины и технологии. Москва. 2019. С. 48-52.

3. Лачуга Ю. Ф. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2012.

4. Баитов Б. И. Авторское свидетельство № 1436923 А1 СССР, МПК А01D 7/00. Грабли-ворошилка ротационные: № 4049605: заявл. 07.04.1986: опубл. 15.11.1988; заявитель Фрунзенский конструкторско-технологический институт по кормоуборочным машинам.

5. Еремин П. А. Физическое моделирование процесса сгребания сена из клевера на лабораторной установке грабель ротационно-конвейерного типа. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства. 1989. С. 9-11.

6. Орлянский А. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611109 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования работы агрегатов на сгребании трав: № 2021610317: заявл. 13.01.2021: опубл. 21.01.2021; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет».

7. Баутин В. М. Справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства: В 2-х частях. Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2003.

References

1. Orsik L. S. Innovatsionnye tekhnologii i kompleksy mashin dlya zagotovki i khraneniya kormov, Rossiyskiy nauchno-issledovatelskiy institut informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy po inzhenerno-tekhnicheskomu obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa. Moskva: Rossiyskiy nauchno-issledovatelskiy institut informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy po inzhenerno-tekhnicheskomu obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa, 2008.

2. Yeremin P. A. Rabochie organy gorizontalno-konveyernogo tipa dlya sgrebaniya travyanoy massy, selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. Moskva. 2019. S. 48-52.

3. Lachuga Yu. F. Sistema mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii selskokhozyaystvennogo proizvodstva na period do 2020 goda. Moskva: Vserossiyskiy nauchno-issledovatelskiy institut mekhanizatsii selskogo khozyaystva, 2012..

4. Baitov B. I. Avtorskoe svidetelstvo № 1436923 A1 SSSR, MPK A01D 7/00. Grabli-voroshilka rotatsionnye: № 4049605: zayavl. 07.04.1986: opubl. 15.11.1988; zayavitel Frunzenskiy konstruktorsko-tekhnologicheskiy institut po kormouborochnym mashinam.

5. Yeremin P. A. Fizicheskoe modelirovanie protsessa sgrebaniya sena iz klevera na laboratornoy ustanovke grabel rotatsionno-konveyernogo tipa. Nauchno-tekhnicheskiy byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta mekhanizatsii selskogo khozyaystva. 1989. S. 9-11.

6. Orlyanskiy A. V. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2021611109 Rossiyskaya Federatsiya. Programma imitatsionnogo modelirovaniya raboty agregatov na sgrebanii trav: № 2021610317: zayavl. 13.01.2021: opubl. 21.01.2021; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Stavropolskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet».

7. Bautin V. M. Spravochnik inzhenera-mekhanika selskokhozyaystvennogo proizvodstva: V 2-kh chastyakh. Moskva: Rossiyskiy nauchno-issledovatelskiy institut informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy po inzhenerno-tekhnicheskomu obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa, 2003.