

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

УДК 631.354

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.188-206

Оригинальная статья



Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период

В. А. Комаров*, **М. И. Курашкин**
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

*komarov.v.a2010@mail.ru

Введение. Зерноуборочный комбайн в течение года используют не более двух месяцев. Он должен обладать максимальной эксплуатационной надежностью, так как даже непродолжительные простои в период уборочных работ ведут к большим потерям урожая. Целью настоящего исследования является выявление причин отказов комбайнов при гарантийной эксплуатации.

Материалы и методы. Выявление последствий сбоев и обеспечение непрерывной работы комбайнов основывается на усовершенствованной классификации отказов. В процессе исследования предложены пути решения проблемы простоя комбайнов на основании анализа времени на устранение неисправности. Учитывалась категория тяжести последствий отказов.

Результаты исследования. В результате наблюдений в период с 2018 по 2020 гг. выявлены отказы узлов и систем комбайнов, имеющих низкие показатели надежности в гарантийный период. Большая часть отказов (59,2 %) – у комбайнов российского производства. Из них эксплуатационные отказы составляют 55,9 %, конструктивные – 26,7 % и производственные – 17,4 %. Определены общие закономерности изменения среднего времени на устранение отказов комбайнов. Создана геометрическая модель детали, обеспечивающей безотказную работу комбайнов (вал шнека жатки). Использовался конечно-элементный анализ (ANSYS), позволивший выявить участки, подверженные максимальной рабочей нагрузке. Выявлены узлы и детали, выходящие из строя в период гарантийной эксплуатации по причинам, связанным с конструктивно-технологическими недоработками.

Обсуждение и заключение. С целью сокращения времени на устранение последствий отказов необходимо создание более разветвленной сети предприятий, оказывающих широкую номенклатуру сервисных услуг, совершенствование организации

© Комаров В. А., Курашкин М. И., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

технического сервиса и расширение прямых связей с заводами-изготовителями техники для быстрого реагирования и принятия необходимых конструктивно-технологических решений.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, эксплуатация, гарантийный период, конструкционно-технологическая недоработка, отказ, время устранения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Комаров, В. А. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период / В. А. Комаров, М. И. Курашкин. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.188-206](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 188–206.

Original article

Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period

V. A. Komarov*, M. I. Kurashkin

National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

*komarov.v.a2010@mail.ru

Introduction. Grain harvesters are used for no more than two months within a year. They must have maximum operating reliability, since even short downtime during the harvesting period result in large crop losses. The purpose of the study is to identify the causes of combine harvester failures within the warranty period.

Materials and Methods. Identifying consequences of failures and ensuring the reliability of grain harvesters are based on an improved classification of failures. In the process of studying, there have been proposed the ways to solve the problem of combine harvester downtime based on the analysis of the time for grain harvester troubleshooting. The category of severity of failure consequences was taken into account.

Results. Through monitoring in the period from 2018 to 2020, there were found failures of units and systems of grain harvesters with low reliability indexes within the warranty period. Most of the failures (59.2%) were found in Russian-manufactured combines, of which operational failures are 55.9%, structural failures – 26.7%, and production failures – 17.4%. The general patterns of changes in the average time for combine troubleshooting have been determined. A geometric model of a detail for the trouble-free operation of combines (header auger shaft) was created. The finite element analysis (ANSYS) was used to identify parts, which are subject to maximum workload. There have been identified units and parts, which fail to function within the warranty period, because of design and technological defects.

Discussion and Conclusion. In order to reduce the time to find the consequences of failures, it is necessary to create a more extensive network of enterprises providing a wide range of services, improve the organization of technical service and expand direct links with the manufacturers of equipment in order to respond quickly and make the necessary design and technological decisions.

Keywords: grain harvester, operation, warranty period, structural and technological defect, failure, time for troubleshooting

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):188-206. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>

Введение

Важнейшим звеном в технологической цепочке производства зерновых культур и наиболее напряженной операцией является уборочный процесс. От его продолжительности во многом зависит уровень качества и количество полученного урожая [1–3].

Множество видов сельскохозяйственных культур, разнообразие погодных условий в регионах Российской Федерации требуют от производителей техники разработки и создания высокопроизводительных и надежных зерноуборочных комбайнов [1; 4; 5].

При этом в процессе эксплуатации комбайнов необходимо обеспечение высокого уровня безотказности функционирования [6–8]. Отказ какой-либо подсистемы приводит к нарушению всего комплекса технологических операций. Это может стать причиной снижения уровня работоспособности комбайнов как в гарантийный период, так и в течение всего срока службы [9–11].

Особенно важно в процессе эксплуатации комбайнов обеспечить и сохранить заложенные на этапах конструирования и производства параметры надежности [12; 13]. Наиболее ответственным с этой точки зрения является начальный период использования комбайнов. Нарушение правил эксплуатации и обслуживания комбайнов в гарантийный период может привести к возникновению преждевременных отказов [14–16].

Целью настоящего исследования является выявление конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов, причин возникновения и времени на их устранение для агрегатов зерноуборочных комбайнов различных производителей в период гарантийной эксплуатации.

Обзор литературы

Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года стимулирует приобретение значительного объема новой техники, в том числе комбайнов¹. Для эффективного использования новых комбайнов необходим анализ производственного уровня параметров безотказности, долговечности и ремонтпригодности. Такие экспериментальные исследования позволяют установить общие зависимости изменения показателей надежности в различные периоды срока службы. Особенно это важно во время действия гарантии для выявления конструктивных и технологических недоработок и создания рекомендаций по их устранению [17–19].

Продолжительность использования комбайнов в технологических операциях в течение года не превышает двух месяцев [20; 21]. Поэтому комбайны должны иметь максимальные эксплуатационные показатели безотказности и долговечности. Возникновение в процессе уборочных работ непродолжительных простоев ведет к снижению урожайности и большим потерям зерна [8; 22; 23].

Согласно данным исследователей зафиксированные простои машин на уборочных работах составляют от 10 до 50 % от общего времени использования комбайнов [3; 9]. Однако большинство исследователей при определении среднего времени устранения последствий отказов учитывают только оперативное и подготовительно-заключительное время (0,5–9 ч) [3; 7; 21]. В действительности затраты времени на организацию восстановления агрегатов составляют более 50 % от общего времени и достигают 70 ч [14; 15]. Длительные простои связаны с несвоевременным обеспечением

¹ Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Правительство РФ. Распоряжение от 12 апреля 2020 года № 993-р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564654448> (дата обращения: 14.02.2021).

техники запасными частями вследствие отсутствия развитой структуры технического сервиса [19; 24].

Поэтому ряд исследований посвящен вопросам обоснования оптимального времени простоя комбайнов из-за устранения последствий отказов. При этом учитываются сезонная нагрузка на один комбайн и весомые производственные и природно-климатические факторы [1; 9; 22].

В целом анализ видов и последствий отказов осуществляют с целью обоснования достаточности и эффективности принимаемых решений. При этом обеспечивается снижение вероятности возникновения и тяжести последствий отказов за исключением тех, которые могут привести к значительному ущербу объекта или окружающей среды, гибели или тяжелым травмам механизаторов, срыву выполнения поставленной задачи [4; 11].

Материалы и методы

При вычислении показателей надежности комбайнов (среднее время восстановления), согласно рекомендуемым положениям руководящего документа, предусматриваются следующие этапы: определение плана наблюдений, сбор данных о параметрах надежности, статистическая обработка данных². Для изделий серийного производства доверительная вероятность $q = 0,9$, относительная ошибка $\varepsilon = 0,1$. Для объектов, включающих как восстанавливаемые, так и невосстанавливаемые системы при определении среднего времени восстановления, рекомендуется план наблюдений [NUN], [NMT] или [NMr]. При плане наблюдений [NUN], с учетом доверительной вероятности q , предельной относительной ошибки ε ,

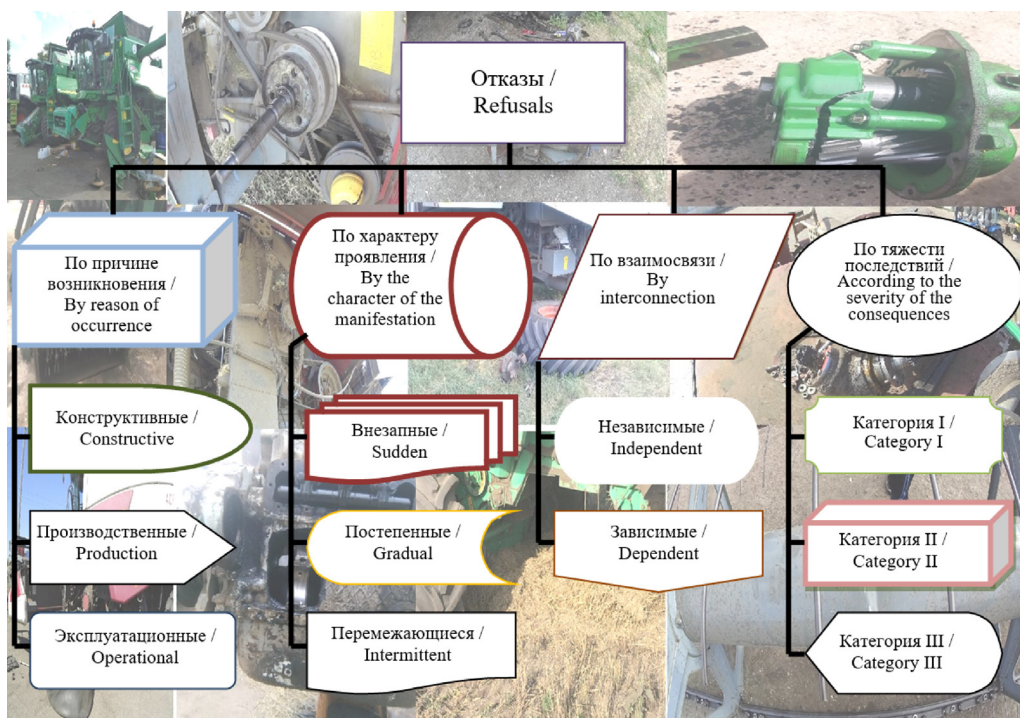
коэффициента вариации V (менее 0,4), вида закона распределения (закон Вейбулла) случайных величин (среднее время восстановления) на основании групп объектов-аналогов и ограниченного объема совокупности ($M = 50$), минимальное количество наблюдений комбайнов каждой марки составит $N = 11$. Для планов наблюдений [NMT] и [NMr] суммарное минимальное количество отказов будет равно 130–250, а общая наработка – суммарной величине гарантийной наработки контрольной группы комбайнов.

Достоверность установления последствий отказов и разработка путей повышения безотказности комбайнов основываются на исследуемой классификации отказов в гарантийный период (рис. 1). Она разработана на базе положений ГОСТа 27.310-95³.

Распределение отказов на конструктивные, производственные и эксплуатационные производилось на основании комплекса международных, межгосударственных, национальных стандартов, стандартов заводов-изготовителей и основных документов в данной области. При этом использовался поэтапный принцип установления причины отказа с созданием экспертных комиссий и использованием современного испытательного или исследовательского оборудования, а именно: I этап – на базе подразделений официальных дилеров, осуществляющих гарантийное обслуживание комбайнов в регионе; II этап – в лабораториях учебно-научно-инновационного центра ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»; III этап – на производственных площадках и испытательных центрах заводов-изготовителей и их филиалов.

² РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035567> (дата обращения: 16.02.2021).

³ ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов. М., 2002.



Р и с. 1. Исследуемая классификация отказов комбайнов в гарантийный период
 F i g. 1. Researched classification of combine failures within the warranty period

В гарантийный период эксплуатации зерноуборочных комбайнов не рассматривались катастрофические отказы (IV категория тяжести последствий отказов) вследствие того, что вероятность их возникновения при данных величинах наработки равна нулю.

Одним из важнейших показателей при устранении последствий отказов является время поиска причины отказа и восстановления узла. Длительность ремонта комбайнов в результате устранения последствий отказа в значительной степени зависит от метода определения местонахождения отказа [7; 9; 20]. Результаты ранее проведенных исследований эксплуатации комбайнов показали, что более 50 % времени в процессе ремонта затрачивается на обнаружение отказа и менее 50 % на устранение последствий отказа [12; 14; 15].

Для сокращения времени поиска местонахождения отказа необходимо, прежде всего, знание особенностей устройства и правил обслуживания и эксплуатации комбайнов [25]. Проведенный анализ баланса использования времени смены при эксплуатации комбайнов показал, что основными путями уменьшения являются следующие: значительное увеличение коэффициента технического использования; уменьшение временных затрат на цикловые технологические обслуживания; сокращение времени на устранение последствий отказов [1; 10; 23].

Среднее время устранения последствий отказов, с учетом категории тяжести для комбайнов, будет определяться суммой составляющих времени на его обнаружение, разборку агрегатов, восстановление деталей,

доставку запасных частей, сборку агрегатов и т. п. Отсюда среднее время устранения последствий отказов для каждой категории определяется по следующей зависимости [7; 24]:

$$t_{\text{ср. п. ш}} = \left(\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n t_{\text{оо}_i} + t_{\text{пн}_i} + t_{\text{с}_j} + t_{\text{д}_j} + t_{\text{дрм}_j} + t_{\text{рм}_j} + t_{\text{y}_j} + t_{\text{p}_j} + t_{\text{п}_j} \right) \right) / N, \quad (1)$$

где $t_{\text{оо}_i}$ – время обнаружения последствий i -го отказа, ч; $t_{\text{пн}_i}$ – время передачи оперативной информации о местонахождении i -го отказа, ч; $t_{\text{с}_j}$ – время демонтажа j -го неисправного агрегата, ч; $t_{\text{д}_j}$ – время доставки запасных частей и материалов для j -го неисправного агрегата, ч; $t_{\text{дрм}_j}$ – время доставки на предприятие технического сервиса j -го неисправного агрегата (вторая и третья категории тяжести последствий отказа), ч; $t_{\text{рм}_j}$ – время восстановления деталей (после отказа) и ремонта агрегата (вторая и третья категории тяжести последствий отказа), ч; t_{y_j} – время установки j -го неисправного агрегата, ч; $t_{\text{п}_j}$ – время регулировки и проверки работоспособного состояния j -го агрегата после ремонта, ч; $t_{\text{п}_j}$ – время доставки j -го агрегата к месту использования по назначению после устранения последствий отказа, ч.

Методика статистической обработки оценочных показателей надежности комбайнов позволяет получить основные характеристики рассматриваемой выборки $A(N)$ с учетом трех категорий тяжести последствий отказов [17].

Некоторая часть отказов объектов исследования в процессе гарантийной эксплуатации может быть связана с конструктивными недоработками. Поэтому для создания точного и современного инструмента решения конструктор-

ских задач в работе используется среда «КОМПАС-3D». Она позволяет создать пространственные геометрические модели деталей сложных конфигураций с последующим компьютерным решением на основе программного обеспечения системы автоматизированного проектирования [26; 27].

Одним из мощных пакетов программ по определению напряженно-деформированного состояния деталей и узлов является ANSYS. В работе проводится исследование некоторых деталей, обеспечивающих надежность агрегатов, с использованием конечно-элементного анализа опасных сечений в блоке программ ANSYS 14.5 [26; 27].

Результаты исследования

В хозяйствах Приволжского федерального округа в период с 2018 по 2020 гг. были проведены исследования по выявлению отказов комбайнов зарубежного и российского производства в гарантийный период.

Всего под наблюдением находились 66 комбайнов трех зарубежных («Десна-Полесье GS12», Claas Lexion 770 и John Deere W650) и трех отечественных (Acros-585, Acros-595 Plus и RSM-161) марок (по 11 каждой модели). Информация об устранении последствий отказов была получена благодаря непрерывному наблюдению за эксплуатацией комбайнов и из документов бухгалтерской отчетности. Основные внешние проявления отказов комбайнов, обнаруженные в период гарантийной эксплуатации, представлены на рисунках 2–5.

В таблицах 1 и 2 представлены основные характеристики отказов комбайнов по категориям тяжести последствий (категория I – отказ с пренебрежительно малыми последствиями, категория II – некритический отказ, категория III – критический отказ)⁴.

⁴ Там же.



a)

b)

Р и с. 2. Внешние проявления отказов комбайнов Claas: а) обрыв цепочно-планчатого транспортера; б) сворачивание валов в шлицевых соединениях

Fig. 2. External manifestations of failures of the Claas combine: a) breakage of the chain-slat conveyor; b) collapse of the shafts in the spline joints



a)

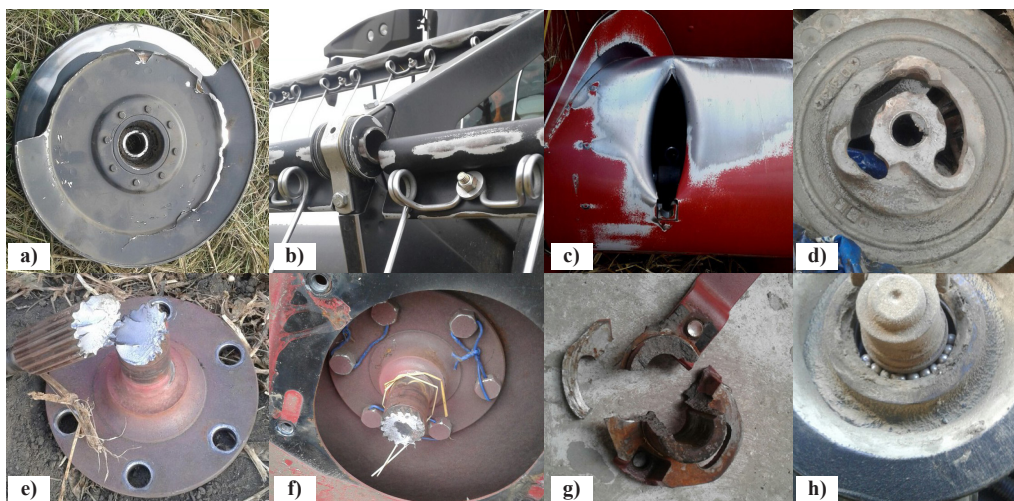
b)

c)

d)

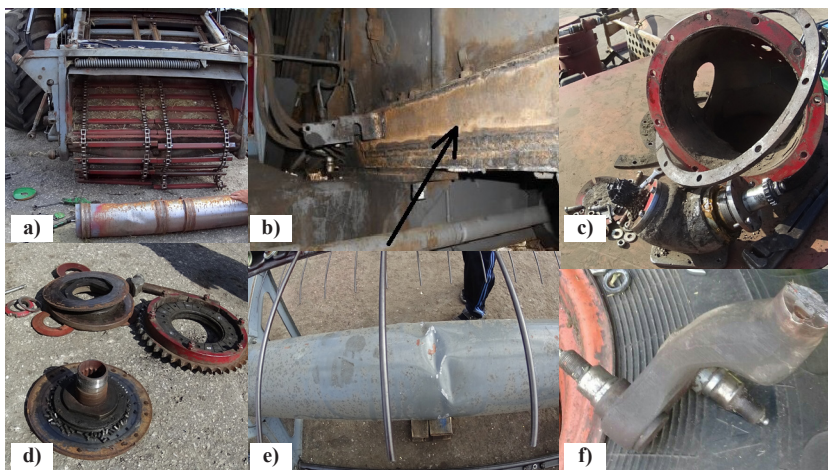
Р и с. 3. Внешние проявления отказов комбайнов John Deere: а) разрушение шкива привода режущего механизма; б) излом крышки КП; в) выход из строя подшипников и излом шнека жатки; д) выход из строя пальцевого механизма и шнека

Fig. 3. External manifestations of failures of the John Deere combine: a) destruction of the cutter drive pulley; b) break in the gearbox cover; c) failure of the bearings and the screw of the header; d) failure of the finger mechanism and the screw



Р и с. 4. Внешние проявления отказов комбайнов Acros-595 Plus: а) разрушение шкива привода режущего механизма; б) излом граблины мотовила; в) выход из строя пальцевого механизма шнека жатки и разрыв шнека; д) излом шкивов привода зерновой группы; е), ф) излом вала шнека жатки в двух проекциях; г) излом рычага регулировки шнека жатки; х) выход из строя подшипников шкива леникса

F i g. 4. External manifestations of failures of the Acros-595 Plus combine а) destruction of the cutter drive pulley; б) fracture tines of the reel; в) the failure of the finger mechanism of the auger of the header, the gap of the screw; д) fracture of the pulleys of the drive grain group; е), ф) fracture of the shaft of the screw headers in two projections; г) a jog lever adjustment screw headers; х) the failure of the bearings of the pulley leniks



Р и с. 5. Внешние проявления отказов комбайнов «Десна-Полесье GS12»: а) излом нижнего вала транспортера наклонной камеры; б) трещина левой стороны рамы молотилки (по стрелке наложенная усиливающая пластина); в) выход из строя редуктора выгрузного шнека; д) выход из строя подшипников предохранительной муфты; е) излом вала мотовила; ф) излом поворотного рычага

F i g. 5. External manifestations of failures of combine Desna-Polesie GS12: а) break of the lower shaft of the inclined chamber conveyor; б) crack on the left side of the thresher frame (in the direction of the arrow, a reinforcing plate applied); в) failure of the discharge screw reducer; д) failure of the bearings of the pre-reinforcing clutch; е) break of the reel shaft; ф) break of the rotary lever

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики отказов комбайнов зарубежного производства
The main characteristics of failures of foreign-made combines

Признак классификации отказа / Failure classification sign	Количество, ед. / Amount, units	Распределение отказов по тяжести последствий, % / Distribution of failures by severity of consequences, %			Доля, % / Share, %
		категория I / category I	категория II / category II	категория III / category III	
Причина возникновения / Causes of failures					
Конструктивная / Constructive	52	57,7	25,0	17,3	28,0
Производственная / Production	28	28,6	53,6	17,8	15,0
Эксплуатационная / Operational	106	53,8	29,2	17,0	57,0
Характер проявления / The nature of the manifestation					
Внезапный / Sudden	158	42,4	37,3	20,3	84,9
Постепенный / Gradual	–	–	–	–	–
Перебегающий / Intermittent	28	100,0	–	–	15,1
Взаимосвязь / Interconnection					
Независимый / Independent	116	53,4	30,2	16,4	62,4
Зависимый / Dependent	70	47,1	34,3	18,6	37,6
Всего	186	51,1	31,7	17,2	100,0

Таблица 2

Table 2

Основные характеристики отказов комбайнов российского производства
Main characteristics of failures of russian-manufactured combines

Признак классификации отказа / Failure classification sign	Количество, ед. / Amount, units	Распределение отказов по тяжести последствий, % / Distribution of failures by severity of consequences, %			Доля, % / Share, %
		категория I / category I	категория II / category II	категория III / category III	
1	2	3	4	5	6
Причина возникновения / Causes of failures					
Конструктивная / Constructive	72	56,9	25,0	18,1	26,7
Производственная / Production	47	29,8	48,9	21,3	17,4
Эксплуатационная / Operational	151	51,6	30,5	17,9	55,9

Окончание таблицы 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6
Характер проявления / The nature of the manifestation					
Внезапный / Sudden	235	41,7	37,0	21,3	87,0
Постепенный / Gradual	–	–	–	–	–
Перемежающийся / Intermittent	35	100,0	–	–	13,0
Взаимосвязь / Interconnection					
Независимый / Independent	181	49,7	32,1	18,2	67,0
Зависимый / Dependent	89	48,3	32,6	19,1	33,0
Всего	270	49,3	32,2	18,5	100,0

Из таблиц 1 и 2 видно, что наибольшее количество отказов комбайнов как зарубежного, так и российского производства связано с эксплуатационными причинами возникновения – 57,0 (55,9) %⁵. Отказы комбайнов носят в основном внезапный характер – 84,9 (87,0) %. При этом примерно две трети от общего количества отказов комбайнов являются независимыми, 62,4 (67,0) %, и одна треть становится причиной возникновения целой цепочки других отказов агрегатов.

Наибольшее число конструктивных отказов комбайнов в гарантийный период относится к первой категории тяжести – 57,7 (56,9) %; производственных – ко второй категории тяжести – 53,6 (48,9) %; эксплуатационных – к первой категории тяжести – 53,8 (51,6) %; внезапных – к первой и второй категориям тяжести – 79,7 (78,7) %; перемежающихся – к первой категории тяжести – 100,0 (100,0) %.

Таким образом, наибольшее число отказов всех видов относится к первой и второй категориям тяжести – 82,8 (81,5) %.

Из таблицы 3 видно, что у комбайнов российского производства доля

отказов от общего их числа составила 59,2 %, а у зарубежных – 40,8 %. Наиболее весомые (по стоимости и продолжительности устранения) отказы третьей категории тяжести составили 17,2 (18,5) % от общего количества.

При этом катастрофических отказов (IV категория тяжести) за период наблюдений не выявлено.

Для проведения полного статистического анализа исследуемой выборки по каждой из трех категорий тяжести последствий отказов использовался пакет программ⁶. Результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 4.

Получены величины коэффициента вариации среднего времени устранения последствий отказов комбайнов каждой категории, а именно: $V_I = 26,88$ (27,03) %; $V_{II} = 28,74$ (22,77) %; $V_{III} = 15,00$ (17,75) %. Полученные значения указывают на однородность исследуемой совокупности, так как полученные величины коэффициентов вариации менее 33 %.

Выявлено, что одной из деталей, имеющих низкую долговечность, является вал шнека жатки РСМ-081.27 (Power Stream 700) (27 % отказов комбайнов российского производства).

⁵ Здесь и далее информация об отечественных комбайнах дается в скобках.

⁶ Статистика. Онлайн калькулятор [Электронный ресурс]. URL: <https://allcalc.ru/node/883> (дата обращения: 16.02.2021).

Таблица 3

Table 3

Количество отказов зерноуборочных комбайнов
Number of failures of grain harvesters

Марки зерноуборочных комбайнов / Grain harvester brands	Общее количество, ед. / Total, units	Распределение отказов по тяжести последствий, ед. / Distribution of failures by severity of consequences, units			Доля отказов, % / Bounce rate, %
		категория I / category I	категория II / category II	категория III / category III	
Зарубежные: все марки / Foreign: all brands	186	95	59	32	40,80
«Десна-Полесье GS12» / Desna-Polesie GS12	82	39	26	17	17,99
Claas Lexion 770	58	30	18	10	12,72
John Deere W650	46	26	15	5	10,09
Российского производства: все марки / Russian-manufactured: all brands	270	133	87	50	59,20
Acros-595 Plus	94	43	29	22	20,61
Acros-585	112	56	35	21	24,56
RSM-161	64	34	23	7	14,03
Всего отказов, ед. (%) / Total bounce rate, units (%)	456 (100)	228 (50)	146 (32)	82 (18)	100,00

Таблица 4

Table 4

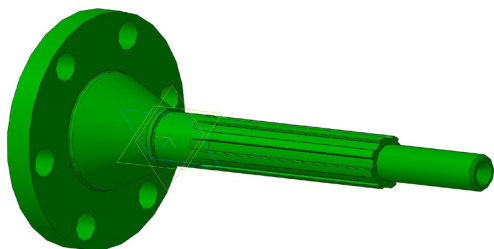
Статистический анализ времени устранения последствий отказов комбайнов
Statistical analysis of the time for troubleshooting the consequences of combine failures

Наименование статистического параметра / Statistical parameter name	Категории тяжести последствий отказов / Failure severity categories					
	I		II		III	
	Зарубежные / Foreign	Российские / Russian	Зарубежные / Foreign	Российские / Russian	Зарубежные / Foreign	Российские / Russian
1	2	3	4	5	6	7
Среднее значение выборки A_{cp} , ч/отказ / Sample mean A_{cp} , h/refusal	20,17	23,83	41,04	46,29	63,70	68,05
Дисперсия выборки σ^2 , ч/отказ / Sample variance σ^2 , h/refusal	29,41	41,50	139,07	111,14	91,26	145,94
Среднеквадратическое отклонение S_B , ч/отказ / Standard deviation S_B , h/refusal	5,42	6,44	11,79	10,54	9,55	12,08

Окончание таблицы 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент вариации v , % / The coefficient of variation v , %	26,88	27,03	28,74	22,77	15,00	17,75
Ошибка среднего значения S_p , ч/отказ / Mean error S_p , h/refusal	0,81	0,93	1,18	1,24	1,56	1,63
Относительная ошибка среднего значения ε , % / The relative error of the mean ε , %	1,76	1,81	2,36	2,42	2,91	3,06
Ошибка среднеквадратического отклонения S_s , ч/отказ / Standard deviation error S_s , h/refusal	0,38	0,40	1,09	0,80	1,19	1,21
Ошибка коэффициента вариации S_v , % / Coefficient of variation error S_v , %	2,02	1,73	2,72	1,77	1,89	1,81
Коэффициент асимметрии A_s / Asymmetry coefficient A_s	-0,74	-1,17	-2,16	-1,13	-1,47	-0,70
Коэффициент эксцесса E_s / Kurtosis coefficient E_s	-1,88	-1,20	-0,19	-0,19	-0,01	-1,51
Среднее квадратическое значение S^2 , ч/отказ / Root mean square S^2 , h/refusal	20,87	24,66	42,62	47,87	64,19	69,06
Среднее гармоническое значение S_R , ч/отказ / Harmonic mean value S_R , h/refusal	19,77	22,69	35,53	44,56	61,49	65,10
Среднее линейное отклонение выборки $S_{\text{лин}}$, ч/отказ / Sample linear deviation $S_{\text{лин}}$, h/refusal	4,83	5,52	8,80	8,03	7,29	10,42
Коэффициент вариации по среднему линейному отклонению $v_{\text{лин}}$, % / Coefficient of variation for the mean linear deviation $v_{\text{лин}}$, %	23,94	23,16	21,44	17,35	11,44	15,31
Размах вариации R , ч/отказ / Swipe variation R , h/refusal	9,00	14,00	18,00	22,00	21,00	24,00
Максимальный элемент выборки B , ч/отказ / Maximum sample unit B , h/refusal	24,00	32,00	54,00	56,00	72,00	82,00
Минимальный элемент выборки C , ч/отказ / Minimum sample unit C , h/refusal	15,00	18,00	36,00	34,00	51,00	60,00

Для исследования напряженно-деформированного состояния вала шнека жатки была создана геометрическая модель в программе «КОМПАС-3D» (рис. 6).

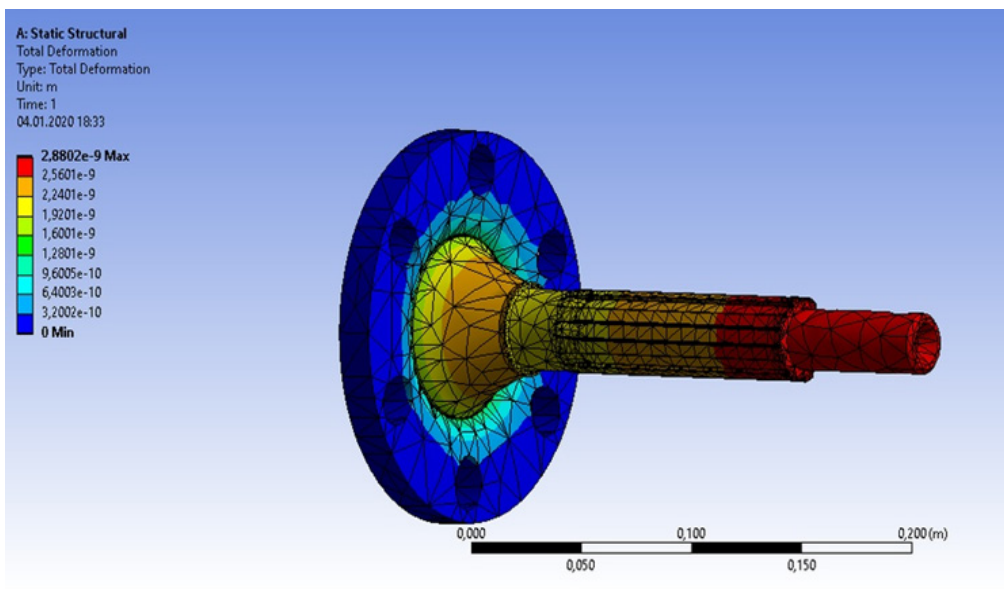
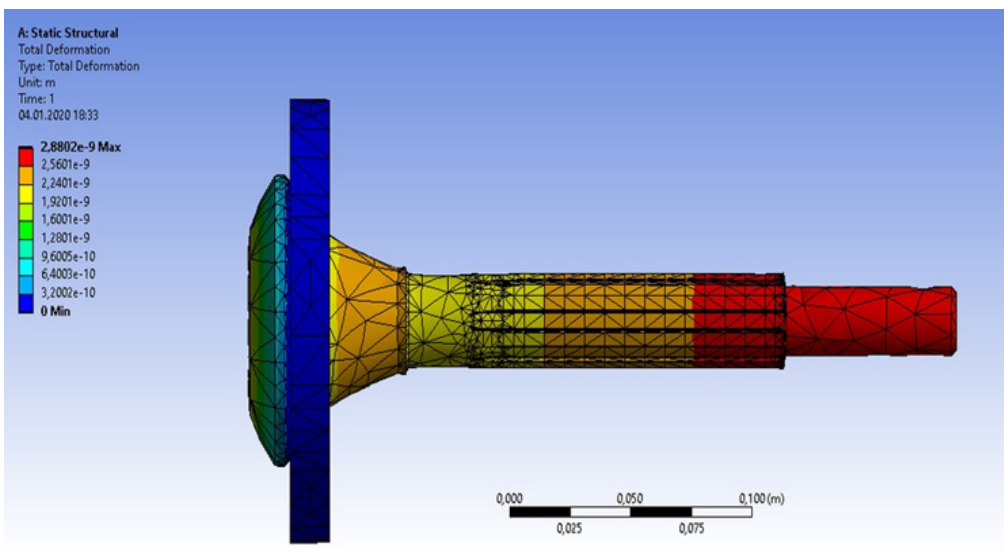


Р и с. 6. Геометрическая модель вала шнека жатки

Fig. 6. Geometric model of the header auger shaft

Данная модель была объединена и использована в блоке программ конечно-элементного анализа ANSYS 14.5. Численная процедура статического анализа проводилась в рамках пакета ANSYS WorkBench. Для расчета напряженно-деформированного состояния вала шнека жатки Power Stream 700 под действием статических нагрузок использовался модуль Static Structural (рис. 7).

На данном этапе расчета были определены механические свойства материала Structural steel (для металлопродукции (круг, материал – сталь 40X), термически обработанной (закалка с отпуском), предел текучести $\sigma_T = 785 \text{ Н/мм}^2$, ударная вязкость KCV^{+20}



Р и с. 7. Распределение напряжений и деформаций в сечениях вала шнека жатки
 F i g. 7. Distribution of stresses and deformations in the sections of the header auger shaft

не менее 111 Дж/см², КСV⁻²⁰ не менее 68 Дж/см², КСУ⁻⁷⁰ не менее 49 Дж/см²), рабочая нагрузка ($M_{Kpmax} = 660 \text{ Н}\cdot\text{м}$), основные параметры детали (масса 3,5 кг,

длина 240 мм, диаметр первой ступени 20 мм, диаметр шлицевой части 35 мм), граничные и начальные условия задачи и требуемая точность расчета⁷.

⁷ ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. М., 2019. 53 с.; Жатка РСМ-081.27. Руководство [Электронный ресурс]. URL: https://zinref.ru/000_uchebniki/04800selskoe_kombaini/003_20_00_zhatka_RSM-081_27_manual_zapchasti/000.htm (дата обращения: 16.02.2021).

С помощью модулей Meshing и ICEM CFD генерировалась сетка конечных элементов. Она представляет собой по большей части гексаэдры. Там, где гексаэдр построить невозможно, были использованы тетраэдры. Сетка имеет два характерных параметра – наибольший и наименьший размеры элементов. В данном случае они равны 0,001 и 0,0006 м соответственно. Сетка конечных элементов состояла из 76 191 компонента. В ходе проведения серии вариативных расчетов исследовано распределение прочностных нагрузок в целевой зоне [26; 27].

В результате расчета в программе ANSYS 14.5 были получены распределения напряжений и деформаций вала шнека жатки, выявлены участки, подвергающиеся максимальной прочностной нагрузке. На рисунке 7 красным цветом показана область максимальной деформации ($2,8802e^{-9}$ м). В этих местах в период гарантийной эксплуатации комбайнов происходило разрушение вала шнека жатки Power Stream 700 (рис. 4е, 4ф).

Обсуждение и заключение

Проведенные трехлетние исследования на предприятиях сельхозпроизводителей Приволжского федерального округа позволили выявить детали и агрегаты, оказывающие наибольшее влияние на надежность и качество работы комбайнов в гарантийный период. При этом были выявлены детали и узлы, выходящие из строя в результате конструктивно-технологических недоработок заводов-изготовителей.

Большая доля отказов комбайнов приходится на агрегаты российского производства – 59,2 %; на зарубежные – 40,8 %. При этом отказы третьей категории тяжести составляют 17,2 (18,5) % от общего количества отказов.

Большинство отказов комбайнов связано с эксплуатационными причинами – 57,0 (55,9) %. Признак проявления отказов комбайнов носит в основном внезапный характер – 84,9 (87,0) %. При этом примерно две трети от общего количества отказов комбайнов являются независимыми – 62,4 (67,0) %.

По результатам статистической обработки отказов, с учетом категорий тяжести, получены значения среднего времени устранения последствий отказов комбайнов: $t_{\text{срI}} = 20,17$ (23,83) ч, $t_{\text{срII}} = 41,04$ (46,29) ч, $t_{\text{срIII}} = 63,70$ (68,05) ч. Значительная продолжительность устранения отказов всех категорий тяжести свидетельствует о низком уровне организации технического сервиса комбайнов и отсутствии развитой сети современных сервисных предприятий.

Большое количество отказов (27 % от общего числа отказов комбайнов российского производства) по причине излома вала шнека жатки РСМ-081.27 (Power Stream 700) требует проведения срочных конструктивно-технологических мероприятий (по совершенствованию устройства регулировки муфты шнека, по изменению размеров вала в опасных сечениях, по замене конструкционного материала или совершенствованию технологии изготовления вала) на заводе-изготовителе.

Поэтому в дальнейшем необходимо рассмотреть вопросы оптимального размещения сети предприятий по оказанию широкой номенклатуры сервисных услуг в Приволжском федеральном округе, совершенствования организации технического сервиса и расширения прямых связей с заводами-изготовителями техники с целью быстрого реагирования и принятия конструктивно-технологических решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Шепелёв, С. Д.** Обоснование времени простоя для устранения последствий технического отказа / С. Д. Шепелёв, Ю. Б. Черкасов, В. Д. Шепелёв // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 5. – С. 45–51. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_5/content/8.pdf (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
2. Analysis and Forecast of Performance Characteristics of Combine Harvesters / V. Zubko, H. Roubik, O. Zamora, T. Khvorost. – DOI 10.15159/AR.18.212 // Agronomy Research. – 2018. – Vol. 16, Issue 5. – Pp. 2282–2302. – URL: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4538> (дата обращения: 14.02.2021).
3. **Королев, А. Е.** Сравнительная безотказность зерноуборочных комбайнов / А. Е. Королев // NovaUm.Ru. – 2019. – № 17. – С. 26–28. – URL: <http://novaum.ru/wp-content/uploads/2019/03/Выпуск-17.pdf> (дата обращения: 14.02.2021).
4. **Смелик, В. А.** Оценки технической и технологической надежности зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов / В. А. Смелик, Ф. А. Киприянов, А. Н. Водолазко // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – Вып. 41, № 1. – С. 49–55. – URL: <https://maaor.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-41-tom-1.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
5. **Беломестных, В. А.** Надежность зерноуборочных комбайнов ACROS-580 при эксплуатации в условиях Иркутской области / В. А. Беломестных, В. М. Перевалов, Л. В. Лосев // Вестник ИрГСХА. – 2017. – № 79. – С. 139–144. – URL: <http://www.igsha.ru/science/files/v79.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
6. **Беломестных, В. А.** Оценка надежности элементов зерноуборочного комбайна «Вектор 410» при эксплуатации в гарантийный период / В. А. Беломестных, П. И. Ильин, Д. М. Рожков // Вестник ИрГСХА. – 2017. – № 80. – С. 61–68. – URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v80.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
7. Исследование возникающих отказов между основными системами зерноуборочных комбайнов и времени их устранения / А. Т. Лебедев, Р. В. Павлюк, А. В. Захарин, П. А. Лебедев // Технический сервис машин. – 2019. – № 3. – С. 33–39. – URL: <http://vimtsm.ru/?p=234> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
8. **Крюкова, Н. С.** Оценка надежности систем зерноуборочных комбайнов / Н. С. Крюкова, В. Н. Острецов. – DOI 10.34286/1995-4646-2020-70-1-22-28 // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 1. – С. 22–28. – URL: <http://www.tite-journal.com/content/2020/vypusk-no1/#с12436> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
9. **Субочев, С. В.** Влияние основных показателей надежности на эффективность зерноуборочных комбайнов / С. В. Субочев, А. Е. Немцев, И. В. Коптева // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2014. – Т. 2, № 31. – С. 157–164. – URL: <https://vestngau.elpub.ru/jour/article/view/245/62#> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
10. **Ерохин, Г. Н.** О надежности работы современных зерноуборочных комбайнов / Г. Н. Ерохин, С. Н. Сазонов, В. В. Коновский // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2013. – № 6. – С. 59–63. – URL: http://www.mgau.ru/science/journal/PDF_files/6-2013.pdf (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
11. **Шепелёв, С. Д.** Влияние срока службы и сезонной наработки на показатели эксплуатационной надежности зерноуборочных комбайнов / С. Д. Шепелёв, А. М. Плаксин, Ю. Б. Черкасов // АПК России. – 2016. – Т. 75, № 1. – С. 122–126. – URL: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/dc9/apk-75.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
12. **Комаров, В. А.** Исследование процесса постановки на хранение комбайновой и самоходной техники в региональном агропромышленном комплексе / В. А. Комаров, Е. А. Нуязин, М. И. Курашкин. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-5-32-36 // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 5. – С. 32–36. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-263-6> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
13. **Комаров, В. А.** Хранение сложной сельскохозяйственной техники в Мордовии / В. А. Комаров, Е. А. Нуязин, М. И. Курашкин // Сельский механизатор. – 2019. – № 9. – С. 38–40. – URL: <http://selmech.msk.ru/919.html> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.

14. **Комаров, В. А.** Исследование отказов комбайнов «ACROS-595» в гарантийный период / В. А. Комаров, М. И. Курашкин // Сельский механизатор. – 2018. – № 6. – С. 38–39. – URL: <http://selmech.msk.ru/618.html> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
15. **Комаров, В. А.** Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия) / В. А. Комаров. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.222-238 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 222–238. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/60-18-2/405-10-15507-0236-2910-028-201802-7> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
16. **Комаров, В. А.** Исследование генеральных планов предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе / В. А. Комаров, В. В. Салмин, М. И. Курашкин. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201904.560-577 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 560–577. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/739-10-15507-0236-2910-029-201904-6> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
17. **Shepelev, S.** Differentiation of the Seasonal Loading of Combine Harvester Depending on Its Technical Readiness / S. Shepelev, V. Shepelev, Yu. Cherkasov. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.026 // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 161–165. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039107#ep-article-footnote-id2> (дата обращения: 14.02.2021).
18. **Pristavka, M.** Reliability Monitoring of Grain Harvester / M. Pristavka, K. Kristof, P. Findura // Agronomy Research. – 2017. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 817–829. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Koloman_Kristof/publication/317304867_Reliability_monitoring_of_grain_harvester/links/593138640f7e9bee76dec1c/Reliability-monitoring-of-grain-harvester.pdf (дата обращения: 16.02.2021).
19. **Егоров, А. В.** Оценка показателей надежности силовой передачи зерноуборочного комбайна John Deere 9600 / А. В. Егоров, Е. В. Зубова, В. В. Вахрушев // АПК России. – 2015. – Т. 73. – С. 41–48. – URL: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/87c/apk-73.pdf> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.
20. **Крупин, А. Е.** Расчет показателей надежности зерноуборочных комбайнов ДОН-1500Б / А. Е. Крупин, Е. А. Лисунов, А. А. Калашов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 2 (81). – С. 42–53. – URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1601 (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.
21. **Чепурин, Г. Е.** Принцип идентичности условий при зональных испытаниях зерноуборочных комбайнов / Г. Е. Чепурин. – DOI 10.26898/0370-8799-2020-3-9 // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 83–93. – URL: <https://sibvest.elpub.ru/jour/article/view/687> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
22. **Ломакин, С. Г.** Анализ технического уровня зерноуборочных комбайнов «Ростсельмаш» / С. Г. Ломакин, В. Е. Бердышев // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2017. – № 6 (82). – С. 34–42. – URL: <https://clck.ru/UAjXC> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.
23. **Шепелев, С. Д.** Коэффициент простоя зерноуборочных комбайнов как комплексный показатель технических отказов / С. Д. Шепелев, Ю. Б. Черкасов // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 7. – С. 52–57. – URL: <http://avu.usaca.ru/media/BAhbBlsHOGZmSSIoMjAxNy8xMS8xNS8xNF8zMF81NI83MDJfX19fMjAxNy5wZGYGOgZFVA> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
24. The Reliability Analysis of Combined Harvesters in the Usual Conditions of Operation / R. V. Pavlyuk, A. T. Lebedev, Y. I. Zhevora, E. V. Zubenko. – DOI 10.1088/1755-1315/488/1/012033. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 488. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012033> (дата обращения: 14.02.2021).
25. The Experimental Research of Combine Harvesters / L. Špokas, V. Adamčuk, V. Bulgakov, L. Nozdrovický. – DOI 10.17221/16/2015-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2016. – Vol. 62, Issue 3. – Pp. 106–112. – URL: <https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?volume=62&firstPage=106&type=publishedArticle> (дата обращения: 16.02.2021).
26. **Ткачев, Д. А.** Импорт твердотельной модели из CAD-системы КОМПАС-3D в САЕ-систему ANSYS / Д. А. Ткачев, К. Ю. Труханов, М. И. Шаталов. – Текст : электронный // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – № 4. – URL: <http://nto-journal.ru/search/keywords/1392/> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.

27. Аббасов, А. Э. Конвертирование трехмерных компьютерных геометрических моделей для оптимизации параметров моделируемых устройств / А. Э. Аббасов. – DOI 10.20537/2076-7633-2015-7-1-81-91 // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 81–91. – URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2231/> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.

Поступила 02.03.2021; одобрена после рецензирования 01.04.2021; принята к публикации 12.04.2021

Об авторах:

Комаров Владимир Александрович, профессор кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: G-8673-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, komarov.v.a2010@mail.ru

Курашкин Михаил Иванович, аспирант кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), Researcher ID: B-1295-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, mishakurashkin@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Комаров – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ.

М. И. Курашкин – подготовка начального варианта статьи, проведение мониторинга надежности зерноуборочных комбайнов, обработка результатов исследований, визуализация.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shepelyov S.D., Cherkasov Yu.B., Shepelyov V.D. The Justification of Idle Time for Elimination of Consequences of Combine Harvesters Technical Failure. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KrasGAU. 2017; (5):45-51. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_5/content/8.pdf (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Zubko V., Roubik H., Zamora O., Khvorost T. Analysis and Forecast of Performance Characteristics of Combine Harvesters. *Agronomy Research*. 2018; 16(5):2282-2302. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.18.212>

3. Korolev A.Ye. [Comparative Reliability of Grain Harvesters]. *NovaUm.Ru*. 2019; (17):26-28. Available at: <http://novaum.ru/wp-content/uploads/2019/03/Выпуск-17.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ.)

4. Smilik V.A., Kipriyanov F.A., Vodolasko A.N. Assessments of Technical and Technological Reliability of Combine Harvesters and Self-Propelled Foragers. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya* = News of the International Academy of Public Education. 2018; 41(1):49-55. Available at: <https://maaurus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-41-tom-1.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

5. Belomestnykh V.A., Perevalov V.M., Losev L.V. Reliability of Grain Combine Harvesters ACROS 580 at Operation under the Conditions of Irkutsk Region. *Vestnik IrGSHA*. 2017; (79):139-144. Available at: <http://www.igsha.ru/science/files/v79.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Belomestnykh V.A., Ilyin P.I., Rozhkov D.M. Assessment of the Reliability of Grain Corner Elements Combine “Vector 410” at Operation in the Garntian Period. *Vestnik IrGSHA*. 2017; (80):61-68. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v80.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Lebedev A.T., Pavlyuk R.V., Zakharin A.V., Lebedev P.A. Research of the Emerging Failures and the Time of Their Elimination Between the Main Systems of Grain Harvesting Combines. *Tekhnicheskiiy*

servis mashin = Technical Service of Machines. 2019; (3):33-39. Available at: <http://vimtsm.ru/?p=234> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

8. Kryukova N.S., Ostretsov V.N. Grain Combine Reliability Assessment Systems. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2020; (1):22-28. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2020-70-1-22-28>

9. Subochev S.V., Nemtsev A.Ye., Kopteva I.V. The Influence of Basic Indexes of Reliability on the Efficiency of Grain Harvesters. *Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet)* = Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2014; 2(31):157-164. Available at: <https://vestngau.elpub.ru/jour/article/view/245/62#> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

10. Erokhin G.N., Sazonov S.N., Konovsky V.V. On the Reliability of Modern Combine Harvester. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Michurin State Agrarian University Bulletin. 2013; (6):59-63. Available at: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/6-2013.pdf (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

11. Shepelev S.D., Plaksin A.M., Cherkasov Yu.B. Service Life and Seasonal Loading Influencing the Indicators of Operational Reliability of Combine Harvesters. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2016; 75(1):122-126. Available at: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/dc9/apk-75.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Komarov V.A., Nuyanzin E.A., Kurashkin M.I. Study of the Process of Putting into Storage of Combine and Self-Propelled Machinery in the Regional Agribusiness. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (5):32-36. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-5-32-36>

13. Komarov V.A., Nuyanzin Ye.A., Kurashkin M.I. Storage of Complex Agricultural Machinery in Mordovia. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (9):38-40. Available at: <http://selmech.msk.ru/919.html> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

14. Komarov V.A., Kurashkin M.I. [Study of Failures of Acros-595 Harvesters during the Warranty Period]. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2018; (6):38-39. Available at: <http://selmech.msk.ru/618.html> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Komarov V.A. Research of Technical Service Enterprises for Promoting Equipment Reliability (Case Study of Agro-Industrial Complex of the Republic of Mordovia). *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):222-238. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>

16. Komarov V.A., Salmin V.V., Kurashkin M.I. Study of Master Plans of Technical Service Enterprises in Agricultural Sector. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):560-577. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.560-577>

17. Shepelev S., Shepelev V., Cherkasov Yu. Differentiation of the Seasonal Loading of Combine Harvester Depending on Its Technical Readiness. *Procedia Engineering*. 2015; 129:161-165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.026>

18. Pristavka M., Kristof K., Findura P. Reliability Monitoring of Grain Harvester. *Agronomy Research*. 2017; 15(3):817-829. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Koloman_Kristof/publication/317304867_Reliability_monitoring_of_grain_harvester/links/593138640f7e9beec76dec1c/Reliability-monitoring-of-grain-harvester.pdf (accessed 16.02.2021). (In Eng.)

19. Egorov A.V., Zubova E.V., Vakhrushev V.V. Assessing the Power Transmission Reliability Indicators of a John Deere 9600 Combine Harvester. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2015; 73:41-48. Available at: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/87c/apk-73.pdf> (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

20. Krupin A.Ye., Lisunov Ye.A., Kalashov A.A. The Reliability Analysis of Combine Harvester Don-1500 B. *Vestnik NGIEI* = Bulletin NGIEI. 2018; (2):42-53. Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1601 (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

21. Chepurin G.E. The Principle of Identity of Conditions for Zonal Tests of Grain Harvesters. *Sibirskiy vestnik selskokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2020; 50(3):83-93. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-3-9> (accessed 14.02.2021).

22. Lomakin S.G., Berdyshev V.Ye. Assessing Technical Performance Level of Russian “Rostselmash” Combines. *Vestnik FGOU VPO “Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina”* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2017; (6):34-42. Available at: <https://clck.ru/UAJXC> (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Shepelev S.D., Cherkasov Yu.B. Idle Time Coefficient of Grain Collectors as an Integrated Indicator of Technical Failure. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Ural. 2017; (7):52-57. Available at: <http://avu.usaca.ru/media/BAhbBlsHOGZmSSIoMjAxNy8xMS8xNS8xNF8zMF81NI83M-DJfX19fMjAxNy5wZGYGOgZFVA> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Pavlyuk R.V., Lebedev A.T., Zhevora Y.I., Zubenko E.V. The Reliability Analysis of Combined Harvesters in the Usual Conditions of Operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 488. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012033>
25. Špokas L., Adamčuk V., Bulgakov V., Nozdrovický L. The Experimental Research of Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2016; 62(3):106-112. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/16/2015-RAE>
26. Tkachev D.A., Trukhanov K.Yu., Shatalov M.I. Import of a Solid Model from the Compas-3D CAD-System to an ANSYS CAE-System. *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie* = Electronic Journal: Science, Technology, and Education. 2017; (4). Available at: <http://nto-journal.ru/search/keywords/1392/> (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Abbasov A.E. Converting Three-Dimensional Computer Geometric Models for Optimization of Simulated Devices’ Parameters. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* = Computer Research and Modeling. 2015; 7(2):81-91. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-81-91>

Received 02.03.2021; approved after reviewing 01.04.2021; accepted for publication 12.04.2021

About the authors:

Vladimir A. Komarov, Professor of the Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: G-8673-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, komarov.v.a2010@mail.ru

Mihail I. Kurashkin, Postgraduate Student of the Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Researcher ID: B-1295-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, mishakurashkin@gmail.com

Contribution of the authors:

V. A. Komarov – scientific guidance, formulating the main directions of the study, developing the theoretical background, finalizing the text, drawing general conclusions and literary analysis.

M. I. Kurashkin – preparing the initial version of the article, monitoring the reliability of combine harvesters, processing the study results, visualization.

All authors have read and approved the final manuscript.