

## МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ УБОРКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Д. А. Домуши<sup>1</sup>, П. И. Осадчук<sup>2</sup>, А. Д. Устюянов<sup>1</sup>,  
А.С. Лисенко<sup>1</sup>, Ю. И. Енакиев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Одесский Государственный Аграрный Университет, Украина

<sup>2</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина

<sup>3</sup> Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений, имени  
Н. Пушкарова, ССА, София, Болгария  
d.domuschi@ukr.net

### Резюме

Обоснована модель определения состава и структуры сложных технологических комплексов, таких как уборочно-транспортных, для зерновых колосовых культур через условия эксплуатации, учитывая их вероятный характер, и основные факторы, регламентирующие работу уборочных и транспортных машин. Представлена оценка влияния факторов эксплуатации техники на изменение показателей использования не только отдельных комбайнов и транспортных агрегатов, но и всего технологического комплекса.

**Ключевые слова:** модель, оптимизация, зерноуборочный комбайн, эксплуатация.

## MODEL FOR OPTIMIZING THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR HARVESTING GRAINS

D. A. Domushchi\*<sup>1</sup>, P. I. Osadchuk<sup>2</sup>, A. D. Ustuyanov<sup>1</sup>,  
A. S. Lysenko<sup>1</sup>, Y. I. Enakiev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Odesa State Agrarian University, Ukraine

<sup>2</sup>Odesa National Academy of Food Technologies, Ukraine

<sup>3</sup>Nikola Poushkarov Institute of Soil Science, Agrotechnologies and Plant Protection,  
Agricultural Academy  
d.domuschi@ukr.net

### Abstract

A model for determining the composition and structure of complex technological complexes, such as harvesting and transport, for cereal crops through the operating conditions, taking into account their probable nature, and the main factors regulating the operation of harvesting and transport machines has been substantiated. An assessment of the influence of the factors of operation of equipment on the change in the indicators of the use of not only individual combines and transport units, but also the entire technological complex is presented.

**Key words:** model, optimization, combine harvester, operation.

## **Введение**

Большие проблемы стоят перед работниками сельского хозяйства на последнем этапе производства сельскохозяйственной продукции – уборке урожая, особенно, уборке зерновых культур (Сидорчук и др., 2011). Для уборки всего выращенного урожая и уменьшения потерь, уборку необходимо проводить в сжатые агротехнические сроки. Достичь этого можно с помощью рациональной организации уборочных работ применительно к природным и производственным особенностям данной зоны (Домущи и Енакиев, 2019).

Продолжительность уборки зависит от наличия и состояния уборочной техники, транспортных средств (ТС), организации работы уборочно-транспортных комплексов (УТК), погодных условий и других факторов (Домущи и др., 2019).

## **Материалы и методы**

Цель исследования: разработка теоретической модели для оптимизации структуры и состава сложных технологических систем уборки зерновых культур. Уборочно-транспортный комплекс можно рассматривать как сложную систему  $S$ , состоящую из большого числа элементов (агрегатов-комбайнов и транспортных средств)  $N$ , каждый из которых случайным образом может переходить из состояния в состояние под действием случайных потоков с интенсивностями, произвольно зависящими от времени. Такой процесс, происходящий в системе, будем называть Марковским (Вентцель, 1972).

Процессы организации использования технических средств характеризуются случайностью и сложностью. Для исследования сложных систем используется специальный метод-системный анализ (подход). Изучение уборочного процесса предполагает разработку модели, которая позволяет учесть основные факторы, влияющие на развитие данного процесса, установить их взаимодействие и обнаружить механизм управления данным процессом (Domuschiandetc., 2019).

Исходя из этого состав и структуру комплекса, с учетом пребывания уборочных машин в различных состояниях в период уборки, определим по теории цепей Маркова и динамики средних (Скорыходов, 1990). Работающий ЗУК в любой момент времени может находиться в одном из « $n$ » возможных состояний, а состояние комплекса в каждый момент времени можно характеризовать числом ЗУК, находящихся в каждом из состояний (Домущи и др., 2020).

Анализ показал, что в расчетную модель следует включить определенное количество состояний ЗУК. Это такие состояния, как (рис. 1, а):

$S_1^0$  – комбайн работает в загоне;

$S_2^0$  – простои комбайна из-за технического отказа;

$S_3^0$  – комбайн совершает повороты;

$S_4^0$  – нахождение комбайна в состоянии технологического обслуживания;

$S_5^0$  – простои комбайна из-за технологического отказа;

$S_6^0$  – комбайн совершает технологические переезды.

Комбайны, находящиеся в состояниях  $S_3$ ,  $S_5$  и  $S_6$  обслуживаются эксплуатационным персоналом (самообслуживание) (Домущи и др., 2017).

Взаимодействие основного звена с системами устранения технических отказов и технологического обслуживания во многом определяют показатели работы комплекса. Функционирование происходит следующим образом: комбайны, составляющие основное звено, вырабатывают поток заявок на технологическое обслуживание и одновременно потоки неисправностей. Транспортные средства

обслуживают поступающие заявки на технологическое обслуживание и создают потоки неисправностей (Domuschi and Ustuyanov, 2020).

Поступающие заявки на устранение неисправностей обслуживаются системами ремонтно-обслуживающей базы (РОБ) по группам сложности отказов.

Обозначим  $X_k(t)$  – число комбайнов, находящихся в момент  $t$  в состоянии  $k$ . Тогда для любого момента  $t$  сумма численностей равна общей численности комбайнов:

$$x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_n(t) = \sum_{k=1}^n x_k(t) = N \quad (1)$$

Поскольку  $X_k(t)$  для любого  $t$  является величиной случайной, ее надо характеризовать математическим ожиданием и дисперсией:

$$\begin{aligned} m_k(t) &= M [X_k(t)], \\ D_k(t) &= D[X_k(t)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Для нахождения этих характеристик надо знать интенсивности потоков событий, переводящих комбайн (или транспортное средство) из состояния в состояние. Эти интенсивности определяются при проведении хронометражных наблюдений (Мочуляк и др., 2020).

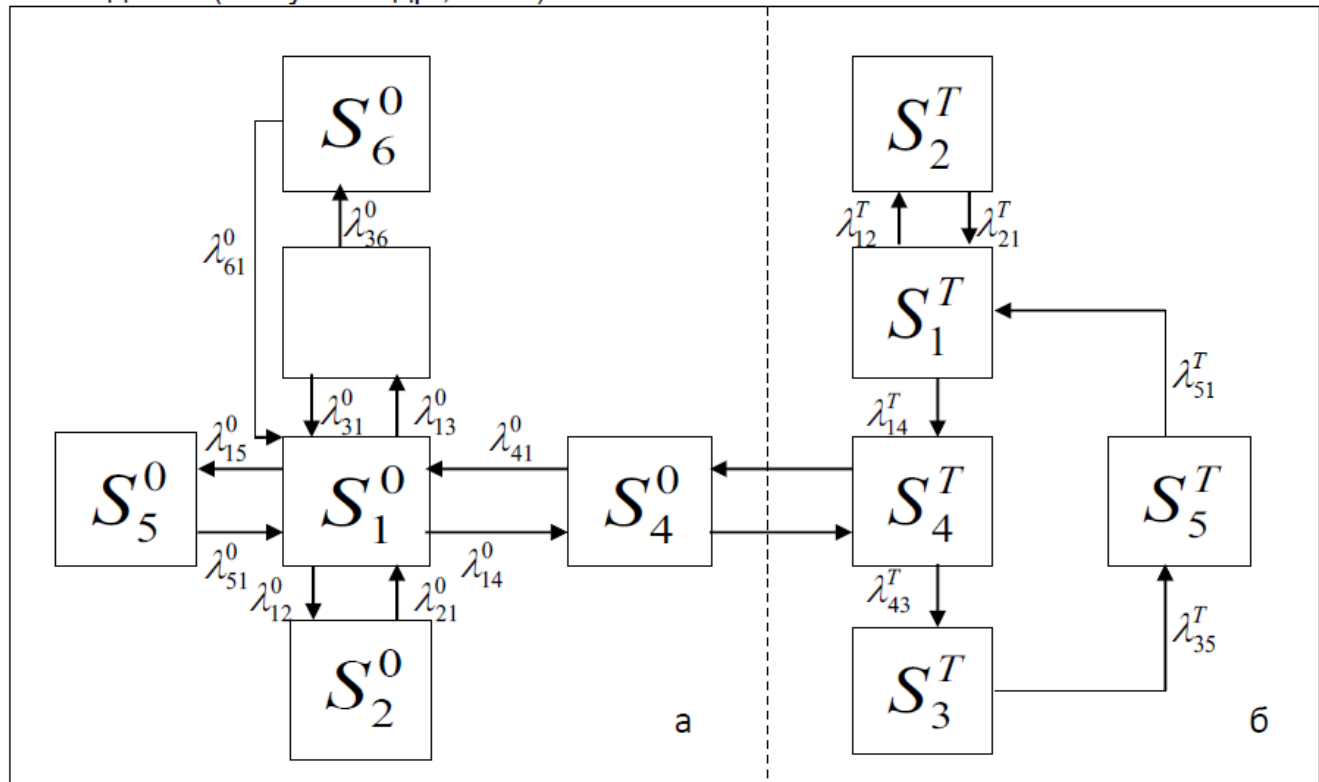


Рис.1. Граф состояния УТК: а) подграф состояний комбайнов; б) подграф состояний транспортных средств

Численность каждого состояния  $X_k(t)$  представим, как сумму случайных величин:

$$x_k^i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если агрегат в состоянии } k, \\ 0, & \text{если нет состояния } k. \end{cases} \quad (4)$$

Тогда для любого момента  $t$  общая численность состояний « $k$ » равна сумме случайных величин:

$$x_k(t) = x_k^1(t) + x_k^2(t) + \dots + x_k^N(t) = \sum_{i=1}^N x_k^i(t) \quad (5)$$

При известных интенсивностях  $\lambda_{ij}$  потоков событий по теореме сложения математических ожиданий и дисперсий (Вентцель, 1972) будем иметь:

$$m_x(t) = \sum_{i=1}^N M[x_k^i(t)], \quad D_x(t) = \sum_{i=1}^N D[x_k^i(t)]. \quad (6)$$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, заданная уравнением (4) имеет два возможных значения: 0 и 1.

Очевидно, что вероятность пребывания агрегата в состоянии  $K=P_k(t)$ , а противоположного события  $1-P_k(t)$ . Тогда ряд распределения каждой из случайных величин имеет один и тот же вид:

$$0 = 1 - P_k(t);$$

$$1 = P_k(t) \quad (7)$$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, выраженной рядом (7), будет:

$$M[x_k^i(t)] = 0(1 - P_k(t)) + 1P_k(t) = P_k(t),$$

$$D[x_k^i(t)] = (0 - P_k(t))^2(1 - P_k(t)) + (1 - P_k(t))^2 P_k(t) = P_k(t)(1 - P_k(t)).$$

С учетом выражения (6):

$$m_x(t) = NP_k(t),$$

$$D_x(t) = NP_k(t)(1 - P_k(t)) \quad (8)$$

$$\sigma_x(t) = \sqrt{NP_k(t)(1 - P_k(t))}.$$

Эти зависимости использовались при оптимизации структуры и состава техники сложных технических и технологических систем на уборке зерновых колосовых культур (Domuschi and Osadchuk, 2020).

### Результаты и обсуждение

При работе УТК комбайны и транспортные средства взаимодействуют между собой и могут находиться в одном из состояний (см. рис. 1). Интенсивности переходов из одного состояния в другое –  $\lambda_{ij}$  можно определить, используя общую зависимость:

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{t_{ij}} \quad (9)$$

В ряде случаев интенсивности переходов из состояния  $S_j$  в состояние  $S_i$  зависят от численности агрегатов, находящихся в состоянии  $S_i$ . Для этих случаев введем функции  $R(x)$  и  $\rho(x)$ :

$$R(x) = \begin{cases} x & \text{при } x \leq 1 \\ 1 & \text{при } x > 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \leq 1 \\ \frac{1}{x} & \text{при } x > 1 \end{cases} \quad (11)$$

Интенсивность потока заявок на технологическое обслуживание –  $\lambda_{14}$  определяется зависимостью:

$$\lambda_{14} = \frac{B_P V U}{V_o \gamma k_3} R^\circ(x). \quad (12)$$

Интенсивность технологического обслуживания зависит от численности комбайнов и транспортных средств, находящихся в зоне обслуживания ( $x_4^0, x_4^\pi$ ):  $\lambda_{41} = f(x_4^0, x_4^\pi)$ . Каждое транспортное средство, за одно пребывание в  $S_4$  может обслужить « $m_o$ » комбайнов, обслужив одно оно переезжает к другому и так до тех пор, пока не будут исчерпаны его возможности.

$$m_o = \frac{V_{mc}}{V_o}, \quad (13)$$

где  $V_{mc}$  – объем кузова транспортного средства, м<sup>3</sup>;  
 $V_o$  – объем бункера комбайна, м<sup>3</sup>.

Интенсивность потока технологических обслуживаний вначале будет увеличиваться пропорционально транспортно-обслуживающих агрегатов, находящихся в зоне обслуживания, затем станет постоянной, равной  $\lambda_{41} x_4^\pi$ .

Средняя интенсивность потока, приходящаяся на один комбайн, будет равна:

$$\lambda_{41}^o = \begin{cases} \lambda_{41}^0 & \text{при } x_4^0 < x_4^\pi \\ \frac{\lambda_{41}^0 x_4^\pi}{x_4^0} & \text{при } x_4^\pi m_o > x_4^0 > x_4^\pi \end{cases} \quad (14)$$

Частота требований на поворот зависит от длины гона –  $L_p$ , м и рабочей скорости комбайна –  $V_p$ , км/ч:

$$\lambda_{13}^o = \frac{V_p}{L_p} \cdot R(x_1^0). \quad (15)$$

Интенсивность поворотов обратно пропорциональна времени поворота  $t_n$ , ч:

$$\lambda_{31}^o = \frac{1}{t_n}. \quad (16)$$

Частота заявок на устранение технологических отказов –  $\lambda_{15}$  может быть определена как отношение рабочей скорости к пути комбайна, проходимому между технологическими отказами  $L_{TO}$ , м:

$$\lambda_{15}^o = \frac{V_p}{L_{TO}} R(x_1^0). \quad (17)$$

Интенсивность устранения технологических отказов обратно пропорционально среднему времени устранения технологических отказов –  $t_{yo}$ , ч:

$$\lambda_{51}^o = \frac{1}{t_{yo}}. \quad (18)$$

Частота требований на технологический переезд зависит от производительности комбайна, площади и конфигурации полей и определяется как:

$$\lambda_{36}^o = \frac{W}{F} R(x_1^0) \quad (19)$$

Частота технологических переездов определяется из зависимости:

$$\lambda_{61}^o = \frac{1}{t_{mn}}, \quad (20)$$

где  $t_{mn}$  – среднее время технологического переезда с учетом переналадки комбайна.

Уборочно-транспортный комплекс также содержит транспортные агрегаты, которые взаимодействуют с технологическими агрегатами – ЗУК и влияют на динамику состояний. Транспортные агрегаты, так же как ЗУК, имеют дискретные состояния (рис. 1,б). Рассмотрим их подробнее:

$S_1^T$  – транспортное средство (ТС) совершает рейс без груза;

$S_2^T$  – простои ТС из-за технического отказа;

$S_3^T$  – транспортное средство совершает рейс с грузом;

$S_4^T$  – нахождение ТС в состоянии технологического обслуживания;

$S_4^m, S_4'^m$  – состояние ТС при технологическом обслуживании его несколькими комбайнами поочередно до полного удовлетворения его возможностей (емкость кузова);

$S_5^T$  – простои ТС из-за разгрузки.

Аналогично, с учетом средней численности состояний, определим интенсивности переходов транспортно-обслуживающих агрегатов.

Интенсивность доставки зерна на склад определяем из выражения:

$$\lambda_{35}^T = \frac{V_P^T}{L_{II}} \quad (21)$$

где  $V_P^T$  – рабочая скорость транспортного средства при движении с грузом, км/ч;

$L_{II}$  – расстояние перевозки зерна, м.

Интенсивность перевода транспортных средств из состояний  $S_4^T$  в  $S_3^T$  получим из выражения:

$$\lambda_{43}^T = \frac{\lambda_{41}^0(x_4^0)}{m_0 x_4^T} \quad \text{ИЛИ} \quad \lambda_{43}^T(m_4^T) = \frac{\lambda_{41}^0 m_4^0}{m_0} \quad (22)$$

Транспортное средство обслуживает ЗУК с интенсивностью:

$$\lambda_{14}^T = \frac{1}{t_{бг} + t_{ож}} \quad (23)$$

где  $t_{бг}$  – время движения без груза, ч;

$t_{ож}$  – время ожидания технологического обслуживания, ч.

Интенсивность обслуживания транспортных средств, в зоне разгрузки, можно определить из выражения:

$$\lambda_{51}^T = \frac{W_{II} (1 - K_{II})}{V_{mc} \gamma K_3} \quad (24)$$

где  $W_{II}$  – производительность разгрузочных средств, т/ч.;

$K_{II}$  – к-т простоя разгрузочных средств;

$V_{mc}$  – вместимость кузова, м<sup>3</sup>.

Интенсивность обслуживания, приходящаяся на одно транспортное средство, определяется с выражения:

$$\lambda_{51}^{1T} = \frac{\lambda_{51}^T R(x_5^T)}{x_5^T} = \lambda_{51}^T \rho(x_5^T) \quad (25)$$

Определив все интенсивности потоков событий для подграфов комбайнов и транспортных средств, входящих в УТК, заменяем в них численности состояний –  $X_i$  средними численностями –  $m_i$  и записываем систему дифференциальных уравнений динамики средних для каждой отдельной машины, представляющей группу однотипных машин – комбайнов или транспортных средств:

$$dm_1/dt = \lambda_{21} m_2 + \lambda_{31} m_3 + \lambda_{41} m_4 + \lambda_{51} m_5 + \lambda_{61} m_6 - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) m_1;$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_2}{dt} &= \lambda_{12}R(m_1) - \lambda_{21}m_2; \quad \frac{dm_3}{dt} = \lambda_{13}R(m_1) - (\lambda_{31} + \lambda_{36})m_3; \\ \frac{dm_4}{dt} &= \lambda_{14}R(m_1) - \begin{cases} \lambda_{41}m_4; & \text{при } m_4 \leq m_4^T \\ \lambda_{41}m_4^T; & \text{при } m_4^T m_0 > m_4 > m_4^T \end{cases} \\ \frac{dm_5}{dt} &= \lambda_{15}R(m_1) - \lambda_{51}m_5; \quad \frac{dm_6}{dt} = \lambda_{36}m_3 - \lambda_{61}m_6; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_1^T}{dt} &= \lambda_{21}^T m_2^T + \lambda_{51}^T m_5^T - (\lambda_{12}^T + \lambda_{14}^T) m_1^T; \\ \frac{dm_2^T}{dt} &= \lambda_{12}^T R(m_1^T) - \lambda_{21}^T m_2^T; \quad \frac{dm_3^T}{dt} = \lambda_{43}^T m_4^T - \lambda_{35}^T m_3^T; \\ \frac{dm_4^T}{dt} &= \lambda_{14}^T R(m_1^T) - \lambda_{43}^T m_4^T; \quad \frac{dm_5^T}{dt} = \lambda_{35}^T m_3^T - \lambda_{51}^T m_5^T; \end{aligned}$$

Следует иметь в виду, что все уравнения написаны по определенному правилу (Ястребенецкий и Иванова, 1989).

При установившемся режиме эксплуатации ( $t \rightarrow \infty$ ) в системе устанавливается некоторый предельный стационарный режим с постоянным количеством агрегатов в каждом состоянии. При этом соответствующая функция выражена из условий:

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = N, \quad (27)$$

$$m_1^T + m_2^T + m_3^T + m_4^T + m_5^T = N^T. \quad (28)$$

С учетом нормировочных условий ( $\sum P_i = 1$ ) и учитывая что,  $NP_i = m_i$  и  $N^T P_i = m_i^T$ , определяем состав комбайнового и транспортного звеньев как:

$$N^0 = \sum m_i \quad \text{и} \quad N^T = \sum m_i^T: \quad (29)$$

$$m_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} m_1; \quad m_3 = \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{31} + \lambda_{36}} m_1; \quad m_4 = \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{41}} m_1;$$

$$m_5 = \frac{\lambda_{15}}{\lambda_{51}} m_1; \quad m_6 = \frac{\lambda_{36} \lambda_{13}}{\lambda_{61} (\lambda_{31} + \lambda_{36})} m_1;$$

$$m_2^T = \frac{\lambda_{12}^T}{\lambda_{21}^T} m_1^T; \quad m_3^T = \frac{\lambda_{43}^T \lambda_{14}^T m_1^T}{\lambda_{35}^T \lambda_{43}^T}; \quad m_4^T = \frac{\lambda_{14}^T}{\lambda_{43}^T} m_1^T;$$

$$m_5^T = \frac{\lambda_{35}^T \lambda_{43}^T \lambda_{14}^T}{\lambda_{51}^T \lambda_{35}^T \lambda_{43}^T} m_1^T.$$

### Заключение

1. Таким образом, определение состава и структуры УТК по схеме Марковских случайных процессов и динамики средних позволяет учесть вероятный характер условий эксплуатации ЗУК и ТС, а также оценить влияние любого из факторов эксплуатации на изменение показателей использования не только отдельных агрегатов, но и всего уборочно-транспортного комплекса.

2. Использование данной модели при оптимизации структуры и состава сложных технологических систем уборки зерновых культур обеспечит согласованность работы техники, увеличит производительность комплексов и сократит сроки уборки урожая.

### Литература

Вентцель Е.С. 1972. Исследование операций. М.: Сов. Радио, 552.

Домуци Д. А., А. Д. Устужанов, Ю. І. Енакієв, А. П. Липин. 2019. Ефективність використання збирально-транспортних комплексів по експлуатаційним та енергетичним показникам. Аграрний вісник Причорномор'я/ <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.94.18.94>, 121-130.

Домуци, Д. А., П. І. Осадчук, А. Д. Устужанов, Ю. І. Енакієв. 2020. Методи оптимізації состава зерноуборочних комбайнов уборочно-транспортних комплексів. Сборник с доклади от научен форум с международно участие “Екологія і агротехнології – фундаментална наука і практическа реалізація”. Том 2. Софія, 2020. 62-68. ISSN 2683-0663.

Домуци Д. А., А. Д. Устужанов, Ю. І. Енакієв, А. П. Липин. 2019. Ефективність використання збирально-транспортних комплексів по експлуатаційним та енергетичним показникам. Аграрний вісник Причорномор'я/ <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.94.18.94>, 121-130.

Домуци, Д. А., П. І. Осадчук, А. Д. Устужанов, Ю. І. Енакієв. 2020. Методи оптимізації состава зерноуборочних комбайнов уборочно-транспортних комплексів. Сборник с доклади от научен форум с международно участие “Екологія і агротехнології – фундаментална наука і практическа реалізація”. Том 2. Софія, 2020. 62-68. ISSN 2683-0663.

Домуци Д.А., Ю. І. Енакієв. 2019. Анализ технологий сбора урожая зерновых колосовых культур по эксплуатационным и энергетическим затратам. Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып. 291. Ч. II. М.: Изд-во РГАУ МСХА. 128-132.

Домуци Д. А., Ю. І. Енакієв, П. І. Осадчук. 2020. Обоснование схем и способов ремонтно-технического обслуживания уборочно-транспортных комплексов. Сборник с доклади от научен форум с международно участие “Екологія і агротехнології – фундаментална наука і практическа реалізація”. Том 1. Софія, 60-77. ISSN 2683-0663.

Домуци Д.А., Ю. І. Енакієв, Р. Ф. Байбеков, С.Л. Белопухов. 2019. Определение основных параметров производственных условий при уборке зерновых. "Научный альманах" – ScienceAlmanac. № 7-1. (57). ISSN 2411-7609. Тамбов, 125-128. (По материалам международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», Россия, г. Тамбов, 31 июля 2019 г.).

Домуці Д. П., Ю. І. Енакієв, О.С. Яворський, А.В. Остапенко. 2017. Енергозбереження при забезпеченні роботоздатності та обґрунтуванні складу збиральних машинно-транспортних комплексів. Аграрний вісник Причорномор'я: Зб. наук. пр. Одеського ДАУ/ Технічні науки. Одеса: ОДАУ, №85. 73-78.

Мочуляк О.С., Лисенко А.С., Домуці Д.П. 2020. Обґрунтування структури та складу технологічного комплексу для збирання озимої пшениці/ Збірник матеріалів ХІ міжвузівської науково-практичної конференції «Браславські читання. Економіка ХХІ століття: Національний та Глобальний виміри». Одеса: ОДАУ, 2020. С.94-96.

Сидорчук О.В., Днесь В.І., Скібчик В.І. та ін. 2011. Аналіз методів дослідження та моделей подій у проектах на різних етапах планування збирання ранніх зернових. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво: наук. журнал. №7. Луцьк: ЛНТУ. 141-144.

Сидорчук О.В., Днесь В.І., Скібчик та ін. 2011. Множина основних подій та особливості їх планування у проектах збирання ранніх зернових культур. Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвід. темат. наук зб. Глевах. Вип.95. 365-374.

Скорородов А.Н. 1990. Использование метода динамики средних для определения характеристик технологического комплекса. Эксплуатационное обеспечение технологических процессов по критерию ресурсосбережения: Сб. научн. тр. МИИСП им. Горячкина. М. 27-36.



Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. 1989. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. М.: Энергоатомиздат. 264.

Domuschi D. A., Osadchuk P. I. 2020. Optimization of the structure and composition of technological complexes for harvesting grain crops by energy costs. IV International Eurasian Agriculture and Natural Sciences Congress, 30-31 October 2020. 396-401. ISBN 978-605-69010-2-7.

Domuschi D. A., Ustuyanov A. D. 2020. Increasing the reliability of combines for harvesting grain crops by methods of reserve substitution. IV International Eurasian Agriculture and Natural Sciences Congress, 30-31 October 2020. 402-406. ISBN 978-605-69010-2-7.