

Царев Юрий Александрович, д-р тех. наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
SPIN-код автора: 3585-8390.
Tsarev Yuri Alexandrovich,
Dr. Techn. Sciences, Professor,
Don State Technical University

Полушкин Олег Алексеевич, д-р тех. наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
SPIN-код автора: 3332-4049.
Polushkin Oleg Alekseevich,
Dr. Techn. Sciences, Professor,
Don State Technical University

Адамчукова Елена Юрьевна, Аспирант,
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
SPIN-код автора: 8396-8247.
Adamchukova Elena Yurevna, graduate student,
Don state technical University

**СРЕДСТВА КОМПЬЮТЕРНОГО РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ
COMPUTER SOLUTIONS FOR MANAGING
THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF COMBINE HARVESTERS**

Аннотация. Для современного состояния сельскохозяйственных машин характерно наличие средств автоматизации, подтверждающих их технический уровень. Современные зерноуборочные комбайны оснащаются компьютерной системой ведения точного земледелия. Первый этап, это картирование урожайности, второй этап, это дальнейшее внедрение системы точного земледелия с использованием современных информационных технологий на основе искусственного интеллекта. Однако второй вариант внедрения современных информационных технологий управления технологическим процессом зерноуборочных комбайнов, пока не находит своего применения. В упрощенном виде рассмотрен пример с использованием средств компьютерного решения, который позволяет управлять технологическим процессом зерноуборочных комбайнов в автоматическом режиме. В качестве исходных данных использовались статистические данные, взятые из официальных источников по результатам испытаний на прямом комбайнировании пшеницы зерноуборочным комбайном четвертого класса в «6-ой климатической зоне России». По статистическим данным сформирована математическая модель технологического процесса зерноуборочного комбайна. С использованием современных информационных технологий продемонстрирована возможность автоматического управления технологическим процессом зерноуборочного комбайна при изменении параметров агрофона поля без участия человека. Задача науки остается только в решении вопроса контроля текущих значений агрофона поля для автоматического ввода их в бортовой компьютер зерноуборочного комбайна.

Abstract. The current state of agricultural machinery is characterized by the availability of automation tools that confirm their technical level. Modern combine harvesters are equipped with a computer system for precision farming. The first stage is crop yield mapping, the second stage is the



further implementation of a precision farming system using modern information technologies based on artificial intelligence. However, the second option of introducing modern information technologies for managing the technological process of combine harvesters has not yet found its application. In a simplified form, an example is considered using a computer solution that allows you to control the technological process of combine harvesters in automatic mode. The initial data used were statistical data taken from official sources based on the results of tests on direct wheat harvesting by a fourth-class combine harvester in the "6th climatic zone of Russia". According to statistical data, a mathematical model of the technological process of a combine harvester has been formed. Using modern information technologies, the possibility of automatic control of the technological process of a combine harvester is demonstrated when changing the parameters of the agricultural field without human intervention. The task of science remains only to solve the issue of monitoring the current values of the agricultural field for automatic input into the hog computer of the combine harvester.

Ключевые слова: Технологический процесс, математическая модель, зерноуборочный комбайн, информационные технологии.

Keywords: Technological process, mathematical model, combine harvester, information technology.

Введение и цель.

Совершенствование системы технической оснащенности зерноуборочных комбайнов неразрывно связано с разработкой и внедрением новых прогрессивных технологий. Для современного состояния сельскохозяйственных машин характерно наличие средств автоматизации, подтверждающих современный технический уровень, как метод повысить ряд важных потребительских свойств, таких как: производительность, экономичность, комфорт, безопасность труда и др [1].

Современные зерноуборочные комбайны оснащаются компьютерной системой ведения точного земледелия. Как первый этап – это картирование урожайности и определение одного из главных показателей – производительности комбайнов [2]. Второй этап – это дальнейшее внедрение системы точного земледелия с использованием современных информационных технологий (искусственного интеллекта¹ и машинного обучения и др.) для автоматизированного управления технологическим процессом зерноуборочных комбайнов с учетом изменения агрофона поля, исключающих ошибки в работе комбайнера [3].

Однако второй вариант внедрения современных информационных технологий управления технологическим процессом зерноуборочных комбайнов, о котором пишут и говорят уже не один десяток лет, никак не найдет своего применения [4 – 6]. А ведь, по некоторым сведениям, недавно попавшим в печать, от выращенного в стране урожая пшеницы, на поле остается до 15%. Причины – это несвоевременная уборка и как следствие – биологические потери и, второе – комбайнеры не умеют вручную правильно настраивать параметры технологического процесса зерноуборочных комбайнов при текущем (зачастую до 100%) изменении агрофона поля, что приводит к потерям, по нашим расчетам до 7% от выращенного урожая. Так, если в 2023 году убрали около 80 млн. тонн пшеницы, значит вырастили 94 млн. тонн, из которых на полях осталось около 14 млн. тонн, а 7%, это 6,5 млн. тонн пшеницы, которое осталось на полях страны, по причине отсутствия современных информационных технологий управления технологическим процессом зерноуборочных комбайнов, при цене 15 тыс. руб. за тонну пшеницы, в год убыток по стране может составлять до 100 млрд. руб.

¹ **Искусственный интеллект** (англ. artificial intelligence) — это раздел информатики, в котором разрабатываются методы и средства компьютерного решения интеллектуальных задач, традиционно решаемых человеком. (Источник: <https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2022537>).



Рассмотрен в упрощенном виде пример, с имитацией использования средств компьютерного решения задачи управления технологическим процессом (ТП) зерноуборочных комбайнов.

Материалы и методы.

Чтобы не усложнять расчетов будем руководствоваться фрагментом статистических данных из шести замеров (таблица 1) зерноуборочного комбайна «Д1200», которые были взяты из официальных источников (протоколов испытаний) по результатам предварительных испытаний (или агротехнической оценки, правда, для точности оценки требуется девять замеров) на прямом комбайнировании пшеницы в «6-ой климатической зоне России».

Выбор статистических данных результатов испытаний для формирования математической модели ТП, это отдельная тема².

Таблица 1.

Результаты предварительных испытаний зерноуборочного комбайна «Д1200» на прямом комбайнировании пшеницы размещаются в базе данных (БД) бортового компьютера (БК)

	Y_1	Y_2	Y_3	Z	X_p
1	7,91	1,95	1,0	42,9	3,3
2	7,69	2,37	1,5	38,0	3,7
3	9,74	3,00	1,0	39,8	2,7
4	8,4	2,38	1,1	38,4	2,5
5	7,63	2,5	1,2	38,4	3,1
6	9,23	1,48	1,5	35,0	4,8

Примечание: Y_1 – вектор производительности зерноуборочного комбайна, т/ч;

Y_2 – вектор потерь за зерноуборочным комбайном, %;

Y_3 – вектор дробления зерна, %;

Z – вектор (агрофона, один из множества) урожайности поля, ц/га;

X_p – вектор (управления ТП, один из множества) технологической скорости движения зерноуборочного комбайна, км/ч.

Запишем уравнение ТП зерноуборочного комбайна в общем виде

$$Y = f(Z, X_p), \quad (1)$$

где Y (Y_1, Y_2, Y_3) – вектор выходных параметров, показателей качества ТП зерноуборочного комбайна.

Все дальнейшие расчеты выполняются с использованием средств компьютерного решения интеллектуальных задач в БК зерноуборочного комбайна [7, 8].

По данным таблицы 1, регрессионная математическая модель (1) ТП в БК комбайна будет выглядеть [7, 8].

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 13,017 - 0,109 Z - 0,109 X_p; \\ Y_2 &= 5,89 - 0,04 Z - 0,58 X_p; \\ Y_3 &= 2,453 - 0,044 Z + 0,143 X_p. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Наличие математической модели (2) ТП зерноуборочного комбайна, это первый шаг к компьютерному решению управления ТП. В дальнейшем управление ТП идет без участия человека, по заранее разработанной программе.

² Царев Ю.А. Статистическая оптимизация основных конструкционных параметров зерноуборочных комбайнов с учетом зональных условий: автореферат дис. док. тех. наук, 05.20.01. / Юрий Александрович Царев. – Ростов-на-Дону.: Донской гос. тех. ун-т (ДГТУ), 2000. - 49 с.



Комбайн, оснащенный БК с математической моделью (2), поступил на сертификационные испытания на уборку пшеницы с длинного гона 1000 м, где в трех местах гона агрофон (урожайность пшеницы, ц/га), замеренный через одинаковый промежуток времени $t_1=t_2=t_3=10$ сек, составил: $Z_1 = 20$ ц/га, $Z_2 = 30$ ц/га и $Z_3 = 40$ ц/га (см. рисунок).



40 ц/га 30 ц/га 20 ц/га

Рисунок – Схема движения зерноуборочного комбайна по полю

С какой скоростью должен двигаться комбайн на каждом участке, чтобы производительность комбайна была максимальная, но при этом выполнялись требования ТП: ограничения по потерям ($Y_2 \subset G_2 \leq 3\%$) и дроблению зерна ($Y_3 \subset G_3 \leq 2\%$). Любая задача математического программирования имеет точное решение, если она однокритериальная и имеет ограничения. В качестве критерия оптимизации определена производительность (Y_1), а в качестве параметра оптимизации – скорость комбайна (X_p) [3, 6]. Будем считать «Д1200» – это зерноуборочный комбайн 3-4 класса, где ограничениями по «б зоне» для комбайна составляют – $Z \subset G_z$ (15-45 ц/га), а по параметрам настройки «Д1200» – $X_p \subset G_x$ (3-7 км/ч) [9].

Результаты.

Урожайность пшеницы $Z_1 = 20$ ц/га, на этом этапе БК использует модель (2) ТП комбайна, тогда однокритериальная задача оптимизации (по максимуму производительности), примет вид:

найти X_{p1}^*

$$\max: Y_1 = 13,017 - 0,109 \cdot 20 - 0,109 X_{p1}, \quad (3)$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} Y_2 &= 5,89 - 0,04 \cdot 20 - 0,58 X_{p1} \leq 3; \\ Y_3 &= 2,453 - 0,044 \cdot 20 + 0,143 X_{p1} \leq 2; \\ Z_1 &\subset G_z; X_p \subset G_x. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

БК решает задачу математического программирования симплекс методом [7, 8], оптимальная скорость комбайна, $X_{p1}^* = 3,6$ км/ч.

	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Z_1	X_{p1}^*
7	10,48	3,00	2,1	20,0	3,6

Примечание: $Y_{31} = 2,1 > 2$, что объясняется отсутствием предварительных испытаний комбайна на $Z = 20$ ц/га, см. таблицу 1, и при этом за $t_1=10$ сек комбайн проходит, $s_1=10$ м.



Таблица 2.

БК добавляет в БД к результатам (таблица 1) сертификационных испытаний зерноуборочного комбайна на пшенице данные, полученные при, $Z_1 = 20$ ц/га.

	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Z	X_p
1	7,91	1,95	1,0	42,9	3,3
2	7,69	2,37	1,5	38,0	3,7
3	9,74	3,00	1,0	39,8	2,7
4	8,4	2,38	1,1	38,4	2,5
5	7,63	2,5	1,2	38,4	3,1
6	9,23	1,48	1,5	35,0	4,8
7	10,48	3,0	2,1	20,0	3,6

По данным таблицы 2 БК формирует новую регрессионную модель ТП, которая имеет вид [7, 8].

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 13,09 - 0,108 Z - 0,107 X_p; \\ Y_2 &= 6,01 - 0,046 Z - 0,583 X_p; \\ Y_3 &= 2,49 - 0,045 Z + 0,141 X_p. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Урожайность пшеницы $Z_2 = 30$ ц/га, БК комбайна использует модель (5) ТП комбайна, тогда задача математического программирования примет вид:

найти X_{p2}^*

$$\max: Y_{12} = 13,09 - 0,108 \cdot 30 - 0,107 X_{p2}, \quad (6)$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} Y_{22} &= 6,01 - 0,046 \cdot 30 - 0,583 X_{p2} \leq 3; \\ Y_{32} &= 2,49 - 0,045 \cdot 30 + 0,141 X_{p2} \leq 2; \\ Z_2 &\subset G_Z; X_p \subset G_X. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

БК решает задачу математического программирования симплекс методом [7, 8], оптимальная скорость комбайна, $X_{p2}^* = 4,94$ км/ч.

	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Z_2	X_{p2}^*
8	10,18	1,75	1,84	30,0	4,94

Примечание: за $t_2 = 10$ сек, комбайн проходит, $s_2 = 14$ м.

Таблица 3.

БК добавляет в БД к статистическим результатам испытаний (таблица 2) зерноуборочного комбайна данные, полученные на пшенице ($Z_2 = 30$ ц/га)

	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Z	X_p
1	7,91	1,95	1,0	42,9	3,3
2	7,69	2,37	1,5	38,0	3,7
3	9,74	3,00	1,0	39,8	2,7
4	8,4	2,38	1,1	38,4	2,5
5	7,63	2,5	1,2	38,4	3,1
6	9,23	1,48	1,5	35,0	4,8
7	10,48	3,0	2,1	20	3,6
8	10,18	1,75	1,84	30,0	4,94



По данным таблицы 3 БК строит новую регрессионную модель ТП

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 12,5 - 0,113 Z - 0,112 X_p; \\ Y_2 &= 6,01 - 0,046 Z - 0,584 X_p; \\ Y_3 &= 2,49 - 0,045 Z + 0,14 X_p. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Урожайность пшеницы $Z_3 = 40$ ц/га, БК использует модель (8) ТП, для решения задачи математического программирования:

найти X_{p3}^*

$$\max: Y_{13} = 12,5 - 0,113 \cdot 40 - 0,112 X_{p3}, \quad (9)$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} Y_{23} &= 6,01 - 0,046 \cdot 40 - 0,584 X_{p3} \leq 3; \\ Y_{33} &= 2,49 - 0,045 \cdot 40 + 0,14 X_{p3} \leq 2. \\ Z_3 &\in G_z; X_p \in G_x. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

БК решает задачу математического программирования симплекс методом [7, 8], оптимальная скорость комбайна, $X_{p3}^* = 5,74$ км/ч

	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Z_3	X_{p3}^*
9	9,87	0,82	1,49	40,0	5,74

Примечание: за $t_3 = 10$ сек, комбайн проходит, $s_3 = 16$ м.

Таблица 4.

БК добавляет в БД, к статистическим результатам (таблица 3), новые результаты испытаний зерноуборочного комбайна на пшенице ($Z_3 = 40$ ц/га)

	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Z	X_p
1	7,91	1,95	1,0	42,9	3,3
2	7,69	2,37	1,5	38,0	3,7
3	9,74	3,00	1,0	39,8	2,7
4	8,4	2,38	1,1	38,4	2,5
5	7,63	2,5	1,2	38,4	3,1
6	9,23	1,48	1,5	35,0	4,8
7	10,48	3,0	2,1	20	3,6
8	10,18	1,75	1,84	30,0	4,94
9	9,87	0,82	1,49	40,0	5,74

По данным таблицы 4 новая математическая модель ТП, установленная в БК, будет выглядеть

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 10,91 - 0,093 Z + 0,378 X_p; \\ Y_2 &= 6,02 - 0,046 Z - 0,586 X_p; \\ Y_3 &= 2,5 - 0,045 Z + 0,14 X_p. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В случае использования в дальнейшем зерноуборочного комбайна с внедренной в БК математической моделью (11) ТП, например, при последующей урожайности, $Z_4 = 25$ ц/га, с использованием методов и средств компьютерного решения, получаем, $X_{p4}^* = 3,63$ км/ч,

	Y_{14}	Y_{24}	Y_{34}	Z_4	X_{p4}^*
10	10,0	2,73	1,89	25,0	3,63

и так далее, т.е. происходит накопление информации («самообучение» зерноуборочного комбайна), используются средства компьютерного решение интеллектуальной задачи без участия человека.



Рассмотрен простейший случай управления ТП зерноуборочного комбайна с помощью БК с тремя группами факторов, когда, при наличии математической модели технологического процесса зерноуборочного комбайна, происходит имитация его работы.

Выводы.

1. По результатам приемочных испытаний на МИС или НИО, при постановке зерноуборочных комбайнов на серийное производство, в бортовых компьютерах комбайнов могут формироваться математические модели технологических процессов для определенной зоны, вида уборки определенной культуры и в определенной комплектации.
2. Если математическая модель технологического процесса создана, например, для конкретной модели зерноуборочного комбайна, причем только для прямого комбайнирования пшеницы, в 6-ой климатической зоне, в комплектации с 6-метровой жаткой, то комбайнеру остается просто использовать средства компьютерного решения интеллектуальной задачи, что продемонстрировано на примере оптимального управления технологическим процессом комбайна.
3. Число математических моделей технологических процессов зерноуборочных комбайнов может быть равным количеству климатических зон, видов убираемых культур, моделей комбайнов и их комплектаций. Очевидно, что модели зерноуборочных комбайнов должны привязываться к конкретным климатическим зонам, но для этого и существует шесть классов комбайнов.
4. В бортовом компьютере каждого зерноуборочного комбайна должно быть столько математических моделей технологических процессов, сколько требуется для его работы в определенной климатической зоне, в противном случае, комбайнер управляет технологическим процессом вручную.
5. Науке остается лишь решить вопрос контроля текущих численных значений агрофона поля для автоматического ввода их в бортовой компьютер зерноуборочного комбайна, а это: урожайность, полеглость, влажность зерна и соломы, соотношение зерна и соломы.

Список литературы:

1. Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 7 июля 2017 года, № 1455-р. – М. – 39 с.
2. Труфляк, Е.В. Картирование урожайности / Е.В. Труфляк. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 13 с.
3. Adamchukova, E.Yu. Automatization of settings of working organs of technological process of combine harvester / Yu.A. Tsarev, E.Yu. Adamchukova, M. Najie // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) electronic edition. Сер. "MATEC Web of Conferences" 2018. С. 05019.
4. Царев Ю.А., Харьковский А.В. Перспективы использования электронной системы управления в комбайнах «Дон» и «Нива». Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 1. С. 37-39.
5. Царев Ю.А., Джигарханов Д.Г. Автоматизация системы настройки технологического процесса зерноуборочного комбайна. Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 12. С. 29-31.
6. Адамчукова, Е.Ю. Совершенствование системы контроля и управления технологическими параметрами зерноуборочных комбайнов / Е.Ю. Адамчукова, Ю.А. Царев // Сборник «Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации», №1 (2). 2018. С. 256-259.
7. STATISTICAL GRAPHICS SYSTEM by STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION. User's guide. (Пакет прикладных программ STATGRAPHICS (SG), версии 2.6, номер 1157855, 1989.).



8. Система автоматизированного управления технологическим процессом зерноуборочного комбайна. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010611678 Российская Федерация / Царев Ю.А., Лебедев А. Р., Рябых А. А. – рег. 03.03.10 в Реестре программ для ЭВМ.

9. РД 10.1.1-92. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения. Номенклатура показателей. – М.: Минсельхоз, 1992.

