

УДК 631.3.09

UDC 631.3.09

05.00.00 Технические науки

Engineering

**МНОГОУРОВНЕВЫЙ СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УБОРКИ, ТРАНСПОРТИРОВКИ И ОЧИСТКИ ЗЕРНА<sup>1</sup>**

**A MULTILEVEL SYSTEMIC APPROACH TO INTEGRATED OPTIMIZATION OF HARVESTING PROCESSES, TRANSPORTATION AND CLEANING OF GRAIN**

Маслов Геннадий Георгиевич  
доктор технических наук, профессор  
Тел.: 8-(918)-343-04-52  
РИНЦ SPIN-код: 7115-7421

Maslov Gennady Georgievich  
Doctor of technical sciences, professor  
Tel.: 89183430452  
RSCI SPIN-ID: 7115-7421

Малышев Сергей Алексеевич  
магистрант 2-го года обучения факультета механизации  
e-mail: [mr.sergey.malyshev@yandex.ru](mailto:mr.sergey.malyshev@yandex.ru)  
*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия*

Malyshev Sergey Alexeyevich  
master student of the 2nd year of the faculty of mechanization  
e-mail: [mr.sergey.malyshev@yandex.ru](mailto:mr.sergey.malyshev@yandex.ru)  
*Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia*

Разработана методология многоуровневого системного подхода к комплексной оптимизации процессов уборки, транспортировки и очистки зерна при уборке урожая методом «невейка». Основной метод исследований – теория массового обслуживания всех компонентов урожая за исключением соломы. Система состоит из шести взаимосвязанных подсистем со своими входами и выходами и своими критериями оптимальности. На первом уровне оптимизации обоснован наиболее эффективный вариант технологии уборки пшеницы «невейка». На втором - оптимизирована продолжительность уборки с учетом 4-5 возделываемых сортов пшеницы, каждый из которых убирается в течение 5 календарных дней. Третий уровень обосновывает потребность в комбайновых и транспортных средствах. На четвертом - оптимизируются составы уборочно - транспортных звеньев по критерию минимальной суммы потерь от взаимного ожидания комбайнов и транспортных средств. Пятый уровень - оптимизации обосновывает режим работы приемного пункта мехтока, где основным критерием оптимальности служит минимум сумма потерь от взаимного ожидания приемного пункта транспортных средств, а вспомогательным - минимум времени ожидания транспортных средств в очереди. На шестом - заключительном этапе определяется удельный годовой экономический эффект (руб/га или руб/т) от внедрения предлагаемой технологии. Установлено, что в процессе уборки зерна, транспортировки и обработки вороха на стационаре имеют место простейшие или пуассоновские вероятностные потоки требований на обслуживание. Представление уборочно-транспортного звена в виде замкнутой системы массового обслуживания одного уборочного звена.

A methodology for a multilevel system approach to integrated optimization of processes of harvest, transportation and cleaning of the grain during the harvest by the method of «Neveyka» has been developed. The main method of research - is a queuing theory of all components of the yield except straw. The System consists of 6 interconnected subsystems with their inputs and outputs, and its own optimality criteria. On the first level of optimization, the most efficient way of wheat harvest «Neveyka» has been proved. On the second level - the total duration of the harvest with allowance for 4-5 cultivated wheat sorts, each of which is harvested within 5 calendar days, was optimized. The third level proves the requirement of combine harvesters and transport vehicle. On the fourth level - the combinations of harvesting and transport units are optimized on the criterion of the minimum amount of the loss on the mutual expectations of harvesters and vehicles. The fifth optimization level proves the capacity of the reception station of the grain storage, where the main criterion for optimality is the least amount of losses on the mutual waiting time of the transportation vehicles, and the additional criterion is the minimum waiting time of vehicles in the queue. On the sixth and the final stage the specific annual economic effect (rub/ha or rub/t) from the implementation of the proposed technology is determined. It is established, that during the grain harvesting, transporting and processing of heap there are elementary or Poisson probability flows of requirements for service. The Representation of harvesting - transport link in the form of closed queuing system of independent harvesting unit. An approach to the justification of failure-free operation

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края по научному проекту № 16-48-230386

Представлен подход к обоснованию безотказной работы стационарного пункта по очистке зернового вороха и складированию зерна и половы

of a station for cleaning grain heap and storage of grain and chaff is presented

Ключевые слова: МНОГОУРОВНЕВЫЙ СИСТЕМНЫЙ МЕТОД, ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ, ВЕРОЯТНОСТЬ, СИСТЕМА

Keywords: MULTILEVEL SYSTEM APPROACH, RESEARCH, QUEUING THEORY, PROBABILITY, SYSTEM

**Doi: 10.21515/1990-4665-124-072**

Характерная особенность уборочных процессов состоит в том, что все выполняемые работы должны осуществляться по непрерывному поточному принципу с операциями сбора выгрузки зерна, транспортировки, послеуборочной доработки и закладке на охране [1]. Другими словами – должна выполняться индустриально – побочная технология уборки (ИПТ) [2]. Естественно, что эффективное функционирование всех многочисленных технических средств, используемых в ИПТ, невозможно без применения современных научных методов моделирования и оптимизации сложных производственных процессов с учетом требований высокой производительности, качества работы и требований высокой производительности, качества работы и ресурсосбережения. Необходима комплексная оптимизация указанных процессов с использованием методов теории массового обслуживания. Многоуровневый системный подход к комплексной механизации уборочных процессов разработан нашими учеными [3, 4, 5], однако его теоретические основы уже требуют корректировки с учетом современной техники и инновационных технологий. Таким образом, основной теоретический и практический результат комплексной оптимизации должен обеспечить высокоэффективное взаимосвязанное функционирование всех звеньев технологического процесса уборки урожая зерна, его транспортировки и после уборочной доработки. Решение такой проблемы требует рассмотрения комплекса разнородных взаимосвязанных задач с существенно различающимися объектами

исследования, которые не могут быть охвачены какой-либо общей математической моделью с единым критерием оптимальности.

Учитывая известные общие принципы системного подхода [3–5], нами предложена структурная схема иерархии решения задач оптимизации процессов уборки, транспортировки и послеуборочной доработки зерна (рис. 1). Система включает входы (входные факторы), выход (результатирующие на параметры) и 6 подсистем.

На первом уровне предполагается решение задачи выбора наиболее эффективной технологии уборки зерна с учетом конкретных природно-производственных условий контрольной зоны Краснодарского края.

В качестве исходной информации на этом этапе используется почвенно-климатические условия, сорта озимой пшеницы, структура их площадей, интервал урожайности, наличие зерноуборочных комбайнов, транспортных средств и линий послеуборочной доработки зерна. Для всех этих факторов принято обобщенное обозначение  $F_6(t)$  на входе в систему (рис. 1).

Основными результатами исследования на первом уровне является возможные варианты п.э. наиболее эффективности рекомендуется максимум убранного урожая и высокого качества (Т/га) ( $U \rightarrow \max$ ). Под качеством зерна имеется в виду его механическое повреждение машинами [6].

Вспомогательными критериями оптимальности на первом уровне можно принять стоимость дополнительной продукции (собранного зерна) за счет новой технологии по сравнению с базовой. Удельный экономический эффект предлагаемой новой технологии на первом этапе можно определить в виде разности 1:

$$\Delta C_{\gamma 1} = \Delta C_{\pi 1} - C_{\delta 1}, \quad (1)$$

где  $\Delta C_1$  – удельный экономический эффект на первом этапе иерархии технологии сборки за счет дополнительного сбора зерна, руб/га;

$C_{н1}$ ,  $C_{б1}$  – соответствующая стоимость урожая по новой и базовой технологиям на первом уровне иерархии.

Стоимость урожая зависит от уровня урожайности зерна по базовой и предлагаемой технологии, удельный экономический эффект определяется по формуле 2:

$$\Delta C_1 = 1,1 \cdot U \cdot Z = 0,1 \cdot U \cdot Z, \quad (2)$$

где  $U$  – урожайность зерна, т/га;

$Z$  – закупочная цена зерна, руб/т;

0,1 – коэффициент прекращения урожайности зерна за счет новой технологии ( в долях от единицы)

$\Delta C_1$  – удельный экономический эффект на первом уровне оптимизации от прибавки урожая за счет лучшего варианта технологии уборки, руб/т.

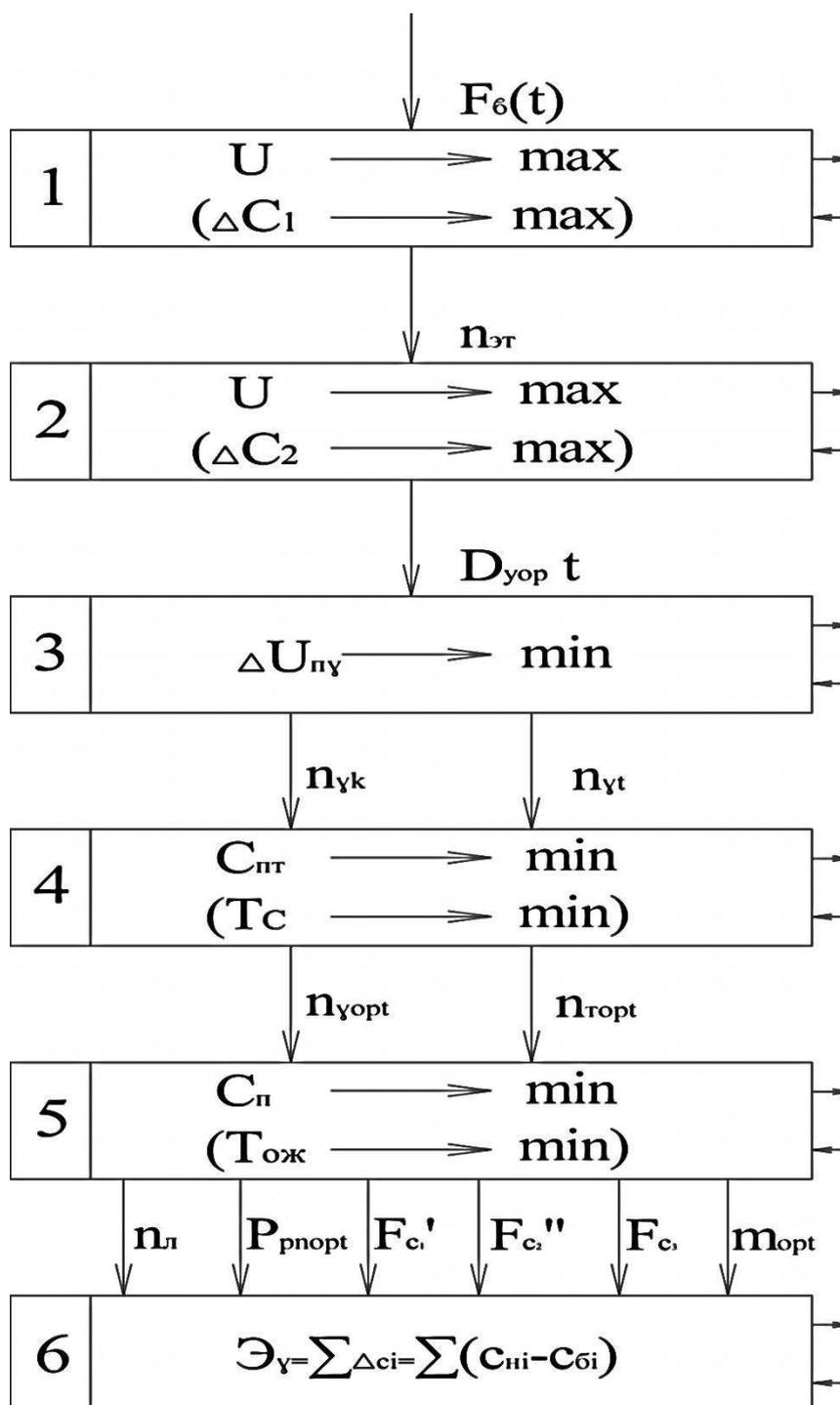


Рисунок 1 – Структурная схема решения задач оптимизации процессов уборки, транспортировки и послеуборочной доработки зерна.

Лучшим вариантом технологии согласно критерию оптимизации – максимум убранный урожай ( $U_{\text{max}}$ ) высокого качества, является «невейка» с доработкой вороха на стационаре [8], так и за рубежом [9]. По результатам этих исследований «невейка» обеспечивает прибавку урожая

10 %, по сравнению с базовой (прямое комбайнирование озимой, пшеницы с измельчением и разбрасыванием соломы).

Более высокое качество зерна за счет снижения его повреждения уборочными машинами при использовании «невейки» обеспечивается режимом работы уборочной машины, в которой отсутствует дополнительное перемещение зерна по решетам очистки, зерновым шнеком и элеватором.

Кроме того, доказано многочисленными исследованиями [1, 11, 12], что механическое повреждение зерна почти в десять раз снижают новые аксиально-роторные молотильно-сепаратирующие устройства (МСУ). Согласно нашим исследованиям, дробленые зерна озимой пшеницы комбайном TORUN – 740 с аксиально-роторным МСУ, даже при очень низкой влажности зерна (8–9 %), не превышало 0,6 %. В связи с этим, в предлагаемом новом варианте технологии, по сравнению с базовым методом, предусмотрено только аксиально-роторное МСУ, обеспечивающее и снижение микроповреждения зерна, и повышение производительности обмолота.

Как уже было отмечено, удельный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии определяется суммой удельных эффект на каждом отдельном уровне оптимизации системы.

Годовой экономический эффект достигается за счет продолжительности уборки. Как известно превышение ее более пяти дней после полной спелости зерна ведет к существенным потерям зерна и снижению его качества [7, 13].

Критерий оптимизации на втором уровне учитывает удельный экономический эффект по формуле 3:

$$\Delta C_2 = C_{пб} - C_{пн}, \quad (3)$$

где  $\Delta C_2$  – удельный экономический эффект на втором уровне оптимизации от сокращения потерь зерна за счет соблюдения оптимальной продолжительности уборки, руб/га;

$C_{пб}$  – величина потерь зерна в базовой технологии руб/га;

$C_{пн}$  – величина потерь зерна в новой технологии руб/га.

Потери зерна от самоосыпания в зависимости от продолжительности уборки определены профессором Жалниным Э. В. (формула 4) [13]:

$$y_3 = 1,6^t - 4, \quad (4)$$

где  $y_3$  – потери зерна от самоосыпания, % от исходного урожая;

$t$  – продолжительность нахождения зерна в колосе на корню, начиная с 3-4-го дня после полного созревания ( $3 \leq t \leq 25$ ), дн.

Эта формула (4) правомерна для яровых и озимых культур пшениц. Для овса и легкообмолачиваемых культур потери на 15–20 % больше [13]. К потерям зерна от самоосыпания после его полной спелости мы добавили потери при уборке за комбайном, потери от дробления зерна и получили зависимость стоимости потерь урожая от продолжительности уборки (5):

$$-0,22 \cdot n_{рд}^2 + 1,56 \ln \cdot n_{рд} - \frac{11,04}{n_{рд}},$$

$$\Delta C_2 = C_{пб} - C_{пн} = Z \cdot U \cdot e, \quad (5)$$

где  $Z$  – закупочная цена зерна, руб/т;

$U$  – урожайность зерна т/га;

$n_{рд}$  – продолжительность уборки (моделируется от 1 до 30 дней);

$e$  – основание натурального логарифма.

Поскольку в базовой технологии уборки не выдерживается оптимальная продолжительность уборки. За счет рекомендуемых 4–5

сортов пшеницы при условии уборки каждого из них с разными сроками созревания, за 5 дней, практически не используется комбайны с аксиально-роторными МСУ, которые снижают дробление и потери, то очевиден удельный экономический эффект и на втором уровне оптимизации технологии.

Второй уровень оптимизации формирует выбор оптимальных сроков уборки зерна озимой пшеницы.  $D_{\text{урт}}$  в зависимости от набора и местных условий. Критерий оптимизации результатом оптимизации на втором уровне является оптимальная продолжительность уборки озимой пшеницы с учетом 4–5 возделываемых сортов в регионе, при этом каждый сорт, имея разные сроки созревания, должен иметь продолжительность уборки ДУ не более 5 календарных дней [7].

Третий уровень исследования состоит в определении общего потребного количества зерноуборочных комбайнов и транспортных средств для зерна. Потребность в комбайнах обозначена –  $n_{\text{ун}}$ , а в транспортных средствах –  $n_{\text{ут}}$ . Критерий оптимизации на данном уровне соответствует минимуму потерь урожая  $\Delta U_{\text{пу}} \rightarrow \min$  из-за нехватки средств для уборки.

На четвертом уровне – на базе общего требуемого количества уборочных средств формируются уборочно-транспортные звенья (табл. 1). Основными результатами оптимизации на этом уровне является оптимальное взаимосвязанное количество уборочных средств  $n_{\text{урт}}$  и транспортных средств  $n_{\text{ут}}$  (накопителей-перегрузчиков НПБ). В качестве основного критерия оптимальности на данном уровне выбран минимум суммы потерь от взаимного ожидания комбайнов и транспортных средств (руб/ч)  $C_{\text{пт}} \rightarrow \min$ .

Возможно также использование и вспомогательного критерия оптимальности, соответствующего минимуму времени от момента

обмолота зерна до момента его доставки на ток:  $T_c \rightarrow \min$  (на рис.1 показан в скобках).

Пятый уровень исследования предусматривает оптимизацию режима работы стационарного тока для приема и после уборочной доработки зерна, куда доставляется зерновой ворох транспортными средствами.

Основным критерием оптимальности служит минимум суммы потерь от взаимного ожидания транспортных средств в очереди по уравнению 6 (блок 5, рис. 1)

$$T_{ож} \rightarrow \min, \quad (6)$$

По аналогии с блоками 4 и этот критерий  $T_{ож}$  показан в скобках. В качестве основных результатов оптимизации на 5-ом уровне определяются режим работы приемного пункта  $P_{рп\ opt}$  по требуемой интенсивности обслуживания, а также потребное количество мест  $m_{opt}$  для ожидания пребывающих транспортных средств.

На шестом заключительном уровне оптимизируются удельный экономический эффект  $\Delta_y$  от внедрения технологии:

$$\Delta_y = \Delta C = \sum \Delta C_i = \sum (C_{би} - C_{ни}), \quad (7)$$

где  $\Delta C_i$  – удельная экономия, достигаемая на  $i$  – ом уровне оптимизации, руб/гп, руб/т;

$C_{би}$ ,  $C_{ни}$  – соответствующие затраты на  $i$  – ом уровне оптимизации при базовом и новом (предлагаемом) вариантах работы, куб/га, руб/т.

Следовательно, задача определения удельного годового экономического эффекта сводится и определено разности последующим их суммированием.

Передача информации от предшествующих уровней оптимизации к последующим (сверху вниз) показана на рисунке 1 стрелками между всеми уровнями. Такой ход информации справедлив при комплексной

оптимизации на всех рассматриваемых уровнях. Однако, возможно упрощенное, оперативное решения на отдельных частных уровнях например, в производственных условиях. В этом случае информация должна передаваться в обход тех уровней, которые в данном конкретном уровне не рассматриваются. Такая схема передачи информации показана на рисунке 1 боковыми стрелками в обратном направлении (снизу вверх) условно изображена возможность корректировки результатов оптимизации предшествующих, новые данные возвращаются на соответствующий корректируемый предшествующий уровень в направлении снизу вверх.

Учитываемы на рассмотренных уровнях оптимизации факторы в основном имеют вероятный характер изменения. Соответственно и исследования осуществляются вероятностными методами. Наиболее эффективен из этих методов является, теория массового обслуживания, поскольку имеет место простейшим или пуассоновский поток требований в виде отдельных порций урожая зерна.

Рассмотрим кратко представленные уровни оптимизации (рис. 1) с точки зрения СМО.

Необходимость первого уровня оптимизации вызвана тем, что характер последующих теоретических и экспериментальных исследований во многом определяется применяемыми технологиями уборки. При наличии нескольких вариантов возможных технологий необходимо выбрать наиболее эффективную в данных конкретных условиях. Решения о выборе технологии принимается на основании критерия оптимальности на данном уровне максимум убранного урожая высокого качества.

Уборка зерновых колосовых культур в Краснодарском крае выполняется по трем вариантам технологий: прямое и раздельное комбайнирование, а также «невейка» с очисткой вороха на стационаре. Третий вариант технологии на Кубани пока не применяется, но уже доказано на практике его высокая эффективность [8, 9], учитывая критерий

оптимизации первого уровня. Широко распространенной технологией уборки зерновых колосовых является прямое комбайнирование с измельчителем и разбрасыванием соломы по полю на удобрение [10]. Этот вариант занимает по краю в среднем 90 % уборочных площадей. Раздельный способ уборки связан с дополнительными затратами, поэтому применяется очень редко, в основном, когда поля засоренные и имеет место неодновременное созревание зерна на конкретных участках поля. Однако эти негативные последствия объясняются нарушениями технологии обработки почвы, посева, ухода за посевами, когда несвоевременно и некачественно вносятся удобрения и гербициды, не соблюдаются сроки сева и т.п. При соблюдении технологических требований раздельная уборка не нужна.

Очень перспективен, на наш взгляд, вариант «невейки» [8, 9].

Определение потребного количества зерноуборочных комбайнов для каждого  $i$ -го сорта пшеницы выполняются по формуле 8:

$$n_{yi} = \frac{F_{yi} \cdot U_i}{n_{рд} \cdot \mathcal{L}_k \cdot T_{рд} \cdot W_{ч}}, \quad (8)$$

где  $F_{yi}$  – уборочная площадь, занимаемая  $i$ -ым сортом пшеницы, га;

$U_i$  – урожайность  $i$ -го сорта, Т/га;

$n_{рд}$  – календарная продолжительность уборки данного сорта (принимает 5 дней);

$\mathcal{L}_k$  – коэффициент использования календарного времени;

$T_{рд}$  – средняя продолжительность рабочего дня с дня условий Кубани принимает 12 ч.

$W_{ч}$  – Производительность зерноуборочного комбайна за 1 час сменного времени, т/ч.

Общее потребное количество транспортных средств для обслуживания  $n_{ук}$  комбайнов составит (формула 9):

$$n_{ук} = n_{yi} \cdot i, \quad (9)$$

Общее количество транспортных средств для обслуживания  $n_{ут}$  комбайнов составит (формула 10):

$$n_{ут} = \frac{n_{ук} \cdot W_{ч} \cdot t_{цт}}{Q}, \quad (10)$$

где  $t_{цт}$  – продолжительность цикла транспортного средства, ч.

$Q$  – грузоподъемность транспортного средства, Т.

Потребное общее количество комбайнов  $n_{ук}$  и транспортных средств  $n_{ут}$  для доставки зерна с поля на ток обеспечит выполнение критерия оптимизации на третьем уровне  $\Delta U_{пy} \rightarrow \min$  - минимум потерь урожая из-за нехватки комбайнов и транспортных средств. При этом надо учитывать в нашей технологии, что все зерноуборочные комбайны, особенно для семенных сортов пшеницы должны быть только с роторными  $n_{су}$ , а транспортные средства – накопители – перегрузчики бункерного типа НПБ – 20 с низким удельным давлением на почку для сохранения ее плодородия. Кроме того, НПБ – 20 снабжен компьютером для взвешивания и учета зерна от каждого комбайна за весь уборочный сезон и суммарный учет от всех комбайнов.

На четвертом уровне рассматривается задача оптимизации состава уборочно-транспортного звена, поскольку основная фирма организации работы удобрений и транспортных средств – звеньевая. Эффективность функционирования таких звеньев с наименьшими затратами ресурсов возможны лишь при оптимальных количественных соотношениях между комбайнами и транспортными средствами. Функционирование транспортных средств (ППБ-20 с тракторами) представлено на рисунке 2. Уборочные средства (комбайны) образуют поток требований в виде заполненных бункеров с зерном. Поскольку заполнение указанных емкостей происходит через случайные промежутки времени, то имеет

вероятный поток требований на перевозку соответствующих процентах. При недостатке транспортных средств возможна с отправкой зерна от комбайнов и их простои, затягиваются сроки уборки и теряется урожай.

Нежелательно и завышенное количество транспортных средств, часть из которых будет простаивать и повысит дополнительные затраты.

Описанная схема работа уборочно-транспортного звена (УТЗ) соответствует двухфазной системе массового обслуживания (СНО) с возможным ожиданием требований (заполнением бункеров) как перед первой, так и второй фазами обслуживания. Принципиальная схема такой СНО (рис.2) позволяет решить задачу по определению таких оптимальных количественных соотношений между комбайнами и транспортными средствами о УТВ, чтобы потери от задержки урожая и простоев соответствующих средств были минимальными.

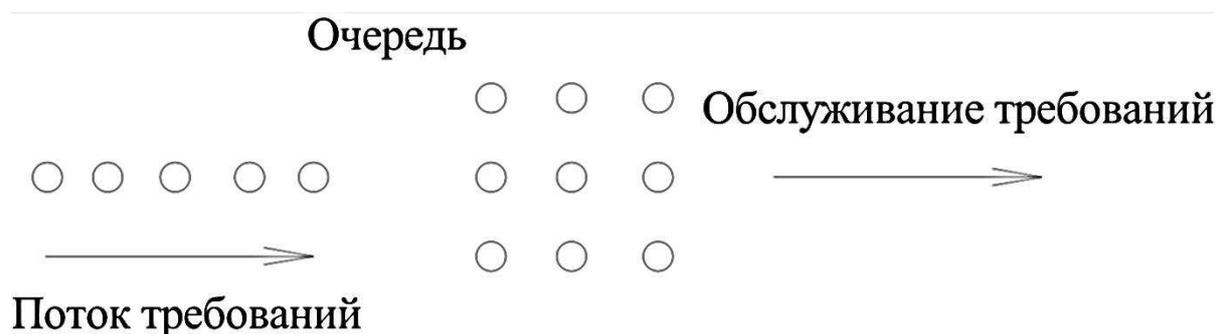


Рисунок 2 – Принципиальная схема функционирования УТЗ как однофазной разомкнутой системы МО с ожиданием.

В этой задаче возможны два критерия оптимальности:

– минимум продолжительности времени пребывания в системе 11:

$$T_c = T_{\phi 1} \rightarrow \min, \tag{11}$$

– минимум сумма потерь от взаимного ожидания за 1 час работы в системе 12:

$$C_{пт} = n_{10} \cdot G \cdot V_{ц} \cdot Ц_{з} + m_{по} \cdot Ц_{по} \cdot П_{то} \cdot Ц_{то} \rightarrow \min, \tag{12}$$

где  $T_{\phi 1}$ ,  $T_{\phi 2}$  – продолжительности пребывания каждого требования соответственно в первой и второй фазах, ч;

$C_{пт}$  – сумма потерь;

$\Pi_{10}$ ,  $\Pi_{20}$  – количество требований соответственно в первой и второй фазах (ожидания и обслуживания);

$G$  – масса зерна, соответствующая одному требованию, Т;

$V_{п}$  – доля цели зерна, теряемая за 1 час, руб/ч;

$\Pi_3$  – закупочная цена зерна, руб/т;

$\Pi_0$ ,  $\Pi_{т0}$  – количество простаивающих комбайнов и транспортных средств;

$\Pi_{п0}$ ,  $\Pi_{т0}$  – соответствующие потери от простоев, руб/ч.

Численные значения показателей работы СМО в (9) и (10) определяются методами теории массового обслуживания (ТМО). Для этого предварительно необходимо установить характер потока требований. Согласно многочисленным исследованиям по уборке зерновых культур в качестве принимает простейший поток требований, описываемый распределением Пуассона в формуле 13 [14]:

$$P_{k(t)} = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t}, \quad (13)$$

где  $P_{k(t)}$  – вероятность поступления в систему равно  $K$  – требований за промежуток времени  $t$ ;

$\lambda$  – плотность потока требований, 1/ч.

В качестве исход гипотезы предполагается также, что продолжительность времени одного обслуживания подчиняются нормальному закону с соответствующей  $t_{от}$  функцией распределения:

$$F = (t_{от}) = 1 - e^{-mt}, \quad (14)$$

где  $m$  – интенсивность обслуживания.

При этом в первой и второй фазам обслуживания соответствуют интенсивности  $M_1$  и  $M_2$ .

Все возможные состояния СМО характеризуются наличием  $i$  – требований в первой фазе и  $j$  – во второй (рис. 3). Численные значения вероятностей  $P_{ij}$  пребывания рассматриваемой СМО в указанных состояниях при наличии простейшего потока требований определяются на основании конкретной системы дифференциальных уравнений 15 [15]:

$$\begin{aligned}
 P'_{00} &= -\lambda \cdot P_{00} + M_2 \cdot P_{0,1}, \\
 P''_{0n2} &= -(\lambda + M_2) \cdot P_{0,2} + M_1 \cdot P_{1(n-1)} + M_2 \cdot P_{0(n2+1)}, \\
 P'_{n1,0} &= -(\lambda + M) \cdot P_{n1,0} + M_2 \cdot P_{n1,j} + \lambda \cdot P_{(n1-1),0}, \\
 P'_{n1,n2} &= -(\lambda + M_1 + M_2) \cdot P_{n1,n2} + n_1 \cdot P_{(n1+1) \cdot (n2-1)} + M_2 \cdot P_{n1 \cdot (n2+\lambda)} + \\
 &\quad + \lambda \cdot P_{(n1-1) \cdot n2},
 \end{aligned} \tag{15}$$

где  $\lambda$  – плотность потока требований, 1/ч;

$M_1$   $M_2$  – интенсивности обслуживания требований соответственно в первой и второй фазах, 1/ч;

$\Pi_1$   $\Pi_2$  – количество требований соответственно в первой и второй фазах.

Под  $M_1$  подразумевается количество бункеров комбайна заполненный зерном за 1 час. Аналогично  $M_2$  соответствующий количеству бункеров с зернами перевозимых транспортным средством за 1 час.

Плотность потока, требований  $\lambda$  зависит от количества комбайнов в звене  $n_1$  и определяется из равенства 16:

$$\lambda = \frac{1}{t_{kn}} = \frac{n_y \cdot Q}{t_{об}} = \frac{n_y \cdot W}{n_{об} \cdot Q} \tag{16}$$

где  $t_{kn}$  – средняя продолжительность заполнения бункера зерном;

$t$  – средняя продолжительность заполнения кузова;

$n_y$  – количество комбайнов в звене;

$Q$  – вместимость бункера  $t$ .

Интенсивность обслуживания в первой фазе составит (формула 17):

$$M_1 = \frac{m_{п}}{t_{цт}}, \quad (17)$$

где  $m_{п}$  – количество заполняемых бункеров в звеньях;

$t_{цт}$  – средняя продолжительность одного такого.

Аналогичным образом определяется интенсивность обслуживания транспортными средствами второй фазе (формула 18):

$$M_2 = \frac{n_{т} \cdot n_{пк}}{t_{цт}}, \quad (18)$$

где  $n_{т}$  – количество транспортных органов второй фазе;

$n_{пк}$  – количество обслуживаемых бункеров за 1 рейс;

$t_{цт}$  – средняя продолжительность цикла транспортного агрегата ч.;

Численные значимые  $n$  и  $t_{цт}$  определяются расчетным или опытным путем.

Равенства (9–15) позволяют установить оптимальные количественные соотношения между уборочными (комбайнами) и транспортными (накопителями-перегрузчиками) средствами. Для этого предварительно надо решить систему дифференцированных уравнений (12) и определить соответствующие показатели функционирования СМО. Поскольку рассматриваемой СМО основным является установившейся режим работы при  $t \rightarrow \infty$ , то можно принять  $P_{0,0} = P_{n_1 n_0} = P_{n_1 n_2} = 0$ . При этом вместо (12) получим систему алгебраических уравнений, из которых можно определить вероятности пребывания СМО в состоянии  $P_{0,0,1...}$   $P_{0,n,2...}$   $P_{n_1,0...}$   $P_{n_1,n_2}$ , а так же и другие комплексные показатели системы. Прежде всего необходимо определить оптимальность. Количество требований, находясь в первой  $n_1$  и второй  $n_2$  фазах (ожидających и обслуживаемых) в (10) определяются собственно из уравнения 19–21:

$$n_{10} = \frac{\mathcal{L}_1}{1-\mathcal{L}_1}, \quad (19)$$

$$n_{20} = \frac{\mathcal{L}_2}{1-\mathcal{L}_2} \text{ при } \mathcal{L}_1 \leq 1, \mathcal{L}_2 \leq 1, \quad (20)$$

$$\mathcal{L}_1 = \frac{\lambda}{M_1}; \quad \mathcal{L}_2 = \frac{\lambda}{M_2}, \quad (21)$$

Количество простаивающих комбайнов и транспортных средств можно определить с учетом составляющих коэффициентов простоя  $K_{по}$  и  $K_{то}$ :

$$M_{по} = M_{п} \cdot K_{по} = M_{п} \cdot \mathcal{L}_2(1-\mathcal{L}), \quad (22)$$

$$n_{то} = n_{т} \cdot K_{то} = n_{1} \cdot \mathcal{L}_1(1-\mathcal{L}_2), \quad (23)$$

где  $M_{по}$ ,  $n_{т}$  – общее количество комбайнов и транспортных средств;

$K_{по}$  – коэффициент простоя комбайна

$K_{то}$  – коэффициент простоя транспортных средств

Численные значения  $T_{\phi 1}$  и  $T_{\phi 2}$  в (8) определяется с учетом 13, 16, 17 в виде формул 24 и 25:

$$T_{\phi 1} = \frac{n_{10}}{\lambda} = \frac{\mathcal{L}_1 \cdot Q}{(1-\mathcal{L}_1) \cdot n_{у} \cdot W'} \quad (24)$$

$$T_{\phi 2} = \frac{n_{20}}{\lambda} = \frac{\mathcal{L}_2 \cdot Q}{(1-\mathcal{L}_2) \cdot n_{у} \cdot W'} \quad (25)$$

На основании (9, 10), а так же (13–22) можно определить численным решением оптимальный состав уборочно-транспортных звеньев.

Основным результатом оптимизации на четвертом этапе в соответствии с рисунком 1 является оптимальное количество в составе УТЗ уборочных  $n_{уopt}$  и транспортных  $n_{тоpt}$  средств.

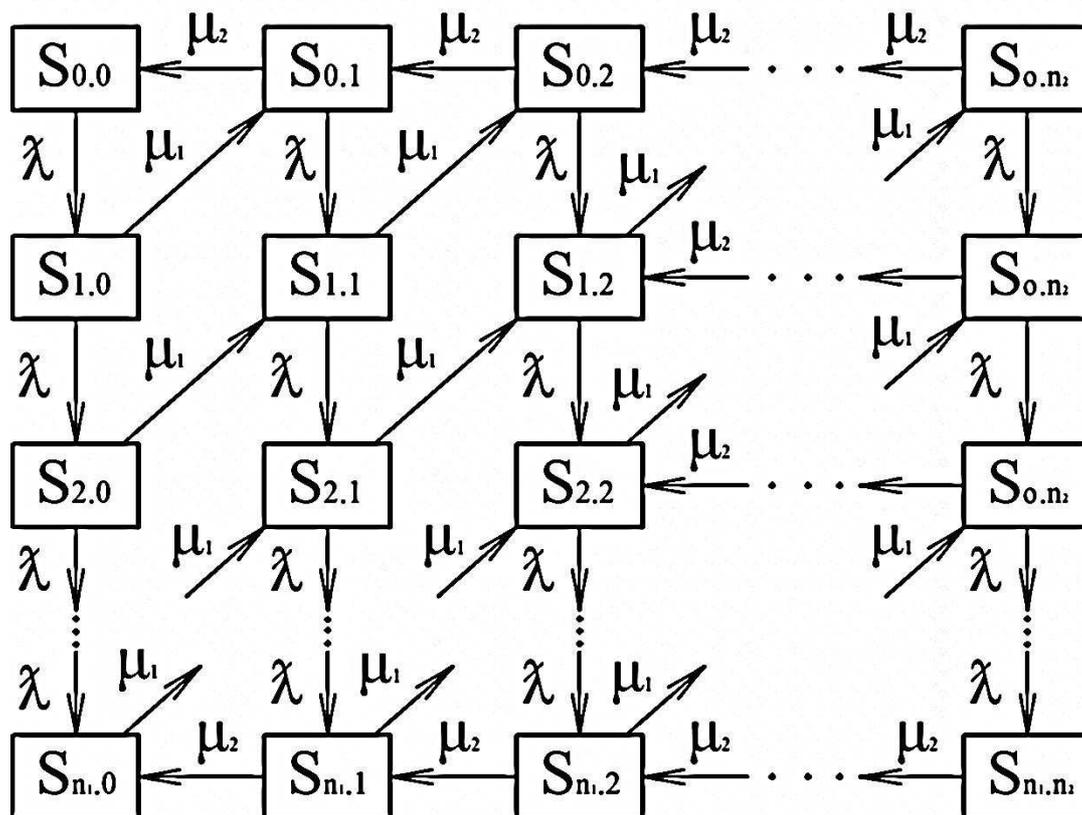


Рисунок 3 – Граф возможных состояний СМО

Пятый уровень оптимизации обосновывает решением работы механизированного тока – прием вороха, разделение его на стационаре, доработка зерна и складирование всех компонентов урожая: товарного зерна, семенного, отходов и половы. Как видно, в основе технологии лежит «невейка». Ее эффективность проверена и доказана практикой в Канаде [9].

Для слаженной работы премного пункта необходимо определить его пропускную способность с интенсивностью потока прибывающих с зерном накопителей – перегрузчиков (транспортных средств). Последние прибывают от разных звеньев, с разных полей и на различных расстояниях от тока. Различными будут также урожайность, дорожные условия, технические характеристики самих транспортных средств. Все указанные факторы по своей природе являются случайными и соответственно поток прибывающих на ток перегрузчиков также будет случайным,

вероятностным. Этот поток складывается из рассмотренных выше частных пуассоновских, поэтому он также описывается формулой (11). Из изложенного следует, что взаимосвязанное функционирование приемного пункта и обслуживаемых транспортных средств можно также рассматривать как СМО. Если в момент прибытия очередного транспортного средства приемный пункт занят обслуживанием других требований, то оно становится в очередь на площадке ограничено, значит будет иметь место разомкнутая СМО с ожиданием при ограниченном количестве мест в очереди  $m$ . На рисунке 4 представлена принципиальная схема функционирования, а на рисунке 5 – граф возможных состояний СМО.

Транспортные средства, прибывающие на приемный пункт в момент, когда знаки все  $m$  мест для ожидания, располагаются за пределами пункта, т.к. как бы получают отказ. При этом возможны следующие состояния СМО:  $S_0$  – пункт простаивает из-за отсутствия транспортных средств;  $S_1$  – на пункте одно транспортное средство;  $S_2$  – на пункте два транспортных средства, из которых одно обслуживается, а другое ожидает;  $S_k$  – пункт занят, а  $k-1$  транспортных средств ожидают в очереди. Количество  $m$  – транспортных средств ожидает в очереди. Количество мест в очереди определяется площадью стоянки перед пунктом и ограничено значением  $m$ .

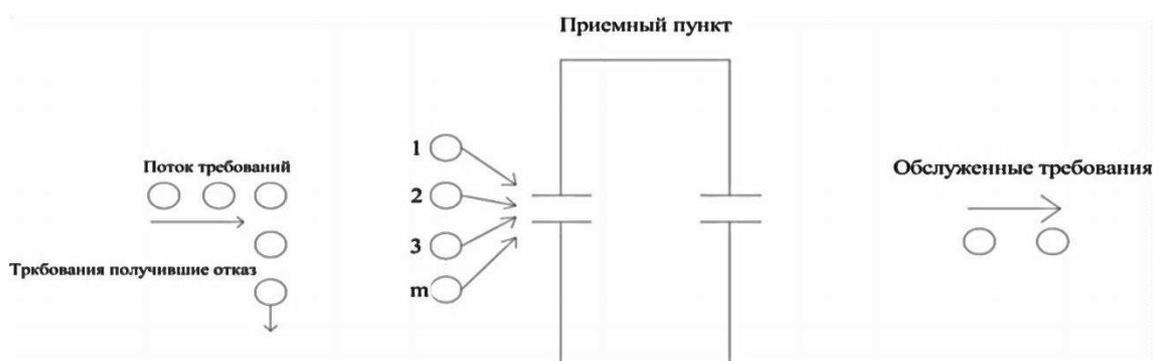


Рисунок 4 – Принципиальная схема работы приемного пункта как одноканальный СМО с ожиданием при ограниченном количестве мест в очереди

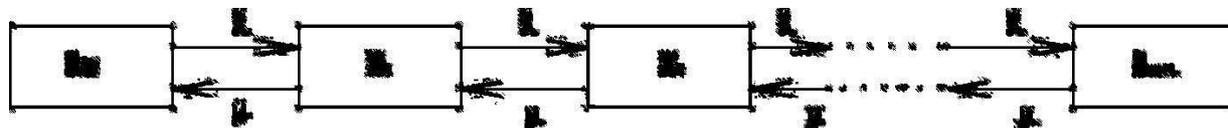


Рисунок 5 – Граф возможных состояний СМО

Таким образом, задача рациональной организации работы приемного пункта (мехтока) заключается в установлении оптимальных соотношений между плотностью потока требований  $\lambda_{opt}$  и интенсивностью  $M_{0opt}$  их обслуживание в виде  $L_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{M_{0opt}}$ , а также в определении соответствующего количества мест в очереди  $m_{opt}$ . По значениям  $L_{opt}$  и  $m_{opt}$  рассчитывают оптимальную вероятность отказа  $P_{отк\ opt}$ , пропускную способность мехтока  $\Pi_{порт}$  и потребную площадь приемной площадки, сочетание которых на рисунке 1 рассматриваются как оптимальный режим работы  $P_{рп\ opt}$  приемного пункта.

Упрощенно на рисунке 4 приемный пункт рассматривается как одно обслуживающее звено, интенсивность работы которого может изменяться разными способами, включая повышение производительности агрегата для очистки зернового вороха МН 230 ( Канада). Увеличение количества постов и др.

В качестве основного критерия оптимальности на пятом уровне принимают минимум суммы потерь от простоев приемного пункта и одного транспортного средства в виде формулы 26:

$$C_{п} = P_{по} \cdot C_{по} + \Pi_{то} \cdot C_{то} \rightarrow \min, \quad (26)$$

где  $C_{п}$  – сумма потерь, руб/ч;  $P_{по}$  – средняя вероятность простоя приемного пункта;

$\Pi_{то}$  – среднее количество ожидающих в очереди транспортных средств;

$\Pi_{по}, \Pi_{то}$  – потери от простоев приемного пункта и одного транспортного средства, руб/ч.

Поскольку определить  $\Pi_{по}$  и  $\Pi_{то}$  очень сложно, лучше перейти к критерию в относительных безразмерных единицах, представленных в формуле 27.

$$C_{п} = \frac{C_{п}}{\Pi_{по} + \Pi_{то}} = P_{по} \cdot E_{п} + n_{то} \cdot E_{т} \rightarrow \min, \quad (27)$$

где  $E_{п} = \frac{\Pi_{по}}{\Pi_{по} + \Pi_{то}};$

$$E_{т} = \frac{\Pi_{то}}{\Pi_{по} + \Pi_{то}}.$$

На основании теории массового обслуживания [14] для определения  $P_{по}$  и  $\Pi_{то}$  получены выражения 28 и 29:

$$P_{по} = \frac{1 - \mathcal{L}}{1 - \mathcal{L}^{m+2}}, \quad (28)$$

$$\Pi_{то} = \frac{\mathcal{L}^2 \cdot (1 - \mathcal{L}^m (m+1 - m \cdot 2))}{(1 - \mathcal{L}^{m+2}) \cdot (1 - 2)}, \quad (29)$$

где  $\mathcal{L} = \lambda/m$ ;

$\lambda$  – средняя плотность потока требований 1/ч;

$M$  – средняя интенсивность обслуживания одного требования, 1/ч.

Важным показателем функционирования СМО является также вероятность отказа в приеме транспортного средства с зерновым ворохом, представленный в уравнении 30:

$$P_{отк} = \frac{1 - \mathcal{L}}{1 - \mathcal{L}^{m+2}} \cdot \mathcal{L}^{m+1} = P_{по} \cdot \mathcal{L}^{m+1}, \quad (30)$$

На основании формул (24–27) будут определены при  $C_{п} \min$  оптимальные сочетания  $\mathcal{L}_{opt}$ ,  $P_{по \ opt}$ ,  $\Pi_{т \ opt}$ ,  $P_{отк \ opt}$  при всех основных значениях  $m$ ,  $E_{п}$  и  $E_{т}$ .

В качестве вспомогательного критерия оптимальности на 5-ом уровне может быть рассмотрен также минимум времени ожидания транспортных средств в очереди (формула 31, 32):

$$T_{ож} \rightarrow \min, \quad (31)$$

Или ограничение

$$T_{ож} \leq T_{ожп}, \quad (32)$$

где  $T_{ож}$  – предельно допустимое время ожидания транспортных средств в очереди перед мехтоком.

Полученные равенства позволяют обосновать параметры и оптимальный режим работы приемного пункта (мехтока) в зависимости от сложившихся условий работы.

#### Список литературы

1. Маслов, Г. Г. Перспективы комплексной уборки зерновых культур: монография / Г. Г. Маслов, А. В. Палапин, Н. А. Ринас. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 87 с.
2. Зангиев, А. А. Оптимизация параметров и режимов работы агрегатов для уборки зерновых культур по индустриально-поточной технологии / А. А. Зангиев, О. П. Андреев. – М. : Информагротех, 1996. – 124 с.
3. Погорелый, Л. В. Научные основы повышения производительности сельскохозяйственной техники / Л. В. Погорелый. – К. : Урожай, 1989. – 240 с.
4. Зангиев, А. А. Оптимизация производственных процессов по заготовке и реализации картофеля / А. А. Зангиев, О. Н. Дидманидзе, В. С. Мотылев. – М. : Колос, 1997. – 118 с.
5. Гатаулин, А. М. Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве / А. М. Гатаулин, Г. В. Гаврилов и др.; Под ред. А. М. Гатаулина. – М., 1990. – 432 с.
6. Морозов, А. Ф. Пути снижения потерь зерна при уборке урожая / А. Ф. Морозов, А. Н. Пугачев. – М. : Колос, 1969. – 248 с.
7. Маслов, Г. Г. Оптимизация продолжительности уборки озимой пшеницы многофункциональным агрегатом / Г. Г. Маслов // Тракторы и сельхозмашины, 2016. – № 6 – С. 48–50.

8. Бурьянов, А. И. Технология уборки зерновых культур с разделением вороха на стационаре / А. И. Бурьянов, Н. Г. Зубкова. – В сб. : Новые ресурсосберегательные технологии и техника в полеводстве юга России: исследования, испытания, результаты. –Зерноград: ВНИПТИМЭСК, 2006. – С. 45–52.

9. Гейдебрехт, И. П. Канадская технология уборки сельскохозяйственных культур / И. П. Гейдебрехт // Техника и оборудование для села, 2006. – № 4. – С. 39–40.

10. Система земледелия Краснодарского края на агроландшафтной основе. – Краснодар, 2015. – 352 с.

11. Методические рекомендации по выбору конкурентноспособных зерноуборочных комбайнов для сельскохозяйственных товаропроизводителей Краснодарского края. – Краснодар, 2009. – 59 с.

12. Липовский, М. И. Улучшение качества работы роторных комбайнов / М. И. Липовский // Сельскохозяйственные машины и технологии, 2014. – № 2. – 43 с.

13. Жалнин, Э. В. Технологии уборки зерновых комбайновыми агрегатами / Э. В. Жалнин, А. Н. Савченко. – М. : Россельхозиздат, 1985. – 207 с.

14. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Сов.радио, 1972. – 552 с.

15. Новиков, О. А. Прикладные вопросы теории массового обслуживания / О. А. Новиков, С. И. Петухов. – М. : Сов.радио, 1969. – 400 с.

#### References

1. Maslov, G. G. Perspektivy kompleksnoj uborki zernovyh kul'tur: monografija / G. G. Maslov, A. V. Palapin, N. A. Rinas. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – 87 s.

2. Zangiev, A. A. Optimizacija parametrov i rezhimov raboty agregatov dlja uborki zernovyh kul'tur po industrial'no-potočnoj tehnologii / A. A. Zangiev, O. P. Andreev. – M. : Informagroteh, 1996. – 124 s.

3. Pogorelyj, L. V. Nauchnye osnovy povyshenija proizvoditel'nosti sel'skohozjajstvennoj tehniki / L. V. Pogorelyj. – K. :Urozhaj, 1989. – 240 s.

4. Zangiev, A. A. Optimizacija proizvodstvennyh processov po zagotovke i realizacii kartofelja / A. A. Zangiev, O. N. Didmanidze, V. S. Motylev. – M. : Kolos, 1997. – 118 s.

5. Gataulin, A. M. Matematicheskoe modelirovanie jekonomicheskikh processov v sel'skom hozjajstve / A.M. Gataulin, G.V. Gavrilov i dr.; Pod red. A. M. Gataulina. – M., 1990. – 432 s.

6. Morozov, A. F. Puti snizhenija poter' zerna pri uborke urozhaja / A. F. Morozov, A. N. Pugachev. – M. : Kolos, 1969. – 248 s.

7. Maslov, G. G. Optimizacija prodolzhitel'nosti uborki ozimoj pshenicy mnogofunkcional'nym agregatom / G. G. Maslov // Traktory i sel'hozmashiny, 2016. – № 6 – S. 48–50.

8. Bur'janov, A. I. Tehnologija uborki zernovyh kul'tur s razdeleniem voroha na stacionare / A. I. Bur'janov, N. G. Zubkova. – V sb. : Novye resursosberegatel'nye tehnologii i tehnika v polevodstve juga Rossii: issledovanija, ispytanija, rezul'taty. –Zernograd: VNIPTIMJeSK, 2006. – S. 45–52.

9. Gejdebreht, I. P. Kanadskaja tehnologija uborki sel'skohozjajstvennyh kul'tur / I. P. Gejdebreht // Tehnika i oborudovanie dlja sela, 2006. – № 4. – S. 39–40.

10. Sistema zemledelija Krasnodarskogo kraja na agrolandshaftnoj osnove. – Krasnodar, 2015. – 352 s.

11. Metodicheskie rekomendacii po vyboru konkurentnosposobnyh zernouborochnyh kombajnov dlja sel'hozjajstvennyh tovaroproizvoditelej Krasnodarskogo kraja. – Krasnodar, 2009. – 59 s.

12. Lipovskij, M. I. Uluchshenie kachestva raboty rotornyh kombajnov / M. I. Lipovskij // Sel'skohozjajstvennye mashiny i tehnologii, 2014. – № 2. – 43 s.

13. Zhalnin, Je. V. Tehnologii uborki zernovyh kombajnovymi agregatami / Je. V. Zhalnin, A. N. Savchenko. – M. : Rossel'hozizdat, 1985. – 207 s.

14. Ventcel', E. S. Issledovanie operacij / E. S. Ventcel'. – M. : Sov.radio, 1972. – 552 s.

15. Novikov, O. A. Prikladnye voprosy teorii massovogo obsluzhivanija / O. A. Novikov, S. I. Petuhov. – M. : Sov.radio, 1969. – 400 s.