

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.348.45

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-246-4-69-75

В.И. Беляев, Д.Н. Пирожков, А.С. Ковалев

V.I. Belyaev, D.N. Pirozhkov, A.S. Kovalev

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЫСКИВАНИЯ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (БАС) КВАДРОКОПТЕРНОГО ТИПА

### DETERMINING THE EFFICIENCY OF PLANT SPRAYING USING A QUADCOPTER-TYPE UNMANNED AERIAL SYSTEM (UAS)

**Ключевые слова:** опрыскивание сельскохозяйственных культур, беспилотная авиационная система, квадрокоптер, эффективность возделывания, размер капли, доза внесения, скорость полета.

Объектом исследования является технология внесения жидких препаратов, применяемых в растениеводстве, с использованием беспилотной авиационной системы квадрокоптерного типа. Обработка яровой пшеницы проводилась с использованием квадрокоптера XAGP100, имеющего форсунки центробежного типа, расположенные справа и слева от продольной оси аппарата. В качестве критерия оптимизации принималась площадь покрытия листа растения распыляемой жидкостью. Оценивалось влияние факторов: высота полета, скорость полета, диаметр капли, доза внесения, расстояние от оси траектории полета до точки отбора материала (ширина захвата). Эффективность опрыскивания оценивалась по площади покрытия листа пшеницы раствором при помощи технологии DropSight®. В воду добавлялось окрашивающее вещество, которое флуоресцирует в ультрафиолетовом спектре. Листья растений, покрытые раствором после пролета квадрокоптера с включенными форсунками, собирались, помещались в специальную камеру, оснащенную ультрафиолетовым светильником. Делались фотоснимки листьев с обеих сторон, сверху и снизу. Полученные фотографии обрабатывались при помощи специального программного обеспечения, которое оценивает покрытую раствором площадь листа в процентах от общей площади. По результату проведенного эксперимента получено уравнение регрессии, произведена оценка значимости факторов, получен возможный теоретический максимум критерия оптимизации. Наиболее значимыми из 5 факторов оказались 2: доза внесения препарата и расстояние от

оси траектории полета до точки отбора материала. Наибольшая равномерность распределения раствора по ширине захвата достигается при минимальных значениях всех факторов на их уровнях, использовавшихся в эксперименте. Приведены величины факторов, при которых достигается максимальное значение критерия оптимизации.

**Keywords:** crop spraying, unmanned aerial system, quadcopter, crop growing efficiency, droplet size, application rate, flying speed.

The research target is the technology of applying liquid agents used in crop growing by using an unmanned quadcopter-type aerial system. Spring wheat was treated by using the XAG P100 quadcopter with centrifugal nozzles. The coverage area of a plant leaf with a sprayed liquid was taken as an optimization criterion. The influence of the following factors was evaluated: flight altitude, flight speed, drop diameter, application rate, and the distance from the axis of the flight path to the material selection point (operating width). The effectiveness of spraying was evaluated by the surface area of the wheat leaf sprayed with the solution using DropSight® technology. A coloring agent that fluoresces in the ultraviolet spectrum was added to the water. The leaves of the plants covered with the solution after the flight of the quadcopter with the nozzles turned on were collected and placed in a special chamber equipped with an ultraviolet lamp. Photographs of the leaves were taken from both sides - top and bottom. The obtained photographs were processed using special software that evaluated the area of the leaf covered with the solution as a percentage of the total area. Based on the result of the experiment, a regression equation was obtained, the significance of the factors was assessed, and the possible theoretical maximum of the optimization crite-

tion was obtained. The most significant of the five factors were two: the rate of the agent and the distance from the axis of the flight path to the sampling point. The greatest uniformity of the solution distribution over the operating

width is achieved with the minimum values of all factors at their levels used in the experiment. The values of the factors at which the maximum value of the optimization criterion is achieved are given.

**Беляев Владимир Иванович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Сельскохозяйственная техника и технологии», ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: prof-belyaev@yandex.ru.

**Пирожков Дмитрий Николаевич**, д.т.н., доцент, профессор кафедры, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: mms.asau@yandex.ru.

**Ковалев Алексей Сергеевич**, генеральный директор, ООО «Хизара», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: hizara@internet.ru.

**Belyaev Vladimir Ivanovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Agricultural Machinery and Technologies, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: prof-belyaev@yandex.ru.

**Pirozhkov Dmitriy Nikolaevich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: mms.asau@yandex.ru.

**Kovalev Aleksey Sergeevich**, General Director, ООО Khizara, Barnaul, Russian Federation, e-mail: hizara@internet.ru.

### Введение

В настоящее время не только в нашей стране, но и во всем мире проявляется огромный интерес к использованию беспилотных авиационных систем во всех сферах деятельности. Авиационные беспилотники разных размеров и типов начинают использовать для транспортировки, мониторинга, картографии, и, конечно же, сельского хозяйства. В данной работе рассмотрим использование дронов для обработки сельскохозяйственных культур путем распыления жидких препаратов, которые производят для защиты растений, гербицидной обработки, десикации и других технологических операций в растениеводстве. Использование для подобных целей дронов началось достаточно недавно, об их эффективности в сравнении с традиционными технологиями внесения жидких препаратов для растениеводства ведутся жаркие споры. Мы не будем здесь рассматривать вопросы экономической целесообразности использования БАС в сравнении с традиционными технологиями. В литературе [1-3] на сегодняшний день содержится информация только общего плана, основанная не столько на исследованиях, сколько на умозаключениях о том, какие факторы и параметры полета, дозы внесения препаратов, температуры и влажности воздуха, скорости ветра и множества других переменных влияют на показатели эффективности операции опрыскивания растений жидким препаратом. Наиболее детальную информацию по данному вопросу удалось найти лишь в материалах Поволжской МИС [4], но и она не дает полного понимания, каким образом необходимо проводить обработку посевов квадрокоптерами для получения наилучшего результата. Вос-

полнить данный пробел, дать строгую числовую характеристику некоторым факторам, оказывающим влияние на процесс опрыскивания, как это было сделано нами в отношении других процессов [5, 6], и призвана данная публикация. Необходимо сразу оговориться, что проведенные экспериментальные исследования по обработке жидким препаратом яровой пшеницы проводились не в самых лучших для обработки дронами погодных условиях. Полученные результаты актуальны именно для конкретных условий проведения опыта, но они, несомненно, могут проецироваться и на другие условия использования БАС для опрыскивания, но с некоторыми оговорками.

**Цель** – оценка значимости и влияния различных факторов на эффективность процесса опрыскивания сельскохозяйственных культур с использованием БАС квадрокоптерного типа.

#### Задачи:

- 1) провести эксперимент по опрыскиванию яровой пшеницы с использованием БАС квадрокоптерного типа;
- 2) исследовать влияние высоты полета, скорости полета, размера капель, нормы вылива препарата и расстояния от оси полетной траектории на эффективность опрыскивания;
- 3) оценить значимость влияния исследуемых факторов на процесс опрыскивания.

#### Объекты и методы

Опыты проводились 24 июля 2024 г. в Калманском районе Алтайского края на полях хозяйства ООО «Лео», расположенных близ с. Панфилово. Погодные условия проведения эксперимента следующие: отсутствие осадков и облачности, температура воздуха 28°C, отно-

сительная влажность воздуха около 40%, скорость ветра около 2 м/с. Опрыскиванию подвергалась яровая пшеница в фазе цветения (рис. 1).



**Рис. 1. Поле для проведения эксперимента**

В качестве орудия обработки использовался квадрокоптер XAGP100 (рис. 2) [7], в который был залит раствор для опрыскивания объемом около 10 л. При этом взлетный вес квадрокоптера составлял около 50 кг. Квадрокоптер оснащен двумя центробежными форсунками с максимальной производительностью 12 л/мин., способными распылять раствор с диаметром капли от 60 до 400 мкм. Эффективность опрыскивания оценивалась по площади покрытия листа пшеницы раствором при помощи технологии DropSight® [8]. В воду добавлялось окрашивающее вещество, которое флюоресци-

рует в ультрафиолетовом спектре. Листья растений, покрытые полученным раствором, помещались в специальную камеру, оснащенную ультрафиолетовым светильником. Делались фотоснимки листьев, и при помощи специального программного обеспечения получали процент покрытия площади листа раствором.



**Рис. 2. Агродрон XAGP100**

Критерием оптимизации принималась площадь покрытия листа растения распыляемой жидкостью, которая определялась в процентах от общей площади листа. Причем, для установления площади покрытия обследовались обе поверхности листа, и верхняя, и нижняя. Площадь покрытия определялась путем фотографирования обработанной поверхности листа. Пример фотографии показан на рисунке 3.



**Рис. 3. Фотография обработанного листа в ультрафиолетовом свете**

### Экспериментальная часть

Оценивалось влияние пяти факторов: высота полета, скорость полета, диаметр капли, доза внесения, расстояние от оси траектории полета до точки отбора материала (ширина захвата). Таблица кодирования факторов на двух уровнях представлена в таблице.

**Таблица**

**Таблица кодирования факторов**

Фактор	Код	Уровни	
		-1	1
Высота полета, м	X <sub>1</sub>	3	5
Скорость полета, м/с	X <sub>2</sub>	8	14
Диаметр капли, мкм	X <sub>3</sub>	80	140
Доза внесения, л/га	X <sub>4</sub>	6	10
Расстояние от линии пролета, м	X <sub>5</sub>	1	5

Эксперимент проводился полнофакторный 2<sup>4</sup> для первых 4 факторов и с изменением фактора 5 на пяти уровнях с интервалом 1 м. Количество опытов в эксперименте составило 80, повторность опытов трехкратная. Смежные проходы квадрокоптера над полем размечались на расстоянии, исключающем взаимное перекрытие (рис. 4).

Пробы отбирались в тех местах, где параметры полета и работы форсунок являлись установившимися. С растений отбирались листья преимущественно верхнего яруса таким образом, чтобы их длина была в пределах 100-150 мм, а форма была как можно ближе к плоской. Такой выбор листьев обусловлен особенностями их размещения и фотографирования в боксе с ультрафиолетовым светильником.





*Рис. 4. Проход квадрокоптера над полем*

### Результаты исследований и их обсуждение

В результате обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии:

$$Y = 0,182 + 0,033X_4 + 0,058X_5 + 0,026X_1X_3 + 0,022X_1X_4 - 0,033X_4X_5.$$

Величина коэффициента детерминации  $R^2$  при принятом 5%-ном уровне значимости для уравнения равна 0,595, что позволяет считать эксперимент воспроизводимым, а его результаты значимыми. Из пяти исследуемых факторов наиболее значимыми являются два: доза внесения ( $X_4$ ) и расстояние от оси траектории полета до точки отбора материала ( $X_5$ ). Доза внесения ( $X_4$ ) положительно сказывается на площади покрытия листа, а удаление от оси пролета ( $X_5$ ) – отрицательно, что вполне логично. Причем их взаимное влияние  $X_4X_5$  также значимо, совместное увеличение факторов ведет к снижению площади покрытия листа. Наиболее значимым фактором является расстояние от оси пролета ( $X_5$ ), что также вполне объяснимо. Выявлено значимое взаимное влияние факторов  $X_1X_3$  и  $X_1X_4$  на площадь покрытия листа, которая увеличивается при совместном увеличении факторов в исследуемых пределах. Из анализа значимых взаимодействий факторов, согласно уравнению, следует, что для увеличения площади покрытия листа нужно с увеличением высоты полета ( $X_1$ ) увеличивать как диаметр капли, так и дозу внесения препарата. Но при увеличении дозы внесения неравномерность покрытия листа по ширине захвата будет возрастать.

Определен максимум критерия оптимизации в пределах уровней варьирования факторов, указанных в таблице. Так, максимальная площадь покрытия листа согласно уравнению ре-

грессии составляет 0,31%. Максимум критерия оптимизации получен при крайних значениях всех значимых факторов, при этом высота полета должна составлять 3 м, диаметр капли – 80 мкм, доза внесения – 10 л/га, расстояние от оси пролета – 1 м. То есть все факторы, кроме дозы внесения, должны быть на минимальном уровне, а доза внесения – на максимальном, что согласуется с анализом значимости и влияния факторов, приведенном в предыдущем абзаце. Необходимо отметить, что при определении площади покрытия листа, чаще всего обе его поверхности, и верхняя, и нижняя, имели следы нанесения раствора. Но в подавляющем большинстве случаев нижняя поверхность была покрыта в разы меньше, чем верхняя. Можно констатировать, что завихрение потока воздуха, создаваемое винтами квадрокоптера, действительно позволяет наносить препараты на нижнюю поверхность листьев, но площадь покрытия листа снизу кардинально уступает величине покрытия сверху.

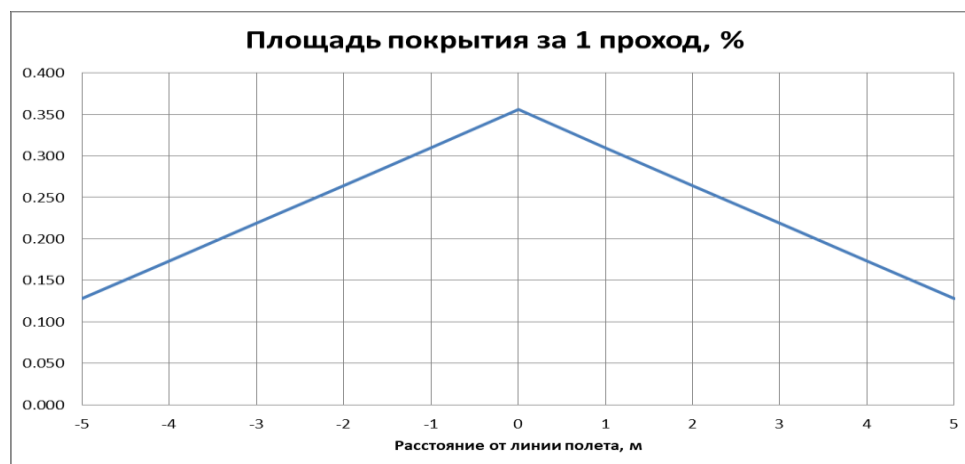
Оставив все факторы на уровнях, обеспечивающих максимум площади покрытия листа, и изменяя расстояние от оси пролета квадрокоптера, получили график (рис. 5).

На графике значения площади покрытия на расстоянии менее 1 м от оси пролета были экстраполированы согласно уравнению. Непосредственно под дроном площадь покрытия листа должна быть больше, так как здесь перекрываются рабочие зоны обеих форсунок квадрокоптера, расположенных справа и слева от его продольной оси, что подтверждает рисунок 5. Согласно полученному графику, равномерность распределения площади покрытия листа по ширине захвата отличается в центре и

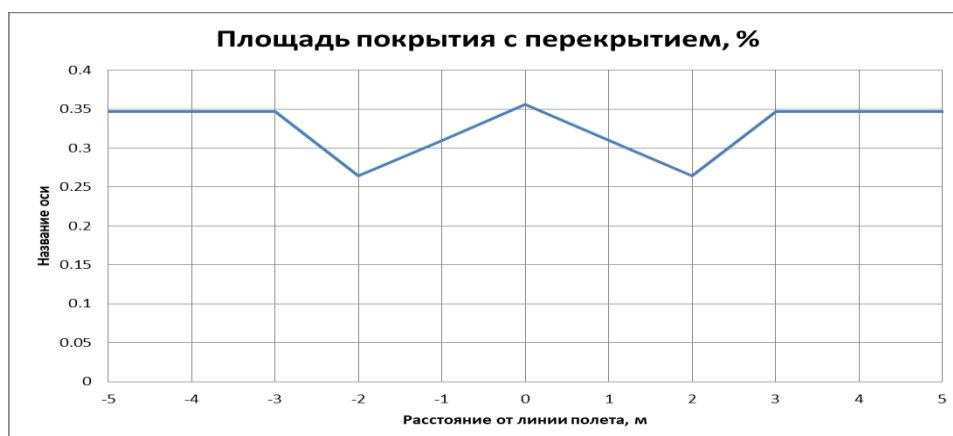
по краям прохода почти в три раза. Для получения более однородных результатов опрыскивания необходимо уменьшить ширину захвата. Если сделать перекрытие соседних проходов в 3 м, то получится наиболее равномерное нанесение препарата на растения (рис. 6).

Если же для достижения цели опрыскивания будет достаточно меньшего количества препа-

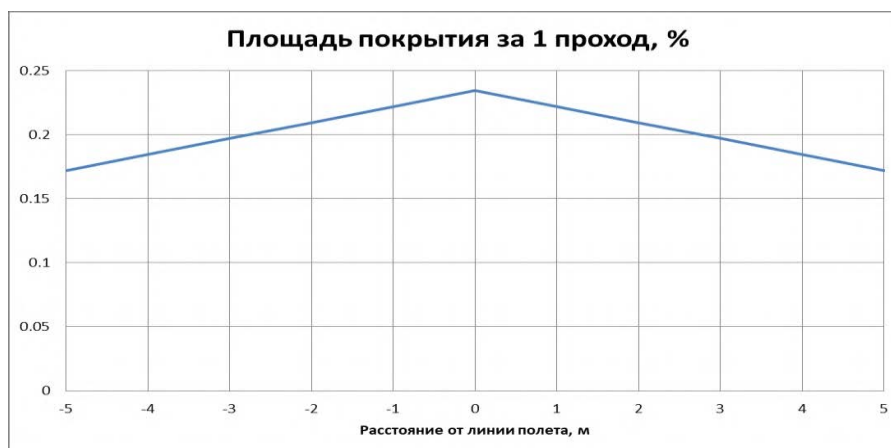
рата, то можно уменьшить дозу внесения до минимального значения в эксперименте – 6 л/га. При этом будет достигнуто наименьшее различие в распределении препарата по листу (рис. 7). Тогда ширину захвата можно оставить прежней, так как разница в количестве препарата по оси траектории и на краю полосы захвата будет не очень значительной.



**Рис. 5. Распределение площади покрытия листа по ширине захвата при дозе внесения 10 л/га**



**Рис. 6. Распределение площади покрытия листа по ширине захвата при дозе внесения 10 л/га и перекрытии в 3 м**



**Рис. 7. Распределение площади покрытия листа по ширине захвата при дозе внесения 6 л/га**

### Заключение

1. Проведенные экспериментальные исследования по оценке эффективности процесса опрыскивания яровой пшеницы с использованием БАС квадрокоптерного типа позволили выявить, что наиболее значимы факторами, влияющими на площадь покрытия листа препаратом, являются доза внесения препарата и расстояние растения от оси траектории полета квадрокоптера.

2. Максимальная площадь покрытия листа растения достигается при следующих значениях факторов: высота полета – 3 м, диаметр капли – 80 мкм, доза внесения – 10 л/га, расстояние от оси полета – 1 м.

3. Наибольшая равномерность распределения препарата по ширине захвата достигается при минимальной возможной дозе внесения препарата, поэтому параметры опрыскивания необходимо устанавливать на основе минимальной эффективной дозы внесения препарата.

### Библиографический список

1. Абдулхакимов, И. А. Применение высокотехнологических агродронов в сельском хозяйстве для повышения эффективности использования сельскохозяйственных угодий / И. А. Абдулхакимов. – Текст: непосредственный // Наука без границ. – 2021. – № 6 (58). – С. 79-87.
2. Оценка эффективности применения комплекса защиты растений на базе агродрона А60-Х / Ю. Леоновец, А. Кувшинов, А. Жуковский [и др.]. – Текст: непосредственный // Наука и инновации. – 2023. – № 11 (249). – С. 68-72.
3. Абрамов, В. И. Цифровые двойники с использованием агродронов в управлении растениеводством: особенности создания и перспективы // В. И. Абрамов, Д. М. Михайлов, А. Д. Столяров. – Текст: непосредственный // АПК: экономика, управление. – 2024. – № 4. – С. 37-49.
4. Практические рекомендации применения агродронов в сельском хозяйстве. – URL: [http://povmis.ru/files/2024/10/17/2\\_Бронников\\_Поволжская\\_мис\\_a097e.pdf](http://povmis.ru/files/2024/10/17/2_Бронников_Поволжская_мис_a097e.pdf) (дата обращения: 15.02.2025). – Текст: электронный.
5. Бачурин, Р. Н. Энергооценка машинно-тракторного агрегата при внесении жидких минеральных удобрений / Р. Н. Бачурин, В. И. Беляев, Д. Н. Пирожков. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 11 (181). – С. 144-149.
6. Федоренко, И. Я. Обоснование конструктивно-технологических параметров зерноочистительной машины на основе гидродинамической модели виброожиженного слоя зернистого материала / И. Я. Федоренко, Д. Н. Пирожков, А. С. Федоренко. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 1 (87). – С. 85-90.
7. XAG P100 Agricultural Drone Specs. – URL: <https://www.xa.com/en/p100/p100specs> (дата обращения: 15.02.2025). – Текст: электронный.
8. The easy-to-use scientifically developed tool to determine actual deposition is already a game changer in agriculture, sign up today! – URL: <https://dropsight.ag/> (дата обращения: 15.02.2025). – Текст: электронный.

### References

1. Abdulkhakimov, I.A. Primenenie vysokotekhnologicheskikh agrodronov v selskom khoziaistve dlia povysheniia effektivnosti ispolzovaniia selskokhoziaistvennykh ugodii / I.A. Abdulkhakimov // Nauka bez granits. – 2021. – No. 6 (58). – S. 79-87.
2. Leonovets, Iu. Otsenka effektivnosti primeneniia kompleksa zashchity rastenii na baze agrodrona A60-Kh / Iu. Leonovets, A. Kuvshinov, A. Zhukovskii, R. Korpanov, O. Lobach, L. Soroka // Nauka i innovatsii. – 2023. – No. 11 (249). – S. 68-72.
3. Abramov, V.I. Tsifrovye dvoyniki s ispolzovaniem agrodronov v upravlenii rastenievodstvom: osobennosti sozdaniia i perspektivy // V.I. Abramov, D.M. Mikhailov, A.D. Stoliarov // APK: ekonomika, upravlenie. – 2024. – No. 4. – S. 37-49.
4. Prakticheskie rekomendatsii primeneniia agrodronov v selskom khoziaistve. – URL: [http://povmis.ru/files/2024/10/17/2\\_Bronnikov\\_Povolzhskaya\\_mis\\_a097e.pdf](http://povmis.ru/files/2024/10/17/2_Bronnikov_Povolzhskaya_mis_a097e.pdf) (data obrashcheniia 15.02.2025).
5. Bachurin, R.N. Energootsenka mashinno-traktornogo agregata pri vnesenii zhidkikh mineralnykh udobrenii / R.N. Bachurin, V.I. Beliaev, D.N. Pirozhkov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 11 (181). – S. 144-149.
6. Fedorenko, I.Ia. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov zernoochistitelnoi mashiny na osnove gidrodinamicheskoi modeli vibroozhizhennogo sloia zernistogo materiala / I.Ia. Fedorenko, D.N. Pirozhkov, A.S. Fedorenko //

Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2012. – No. 1 (87). – S. 85-90.

7. XAG P100 Agricultural Drone Specs. – URL: <https://www.xa.com/en/p100/p100specs> (data obrashcheniia 15.02.2025).

8. The easy-to-use scientifically developed tool to determine actual deposition is already a game changer in agriculture, sign up today! – URL: <https://dropsight.ag/> (data obrashcheniia 15.02.2025).



УДК 631.372:631.51

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-246-4-75-81

Н.И. Селиванов, А.В. Кузнецов, Н.В. Кузьмин

N.I. Selivanov, A.V. Kuznetsov, N.V. Kuzmin

## ФОРМИРОВАНИЕ СЦЕПНОГО ВЕСА КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЧВООБРАБОТКИ

### FORMATION OF THE HITCH WEIGHT OF WHEELED TRACTORS FOR TILLAGE TECHNOLOGIES

**Ключевые слова:** колесный трактор, параметр-адаптер, балластирование, сцепной вес, технологии почвообработки, удельная масса.

сокращая затраты времени и средств на подготовку к работе.

**Keywords:** wheeled tractor, parameter-adaptor, ballasting, hitch weight, tillage technology, specific weight.

Цель работы – обоснование уровня и распределения по осям сцепного веса энергонасыщенных колесных тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов разного типа и технологического назначения. С учетом нормативных требований за основной параметр, определяющий номинальное тяговое усилие и класс трактора, приняты эксплуатационная, с полным балластом, масса и координаты центра, которым соответствуют эксплуатационный вес и центр тяжести, определяющие нормальные в статике реакции почвы на передние и задние колеса. Увеличение сцепного веса трактора до  $(0,05-0,16)G_E$  и перераспределение его по осям в режиме рабочего хода, обусловленное воздействием нормальной составляющей тягового сопротивления и веса рабочей машины, классифицировано как дополнительное балластирование. Условием адаптации колесных тракторов 4к4б к режиму рабочего хода при оптимальном центре тяжести (массы) в составе прицепных, полунавесных и навесных почвообрабатывающих агрегатов является обеспечение развесовки по осям в статике, соответственно,  $(0,55-0,56)$ ;  $(0,59-0,60)$  и  $(0,63-0,65)$ . В характерном для тракторов 4к4а интервале для указанных типов агрегатов центр тяжести составляет, соответственно,  $(0,40-0,44)$ ;  $(0,42-0,46)$  и  $(0,46-0,50)$ . Увеличение реакции почвы на колеса и сцепного веса тракторов, обусловленное воздействием нормальной составляющей тягового сопротивления и веса рабочей машины, достигает 5,5-16%. При формировании эксплуатационного веса тракторов целесообразно принять за основу эквиваленту – удельную массу в статике 58,0 кг/кВт с распределением по осям 0,60/0,40 для (4к4б)  $(0,40-0,45)$  и (4к4а) для  $(0,40-0,45)$ . Указанные параметры обеспечивают использование агрегатов в рациональных для технологий скоростных интервалах, снижают до минимума массу съемного балласта, существенно

The research goal is to substantiate the level and distribution of the hitch weight by the axes of high-powered wheeled tractors as part of tillage units of different types and technological purposes. Taking into account the normative requirements for the main parameter determining the nominal traction force and class of the tractor are taken operational, full ballast mass and the coordinates of the center which corresponds to the weight and the center of gravity which determine the normal static reactions of the soil to the front and rear wheels. The increase of the tractor hitch weight up to  $(0,05-0,16)G_E$  and its redistribution along the axes in the working run mode caused by the influence of the normal component of traction resistance and the weight of the working machine is classified as additional ballasting. The condition for adapting 4k4b wheeled tractors to the working run mode with at the optimum center of gravity (mass) as a part of trailed, semi-mounted and mounted tillage units is to provision of weight distribution on the axes in static, respectively:  $(0,55-0,56)$ ;  $(0,59-0,60)$  and  $(0,63-0,65)$ . In the range typical for 4k4a tractors, for these types of units, the center of gravity is respectively:  $(0,40-0,44)$ ;  $(0,42-0,46)$  and  $(0,46-0,50)$ . The increase of soil response to the wheels and the hitch weight of tractors, due to the influence of the normal component of traction resistance and the weight of the working machine, reaches 5.5-16%. When forming the operational weight of tractors, it is advisable to take as a basis the equivalent - specific gravity in statics 58,0 kg/kW with an axle distribution of 0.60/0.40 for (4k4b)  $(0,40-0,45)$  and (4k4a) for  $(0,40-0,45)$ . These parameters ensure the use of units in speed intervals that are rational for technology, reduce the mass of removable ballast to a minimum, significantly reducing the time and money spent on preparation for operation.