

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /  
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 631.21

DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-49-56



## ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН

**БАКИРОВ СЕРГЕЙ МУДАРИСОВИЧ**, канд. техн. наук, доцент

E-mail: s.m.bakirov@mail.ru

Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, 410012, Российская Федерация, г. Саратов,  
Театральная пл., 1

Для полива одних и тех же культур в дождевальных машинах используют различные системы энергоснабжения с гидравлическим, электрическим и механическим приводами. В зависимости от агротехнических условий эксплуатации дождевальных машин системы отличаются друг от друга по энергетическим и эксплуатационным затратам в 1,5...4,2 раза. Рассмотрена проблема выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин для конкретных условий. Рассмотрены системы энергоснабжения дождевальных машин: гидропривод с гидродвигателем вращательного действия; гидропривод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия; механический привод; электрический привод с питанием от кабельной линии, воздушной линии, переносного генератора или аккумуляторных батарей, характеризующиеся индивидуальным результирующим показателем качества, в качестве которого может выступать любой параметр системы. Основываясь на теории векторного синтеза, за критерий эффективности взяли показатель, учитывающий параметры системы (удельную мощность, потери энергии, показатель надежности, эксплуатационные затраты, стоимость и массу элементов системы), а также агротехнические условия (входное давление, удаленность от водоема и централизованной системы энергоснабжения, капиталовложения в дождевальную машину, поливную или оросительную норму, площадь поливного участка) и прибыль от применения полива. По критерию эффективности представлено графическое решение проблемы и установлено, что системы с электрическим приводом и различными источниками питания оправданы на участках площадью больше 40 га, с гидравлическим приводом – при площади поливного участка менее 40 га, с механическим приводом – при площади менее 6 га.

**Ключевые слова:** энергозатраты, дождевальная машина, эксплуатационные затраты, система энергоснабжения, границы применения.

**Формат цитирования:** Бакиров С.М. Обоснование границ применения систем энергоснабжения дождевальных машин // Агроинженерия. 2020. № 5(99). С. 49-56. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-49-56.

## RATIONALE FOR THE APPLICABILITY LIMITS OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPRINKLERS

**SERGEY M. BAKIROV**, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: s.m.bakirov@mail.ru

Saratov State Vavilov Agrarian University; 410012, 1, Teatralnaya Sq., Saratov, Saratov region, Russian Federation

Different power supply systems with hydraulic, electric and mechanical drive are used in sprinklers for watering crops of the same type. Depending on the agrotechnical operating conditions of sprinklers, the systems differ from each other in terms of energy and operating costs in 1.5...4.2 times. The paper considers a problem of choosing the optimal power supply system for a sprinkler unit working under specific conditions. The author has examined power supply systems for sprinklers: a hydraulic drive with a rotating hydraulic motor; a hydraulic drive with a reciprocating hydraulic motor; a mechanical drive; an electric drive powered by a cable line, an overhead line, a portable generator or accumulator batteries, which are all characterized by an individual resulting quality indicator. This indicator can be represented by any parameter of the system. Applying the theory of vector synthesis, he has chosen the efficiency criterion as an indicator that takes into account the system parameters: specific power, energy losses,

reliability indicator, operating costs, cost and mass of the system elements; as well as agrotechnical conditions: inlet pressure, distance from the water reservoir and centralized energy supply system, investments in sprinklers, irrigation rate, irrigation area and irrigation profit. According to the efficiency criterion, a graphical solution to the problem has been presented and it has been established that systems with an electric drive and various power sources are feasible for areas of more than 40 hectares, those with a hydraulic drive – for an irrigated area of less than 40 hectares, and those with a mechanical drive – less than 6 hectares.

**Key words:** energy costs, sprinkler, operating costs, power supply system, application limits.

**For citation:** Bakirov S.M. Rationale for the applicability limits of power supply systems of sprinklers. *Agricultural Engineering*, 2020; 5 (99): 49-56. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-49-56.

**Введение.** Орошаемое земледелие обеспечивает 2...6-кратное увеличение урожайности традиционных культур и возможность выращивания растений с повышенными требованиями к агрономическим условиям. Однако орошаемое земледелие связано с большим потреблением разнообразных ресурсов (трудовых, водных, энергетических). Особенно велики затраты, связанные с орошением дождеванием. Парк дождевальных машин (ДМ) имеет разнообразные технологические характеристики. При возделывании пахотных земель эффективность широкозахватных дождевальных машин кругового действия относительно других средств орошения составляет 62%, из которых доля электрифицированных машин занимает 52% [1].

Энергетические затраты на полив дождеванием культурных растений пропорциональны размерам поливной площади и расстоянию, на которое необходимо транспортировать поливную воду. Анализ структуры энергозатрат показал, что полив дождеванием условно делится на водоподачу и водораспределение. На водоподачу от водоема до дождевальной машины энергетические затраты имеют устойчивый характер развития и включены в стоимость тарифа на 1 м<sup>3</sup> воды. Затраты на водораспределение по охватываемой площади являются основной статьей эксплуатационных затрат, относящихся к дождевальной машине, и существенно отличаются друг от друга в зависимости от варианта энергоснабжения (рис. 1).

В одинаковых природно-климатических зонах используют электрическое централизованное и автономное энергоснабжение, дизельные, бензиновые и аккумуляторные установки генерации энергии, гидравлические, электрические и механические приводы и т.п.

Анализ показал, что энергозатраты вариантов энергоснабжения отличаются друг от друга в 1,5...4,2 раза (табл. 1) [2].

Каждая система энергоснабжения (СЭ) может использоваться в дождевальных машинах. Однако в конкретных агротехнических условиях показатели эффективности рассматриваемых систем отличаются. Чаще всего за критерий сравнения принимают энергетические затраты [3].

Причиной завышенных энергозатрат ДМ является отсутствие практических рекомендаций и теории выбора оптимального энергоснабжения в конкретных агротехнических условиях эксплуатации дождевальной машины. Для решения этих вопросов предлагаются частные заключения по критерию минимума расхода воды или энергии. Такие подходы не обеспечивают существенного снижения энергозатрат. Проблема поиска условий наименьшего потребления энергии в дождевальных машинах является недостаточно изученной.



**Механический привод (ДКШ Волжанка)**

*Mechanical drive (Wide-coverage wheeled sprinkler Volzhanka)*



**Гидропривод возвратно-поступательного действия (ДМ Фрегат)**

*Hydraulic drive with a reciprocating hydraulic motor (Fregat sprinkler)*



**Гидропривод вращательного действия (TL irrigation)**

*Hydraulic drive with a rotating hydraulic motor (TL irrigation)*



**Электрический привод (МДЭК Каскад)**

*Electric drive (SMEC Cascade)*

**Рис. 1. Типы приводов опорных тележек дождевальных машин**

**Fig. 1. Types of support sledge drives for sprinklers**

## Затраты энергии различных систем энергоснабжения на площади поливного участка 100 га

Table 1

## Energy costs of various power supply systems on the irrigation area of 100 hectares

Система энергоснабжения <i>Power supply system</i>	Мощность единицы, кВт <i>Unit power, kW</i>	Количество, ед. <i>Quantity, units</i>	Средняя продолжительность работы ДМ, ч <i>Average work time of a sprinkler, h</i>	КПД, % <i>Efficiency factor, %</i>	Требуемое количество энергии, кВт·ч <i>Required power amount, kW per hour</i>	Организация полива <i>Organization of irrigation</i>
Гидропривод вращательного действия <i>Hydraulic drive with a rotating hydraulic motor</i>	0,25...0,40	20	500	0,40	2500	Оросительная сеть с насосом 75 кВт + гидропривод <i>Irrigation chain with a 75 kW pump + a hydraulic drive</i>
Гидропривод возвратно-поступательного действия <i>Hydraulic drive with a reciprocating hydraulic motor</i>	0,42...0,80	10		0,36	2100	Оросительная сеть с насосом 75 кВт + гидропривод <i>Irrigation chain with a 75 kW pump + hydraulic drive</i>
Механический привод <i>Mechanical drive</i>	14...30	1		0,31	7000	Оросительная сеть с насосом 45 кВт + механический привод + дополнительный ресурс <i>Irrigation chain with a 45 kW pump + a mechanical drive + an additional source</i>
Электропривод <i>Electric drive</i>	0,55...0,75	10		0,84	2750	Оросительная сеть с насосом 45 кВт + электропривод + подведение электроэнергии <i>Irrigation chain with 45 kW pump + an electric drive + an electricity supply</i>

Примечание. Расчет затрат энергии проводился с учетом различной продолжительности работы привода каждой секции.  
Note: The energy costs were calculated taking into account the different drive operation time in each section

**Цель исследования:** разработать концепцию выбора оптимальной системы энергоснабжения дождевальных машин и обосновать границы применения различных систем энергоснабжения дождевальных машин по критерию наименьших эксплуатационных затрат.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели применены теоретические методы научного исследования: описание, анализ, синтез и моделирование.

**Результаты исследования.** На выбор системы влияет множество факторов, причем часть факторов является очевидной (КПД системы, удельная мощность и т.п.), а другая их часть носит случайный характер и проявляется лишь в конкретных условиях эксплуатации. Поэтому согласно рекомендациям [4, 5] в данном случае можно рассмотреть теорию выбора системы энергоснабжения ДМ по результирующему показателю качества безусловного критерия предпочтения.

Результирующий показатель качества, как критерий эффективности системы энергоснабжения ДМ, должен учитывать значительную часть факторов:

$$V_{кр} = f(\Xi, Y, O), \quad (1)$$

где  $\Xi$  – эффективность системы, зависящая от эксплуатационных свойств;  $Y$  – совокупность показателей, зависящих от условия эксплуатации;  $O$  – ограничения, наложенные на систему относительно агротехнических и конструктивных требований к дождевальной машине (все показатели – безразмерные условные единицы).

Анализ совокупности взаимодействия системы энергоснабжения с условиями эксплуатации показал, что существенное влияние на выбор системы оказывает ряд показателей (табл. 2).

Результирующий показатель качества  $V_{кр}(k_i)$  оценивает систему энергоснабжения ДМ в совокупности со всеми показателями таблицы 2. Его определение

на основе функций связи представленных параметров позволит установить количественное отношение показателей системы и параметров процесса полива. Сравнение значений  $V_{кр}$  имеющихся вариантов

гидравлических, механических и электрических систем позволит выбрать наилучшую систему. Очевидно, более предпочтительным является вариант с меньшим значением  $V_{кр}$ .

Таблица 2

Показатели к оценке эффективности системы энергоснабжения

Table 2

Indicators for evaluating the efficiency of the power supply system

Условия эксплуатации <i>Operating conditions</i>			Параметры системы энергоснабжения <i>Power supply system parameters</i>		
Наименование параметра <i>Name of parameter</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Условное обозначение <i>Symbol</i>	Наименование параметра <i>Name of parameter</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Условное обозначение <i>Symbol</i>
Поливная (оросительная) норма, м <sup>3</sup> /га <i>Irrigation (irrigation) rate, m<sup>3</sup>/ha</i>	$m_{ин}$ $(m_{он})$	$z_1$	Критерий эффективности СЭ, руб.·кВт·ч <i>Power supply system efficiency criterion, rubles · kW·h</i>	$V_{кр}$	$k_1$
Площадь поливного участка, га <i>Irrigated area, ha</i>	$S$	$z_2$	Удельная мощность СЭ, кВт/га <i>Specific power of the power supply system, kW/hectare</i>	$P'$	$k_2$
Стоимость ДМ без энергооборудования СЭ, руб. <i>The cost of a sprinkler machine without power equipment of the PS system, rub.</i>	$K$	$z_3$	Показатель потерь энергии, % <i>Energy loss rate, %</i>	$\eta'$	$k_3$
Давление поливной воды на входе в ДМ, МПа <i>Irrigation water pressure at the sprinkler inlet, MPa</i>	$p$	$z_4$	Стоимость СЭ, руб. <i>Power supply system cost, rub.</i>	$C$	$k_4$
Удаленность от централизованной источника энергии, м <i>Distance from a centralized power supply system, m</i>	$l_{ин}$	$z_5$	Показатель надежности СЭ (вероятность отказа), % <i>Power supply system reliability indicator (probability of failure), %</i>	$Q_0(t)$	$k_5$
Удаленность от водоема, м <i>Distance from the reservoir of water, m</i>	$l_b$	$z_6$	Эксплуатационные затраты, руб. <i>Operating costs, rub.</i>	$z$	$k_6$
Прирост прибыли от полива дождеванием, руб. <i>Profit from irrigation, rub.</i>	$\Delta\Pi$	$z_7$	Масса энергооборудования СЭ, кг <i>Weight of power equipment of the power supply system, kg</i>	$m_{СЭ}$	$k_7$

При сравнении критериев эффективности различных систем в конкретных условиях эксплуатации могут возникнуть случаи:

- 1)  $V_{крГ} < V_{крЭ}$ ; (2)
- 2)  $V_{крГ} > V_{крЭ}$ ; (3)
- 3)  $V_{крГ} = V_{крЭ}$ ; (4)

где  $V_{крГ}$  – критерий эффективности системы с гидроприводом;  $V_{крЭ}$  – критерий эффективности системы с электроприводом.

В первом случае лучшей является гидравлическая система, во втором случае – электрическая, а в третьем случае обе системы обладают одинаковым качеством, то есть могут возникнуть случаи неоднозначного выбора, что является недостатком скалярного анализа. Поэтому сравнение критериев эффективности необходимо рассмотреть на основе векторного синтеза [6].

При векторном синтезе выбор системы рассматривается с участием дополнительных критериев. Например, если сравнивать электрическую и гидравлическую системы, при определении величины результирующего показателя электрическая система окажется с меньшим

значением, но если учесть, например, выгодное расположение поливного участка, где эксплуатационные затраты на гидравлическую систему в 3 раза ниже, то с учетом еще одного показателя качества наилучшей системой будет гидравлическая. Поэтому векторный синтез охватывает рассматриваемую систему в пространстве действия многих показателей, которые в разной степени влияют на работу системы. Отсюда следует, что результирующий показатель качества может рассматриваться в качестве рядового показателя качества, а результирующим будет, например, стоимость системы.

Результирующий показатель качества ( $V_{кр}$ ) определяется как произведение множителя количества

Полное выражение функции критерия эффективности с учетом показателей (табл. 2), выражения (5) и условных обозначений –

$$V_{кр} = \frac{(b + k_2 z_2) t_p [k_4 + c_p (b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кр} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\Psi_{уд}} (1 - g_o))]}{(1 - k_3)}, \quad (8)$$

где  $b$  – постоянная величина мощности, относящаяся к поливной норме  $z_7$ , Вт;  $t_p$  – продолжительность работы ДМ, ч;  $c_p$  – цена ресурса на единицу энергии, руб/(кВт·ч);  $t_p$  – продолжительность работы источника СЭ, ч;  $t_{1м}$  – нормативная трудоемкость технического обслуживания и ремонта (ТОР) линии водопровода, чел·ч/м;  $t'_{1м}$  – нормативная трудоемкость ТОР линии, чел·ч/м;  $t_{1кр}$  – нормативная

потребленной энергии ( $W$ ) с учетом показателя КПД системы:

$$V_{кр} = \frac{W(C + z)}{(1 - \eta')}, \quad (5)$$

где  $C$  – стоимость системы, не зависящая от времени, руб.;  $z$  – эксплуатационные затраты, руб.;  $\eta'$  – показатель потерь энергии, % (табл. 2).

Эксплуатационные затраты ( $z$ ) и потребленная системой энергоснабжения ДМ энергия ( $W$ ) являются функциями, зависящими от времени работы ( $t_p$ ):

$$W = f(t_p); \quad (6)$$

$$z = f(t_p). \quad (7)$$

трудоемкость ТОР единицы массы, чел·ч/кг;  $\tau_ч$  – часовая тарифная ставка обслуживающего персонала, руб/(чел·ч);  $\rho$  – относительный показатель фактической прибыли;  $3_{\Psi_{уд}}$  – удельные затраты на профилактические мероприятия для повышения надежности, руб.·ч/%;  $\Psi$  – показатель степени эффективности профилактического мероприятия;  $g_o$  – показатель эффективности профилактических мероприятий.

Проверим данное выражение, проинтегрируем по продолжительности времени действия показателей за один

полив ( $t_o$ ) при сезонном использовании ( $t_{сез}$ ) и на всем сроке эксплуатации ( $t_{св}$ ):

$$V_{кр-о} = \int_0^{t_o} \frac{(b + k_2 z_2) t_p [k_4 + c_p (b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кр} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\Psi_{уд}} (1 - g_o))]}{(1 - \eta')} dt, \quad (9)$$

$$V_{кр-сез} = \int_0^{t_{сез}} \frac{(b + k_2 z_2) t_p [k_4 + c_p (b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кр} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\Psi_{уд}} (1 - g_o))]}{(1 - \eta')} dt, \quad (10)$$

$$V_{кр-св} = \int_0^{t_{св}} \frac{(b + k_2 z_2) t_p [k_4 + c_p (b + k_2 z_2) t_p + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кр} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\Psi_{уд}} (1 - g_o))]}{(1 - \eta')} dt. \quad (11)$$

Продолжительность времени работы ДМ определяется поливной нормой для конкретной культуры. В справочных данных указывается оросительная норма: например, для пшеницы – 2500 м<sup>3</sup>/га, для кукурузы – 6000 м<sup>3</sup>/га [7]. Если рассмотреть продолжительность работы машины в сезон через параметры процесса полива, то получим

$$t_{сез} = \frac{5 m_{он}}{18 q}, \quad (12)$$

где  $m_{он}$  – оросительная норма, м<sup>3</sup>/га;  $q$  – гидромодуль дождевальной машины, м<sup>3</sup>/(га·ч).

Подставим в (8) выражение продолжительности работы ДМ (14) и получим целевую функцию зависимости

$$V_{кри} = \frac{1,1 z_1 z_2 (b + k_2 z_2) \sqrt{\frac{\rho_b}{2 z_4}} \left[ k_4 + c_p (b + k_2 z_2) \frac{1,1 z_1 z_2}{\mu_p \pi d_{внут}} \sqrt{\frac{\rho_b}{2 z_4}} + (t_{1м} z_5 + t'_{1м} z_6 + t_{1кр} k_7) \tau_ч + k_5 (z_7 (1 - \rho) + 3_{\Psi_{уд}} (1 - g_o)) \right]}{\mu_p \pi d_{внут} (1 - k_3)}. \quad (15)$$

Если гидромодуль ДМ выразить через давление, то получим

$$t_{сез} = \frac{1,1 m_{он} S}{\mu_p \pi d_{внут}} \sqrt{\frac{\rho_b}{2 p}}, \quad (13)$$

где  $S$  – площадь поливного участка, м<sup>2</sup> (табл. 2);  $\mu_p$  – коэффициент расхода, зависящий от формы подхода воды к отверстию гидранта ( $\mu_p = 0,4 \dots 0,6$ );  $d_{внут}$  – внутренний диаметр трубопровода ДМ, присоединенного к гидранту, м;  $p$  – давление потока жидкости, Па;  $\rho_b$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

В условных обозначениях, если продолжительность одного оборота дождевальной машины  $t_o = t_{сез} = t_p$ ,

$$t_p = \frac{1,1 z_1 z_2}{\mu_p \pi d_{внут}} \sqrt{\frac{\rho_b}{2 z_4}}. \quad (14)$$

результирующего показателя качества или показателя эффективности системы энергоснабжения:

Целевая функция (15) показателя эффективности показывает сложную зависимость показателей. С точки зрения инженерных расчетов и сходимости результатов 5% данное выражение определяет величину критерия с достаточной точностью. Изменение любого одного или нескольких параметров приводит к изменению показателя эффективности, что соответствует высокой чувствительности системы.

Выбор лучшей с точки зрения наименьших энергозатрат системы энергоснабжения дождевальной машины на основе показателя эффективности, как показателя интегрального качества  $k_j$ , сводится к определению границ применения в конкретных условиях процесса. При известных условиях функционирования дождевальной машины задача определения лучшей системы энергоснабжения сводится к решению системы уравнений, включающей в себя показатели эффективности разных систем энергоснабжения:

$$\left. \begin{matrix} V_{крГД} \\ V_{крГЦ} \\ V_{крМ} \\ V_{крЭкл} \\ V_{крЭвл} \\ V_{крЭГ} \\ V_{крЭакб} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \min, \quad (16)$$

где  $ГД$  – гидропривод с гидродвигателем вращательного действия;  $ГЦ$  – гидропривод с гидродвигателем возвратно-поступательного действия (с гидроцилиндром);  $М$  – механический привод;  $Экл$  – электропривод с кабельной линией;  $Эвл$  – электропривод с воздушной линией;

$Эг$  – электропривод с переносным генератором;  $Эакб$  – электропривод с аккумуляторными батареями.

Для ускорения расчетов показателя критерия эффективности  $k_j$  по отдельным единичным показателям в соответствии с выражениями (15-16) разработаны алгоритм и программа поиска оптимальной системы энергоснабжения в зависимости от агротехнических условий эксплуатации дождевальной машины.

На рисунке 2 приведено графическое решение оптимальных зон применения различных систем энергообеспечения, полученных в программе на базе *Microsoft Excel*.

Зоны оптимального применения систем получены с учетом значимых показателей качества системы, а также удельных показателей выражения (15). Например, при условии удаленности ДМ от централизованной энергосистемы и водоема не более чем 1000 м, диаметра трубопровода 159 мм, стоимости ресурса 5 руб/кВт·ч, удельной мощности 0,24 кВт/га, малой площади поливного участка  $S < 3$  га и давления на входе в ДМ 0,1...0,45 МПа оптимальным будет считаться применение механического привода.

Рассмотрим графическое решение на нелинейных шкалах. Например, дождевальная машина с наружным диаметром трубопровода  $d = 259$  мм и высоким входном давлением  $p > 0,6$  МПа, при удаленности поливного участка от централизованной энергосистемы и водоема  $l_{ин} = l_г = 1000$  м с оросительной нормой  $m_{он} = 1000$  м<sup>3</sup>/га и площади поливного участка  $S = 10$  га, максимальной прибыли от полива в 20 тыс. руб. должна быть выполнена системой гидропривода вращательного действия, так как при этих данных критерий эффективности имеет наименьшее значение (рис. 3).

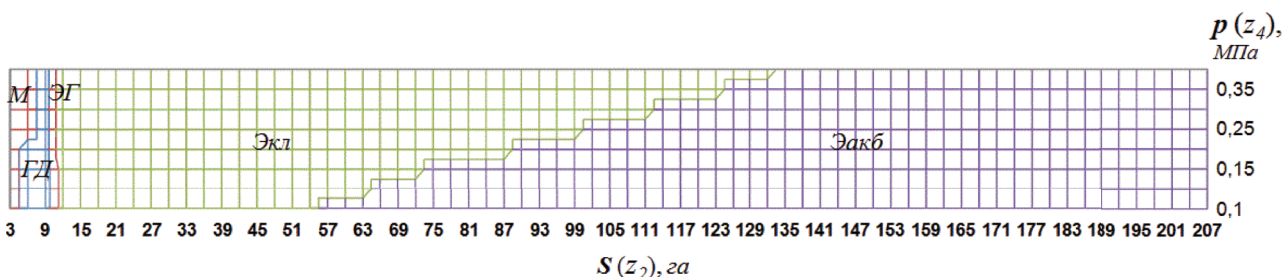


Рис. 2. Зоны оптимального применения различных систем энергоснабжения ДМ при изменении площади поливного участка (S) и давления на входе в ДМ (p)

Fig. 2. Zones of optimal application of various power supply systems of a sprinkler a when changing the irrigated area (S) and the pressure at the sprinkler inlet (p)

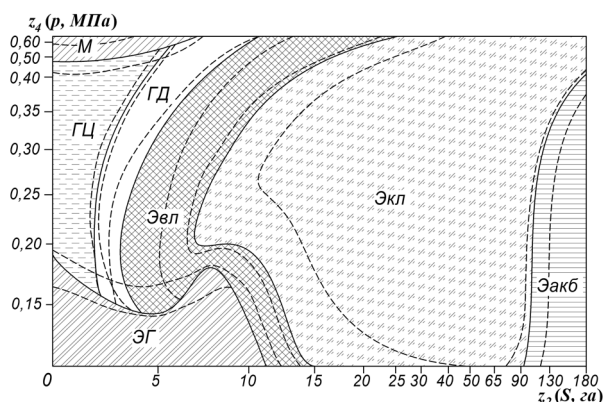
Зависимость изменения параметров площади поливного участка  $S(z_2)$  и входного давления  $p(z_4)$  в ДМ для всех рассматриваемых вариантов представлена на рисунке 3.

При тех же исходных данных, но при давлении  $p > 0,6$  МПа и площади поливного участка  $S > 50$  га наилучшей системой энергоснабжения будет система электропривода с питанием от кабельной линии, а при тех же условиях и площади  $S = 10$  га с входным давлением  $p < 0,15$  МПа наилучшей будет система электропривода с питанием от переносного генератора. Это обусловлено совокупностью влияющих на каждую систему показателей качества (надежности, стоимости, цены на ресурс и т.п.). Из рисунка 3 следует, что при вышеупомянутых исходных данных большая зона оптимальности принадлежит

системам электропривода с питанием от кабельной линии и аккумуляторных батарей. Это связано со сравнительно низкими показателями мощности  $k_2$ . Если же ДМ будет иметь трубопровод диаметром  $d = 219$  мм, а прирост урожая от полива будет оцениваться в 200 тыс. руб.,  $l_{ин} = l_г = 1000$  м,  $m_{он} = 1000$  м<sup>3</sup>/га, то зоны применения гидропривода расширяются, а также расширяется зона электропривода с переносным генератором (ЭГ) (рис. 4). Однако они применимы на малых поливных площадях  $S < 20$  га. Для больших поливных площадей (более 20 га) предпочтительно применять электропривод с кабельной линией (Экл) и электропривод с аккумуляторными батареями (Эакб). На рисунке 4 пунктирными линиями указаны смежные части пересечения зон оптимальности

в пределах статистической ошибки расчетов значений показателя эффективности  $k_j$ .

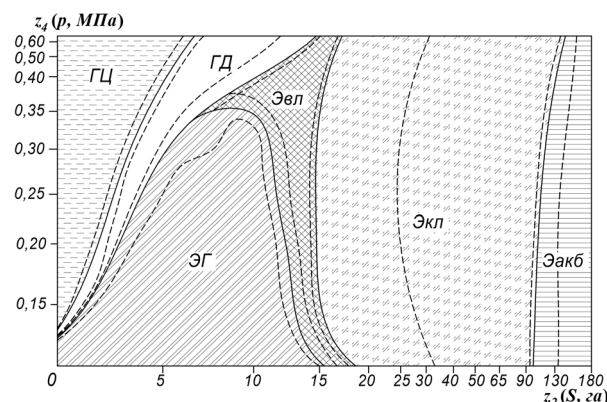
Показатель эффективности ( $k_j$ ) в системе изменения площади поливного участка от нормы  $z_1$  ( $m_{nn}$ ,  $m^3/га$ ) будет другим (рис. 5). Зоны оптимального применения систем также изменятся.



**Рис. 3. Зоны оптимальных вариантов систем энергоснабжения опорных тележек дождевальных машин при условии:**  
 $d = 259$  мм;  $l_{nn} = 1000$  м;  $l_g = 1000$  м;  
 $m_{он} = 1000$   $m^3/га$ ;  $\Delta П = 20$  тыс. руб.

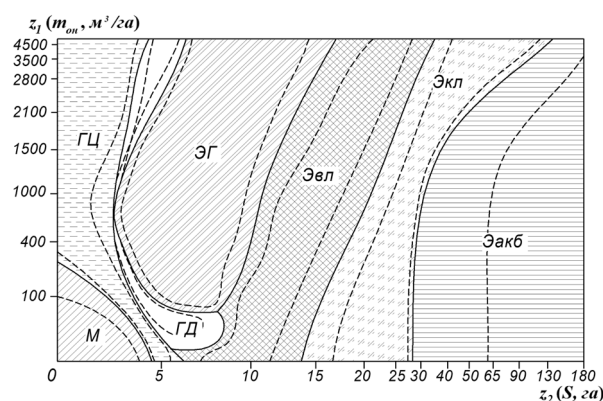
**Fig. 3. Zones of optimal options for power supply systems for support sledges of sprinklers, provided:**  
 $d = 259$  mm;  $l_{nn} = 1000$  m;  $l_g = 1000$  m;  
 $m_{он} = 1000$   $m^3/ha$ ;  $\Delta П = 20$  th.rub.

При малых поливных нормах и площади полива ( $m_{nn} < 300$   $m^3/га$ ;  $S < 5$  га) наилучшей будет система механического привода, причем с увеличением диаметра до 219 мм и давления на входе в ДМ с 0,25 МПа до 0,45 МПа зона М расширяется. В большинстве случаев более предпочтительным является применение системы с электроприводом (рис. 5).



**Рис. 4. Зоны оптимальных вариантов систем энергоснабжения опорных тележек дождевальных машин при условии:**  
 $d = 219$  мм;  $l_{nn} = 1000$  м;  $l_g = 1000$  м;  
 $m_{он} = 1000$   $m^3/га$ ;  $\Delta П = 200$  тыс. руб.

**Fig. 4. Zones of optimal options for power supply systems for support sledges of sprinklers, provided:**  
 $d = 219$  mm;  $l_{nn} = 1000$  m;  $l_g = 1000$  m;  
 $m_{он} = 1000$   $m^3/ha$ ;  $\Delta П = 200$  th.rub.



**Рис. 5. Зоны оптимальных вариантов систем энергоснабжения опорных тележек дождевальных машин при условии:**  
 $d = 159$  мм;  $l_{nn} = 1000$  м;  $l_g = 1000$  м;  
 $p = 0,25$  МПа;  $\Delta П = 200$  тыс. руб.

**Fig. 5. Zones of optimal options for power supply systems for support sledges of sprinklers, provided:**  
 $d = 159$  mm;  $l_{nn} = 1000$  m;  $l_g = 1000$  m;  
 $p = 0,25$  MPa;  $\Delta П = 200$  th.rub.

#### Библиографический список

1. Фокин Б.П. Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин: Научное издание / Б.П. Фокин, А.К. Носов. Ставрополь, 2011. С. 80.
2. Бакиров С.М. Анализ энергозатрат на дождевальную машину // Аграрный научный журнал. 2019. № 3. С. 83-88.
3. Ерошенко Г.П. Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий / Г.П. Ерошенко,

#### Выводы

В результате исследований получены данные оптимального применения различных типов привода для дождевальных машин, а именно:

- гидравлический привод – при площади поливного участка  $S < 40$  га, с входным давлением в трубопроводе  $p > 0,35$  МПа и удаленности от водоема  $l_g < 1000$  м;
- механический привод – при площади поливного участка  $S < 6$  га, с входным давлением в трубопроводе  $p < 0,30$  МПа и удаленности от централизованной сети энергоснабжения  $l_{nn} > 10000$  м и водоема  $l_g > 10000$  м;
- электрический привод – при площади поливного участка  $S > 40$  га, удаленности от водоема  $l_g > 1000$  м; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения  $l_{nn} < 1000$  м более предпочтительны кабельная или воздушная линии; при удаленности от централизованной сети энергоснабжения  $l_{nn} > 1000$  м и стоимости ресурса  $c_p < 7,5$  руб/кВт·ч рекомендуется аккумуляторное питание, а питание от переносного генератора – при  $l_{nn} > 1000$  м и  $c_p > 7,5$  руб/кВт·ч.

#### References

1. Fokin B.P., Nosov A.K. Sovremennye problemy primeneniya mnogoopornykh dozhdeval'nykh mashin: nauchnoe izdanie [Modern problems of application of multi-support sprinkler machines: Scientific publication]. Stavropol, 2011: 80. (In Rus.)
2. Bakirov S.M. Analiz energozatrat na dozhdeval'nyuyu mashinu [Analysis of energy costs for a sprinkler]. Agrarnyy nauchniy zhurnal, 2019; 3: 83-88. (In Rus.)

Ю.А. Медведько, М.А. Таранов. Ростов-на-Дону: Терра, 2006. 590 с.

4. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Советское радио, 1975. 363 с.

5. Тирринг В. Курс математической и теоретической физики: Монография / Пер. с нем. Киев: Тимпани, 2004. 264 с.

6. Кочергин В.И. Теория многомерных цифро-векторных множеств. Томск: Изд-во Томского университета, 2006. 380 с.

7. Справочник по орошаемому земледелию / Сост. проф. Н.А. Мосиенко. Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1993. 432 с.

3. Eroshenko G.P., Medvedko Yu.A., Taranov M.A. Eksploatatsiya energooborudovaniya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatii [Operation of power equipment in agricultural enterprises]. Rostov-on-Don: Terra, 2006: 590. (In Rus.)

4. Gutkin L.S. Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazateley kachestva [Optimization of electronic devices by a set of quality indicators]. Moscow, Sov. radio, 1975: 363. (In Rus.)

5. Thirring V. Kurs matematicheskoy i teoreticheskoy fiziki: monografiya per. s nem [Course of mathematical and theoretical physics: Monograph, translated from German]. Kiev, Timpani, 2004: 264. (In Rus.)

6. Kochergin V.I. Teoriya mnogomernykh tsifro-vektornykh mnozhestv [Theory of multidimensional digital-vector sets]. Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta, 2006: 380. (In Rus.)

7. Spravochnik po oroshaemomu zemledeliyu [Handbook of irrigated agriculture]. Comp. by Prof. N.A. Mosienko. Saratov, Privolzh. book publishing house, 1993: 432. (In Rus.)

#### Критерии авторства

Бакиров С.М. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Бакиров С.М. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 25.06.2020

Опубликована 30.10.2020

#### Contribution

S.M. Bakirov carried out theoretical studies, generalized the obtained results and wrote the manuscript S.M. Bakirov has author's rights and bears responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on June 25, 2020

Published 30.10.2020

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /  
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

УДК 664.8.039.51: 58.02

DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-56-63



## КИНЕТИКА ВЛАГОУДАЛЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ВИТАМИНА С ПРИ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКЕ ЯГОД И ФРУКТОВ В МНОГОЯРУСНОМ ШКАФНОМ УСТРОЙСТВЕ

**ЗАВАЛИЙ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**, докт. техн. наук, доцент<sup>1</sup>

E-mail: zavalym@mail.ru

**ЛАГО ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА**, ассистент<sup>1</sup>

E-mail: Luda\_Lago@mail.ru

**РЫБАЛКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**, младший научный сотрудник<sup>2</sup>

E-mail: alex\_ark\_simf@mail.ru

<sup>1</sup> Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, 295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, 295493, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150

Для аналитического описания разрушения витамина С в процессе инфракрасной сушки растительного сырья использована модель химической кинетики первого порядка, в которой для учета влияния температуры на скорость моделируемых процессов применимо уравнение Аррениуса. По экспериментальным данным инфракрасной сушки ягод малины и нарезанных дольками яблок определены коэффициенты модели. На основе анализа процессов сушки с использованием полученных моделей установлена взаимосвязь между температурой сырья, временем теплового воздействия на сырье