

М. Н. ДЕНЦОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ  
ПОСЕВА И ОПРЫСКИВАНИЯ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ  
НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

***Ключевые слова:** коэффициент энергетической эффективности, математическая модель, опрыскивание, посев сахарной свеклы, техногенная энергия, энергетический эквивалент, энергетические затраты.*

***Аннотация.** Разработана математическая модель энергетической оценки механизированных процессов возделывания сахарной свеклы. Представлены основные результаты производственной проверки и имитационного моделирования использования техники.*

В условиях вступления России в ВТО вопрос энергоёмкости продукции стал выступать одним из главных критериев конкурентоспособности произведённой продукции. Особенно это связано с такими энергоресурсоёмкими культурами, как сахарная свекла.

Было установлено, что насыщение технологических процессов техногенной энергией не всегда обеспечивает высокую эффективность технологий, поэтому ещё на стадии проектирования производства требуется ввести критерий оценки рассматриваемых вариантов. За такой критерий был принят коэффициент энергетической эффективности техногенных процессов ( $K$ ) [2, с.12], характеризующий окупаемость затраченной энергии на получение готовой продукции:

$$K = \frac{E_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{ВХ}}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{ВЫХ}}$  – количество энергии, содержащейся в сахарной свекле ( $E_{\text{ВЫХ}} = \alpha \cdot Y$ ), МДж/га;  $\alpha$  – энергетический эквивалент сахарной свеклы, МДж/т;  $Y$  – урожайность сахарной свеклы, т/га;  $E_{\text{ВХ}}$  – количество тех-

ногенной энергии, затраченное на производство сахарной свеклы, МДж/га.

Сахарная свекла является сырьём для переработки, из которого получают готовый продукт – сахар. Поэтому при расчёте коэффициента  $K$  будет целесообразнее учитывать энергию содержащуюся не в сахарной свекле, а в сахаре, полученном после переработки корнеплодов:

$$E_{\text{ВЫХ}}^{\text{сах}} = (e_{\text{сах}} \cdot Y \cdot C \cdot K_{\text{изв}}) \div 100, \quad (2)$$

где  $E_{\text{ВЫХ}}^{\text{сах}}$  – количество энергии, содержащееся в сахаре, МДж/га;  $e_{\text{сах}}$  – энергосодержание сахара, МДж/т;  $C$  – сахаристость сахарной свеклы, %;  $K_{\text{изв}}$  – коэффициент извлечения сахара.

Полные затраты техногенной энергии определяются по формуле, МДж/га:

$$E_{\text{ВХ}} = E_{\text{тех}} + E_{\text{чел}} + E_{\text{вещ}}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{тех}}$  – энергетические затраты, связанные с использованием технических ресурсов;  $E_{\text{чел}}$  – энергетические затраты живого труда;  $E_{\text{вещ}}$  – энергетические затраты, связанные с расходом веществ, задействованных в производстве сахарной свеклы (семена, удобрения и др.).

Учитывая, что природные и техногенные аспекты энергетики тесно взаимосвязаны, поиск оптимальной стратегии по реализации тех-нологий производства сахарной свеклы в складывающихся условиях сезона требует анализа множества альтернативных вариантов решения. При этом отметим, что рост энергетической эффективности связан с применением технологий, позволяющих не только увеличивать объёмы производства сахарной свеклы, но и в то же время использовать ре-зервы производства по сокращению затрат техногенной энергии. Решение таких многопараметрических задач достаточно сложно и требует большого объёма исходной информации. В формализованном виде математическая модель определения оптимальных энергетических параметров технологических линий производства сахарной свеклы и эффективности её использования в течение продукционного периода сезона может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\Delta t \in T} K_{ij\Delta t} \cdot E_{ij\Delta t}^n + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\Delta t \in T} N_{ij\Delta t} \cdot E_{ij\Delta t}^{\text{эч}} + H \cdot \left( \sum_{l \in L} K_l \cdot E_l^k + \sum_{a \in A} K_a \cdot E_a^k + \right. \\ & \left. + \sum_{s \in S} K_s \cdot E_s^k + \sum_{d \in D} K_d \cdot E_d^k + \sum_{o \in O} K_o \cdot E_o^k \right) + \alpha_{\text{сах}} \cdot \sum_{i \in I} \Pi_{\text{сах } i} \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4)$$

При условиях:

– по темпу выполнения полевых механизированных работ:

$$\Theta_i \geq \Theta_{ni}^{np} = K_{ij} \cdot W_{cmij} \cdot K_{cmi} \cdot K_{ej} \cdot K_{mi} \cdot K_{opci} ;$$

– объемы механизированных работ должны быть выполнены:

$$\sum_{i \in I} \Theta_i \cdot \Delta t_i \geq \Theta_{\Delta t} \quad (i \in I ; t \in T) ;$$

– тракторов и сельскохозяйственных машин должно быть больше, чем агрегатов:

$$K_i + K_d \geq K_j ;$$

– не отрицательности неизвестных:

$$K_i > 0 ; K_d > 0 ; K_o > 0 ; K_{ij} > 0 ;$$

– сахаристость корнеплодов на момент начала уборки:

$$C_i \geq C_{\min} .$$

Корнеплоды, убранные с поля и транспортируемые на завод, должны соответствовать следующим физико-химическим показателям [1, с. 2]: сахаристость  $\geq 14$  %; загрязнённость  $\leq 15$  %; содержание зелёной массы  $\leq 3$  %; содержание увядших корнеплодов  $\leq 5$  %; содержание корнеплодов с сильными механическими повреждениями  $\leq 12$  %.

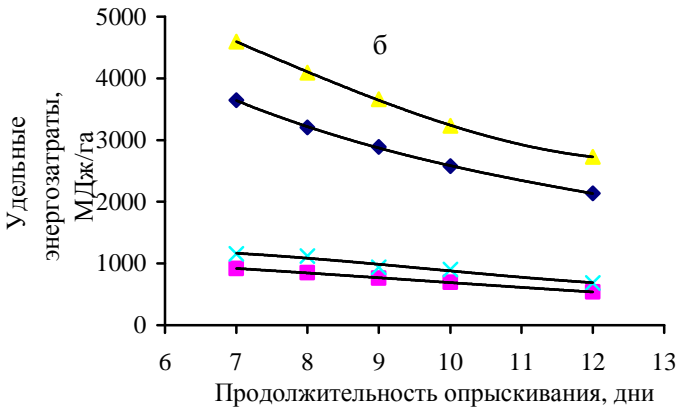
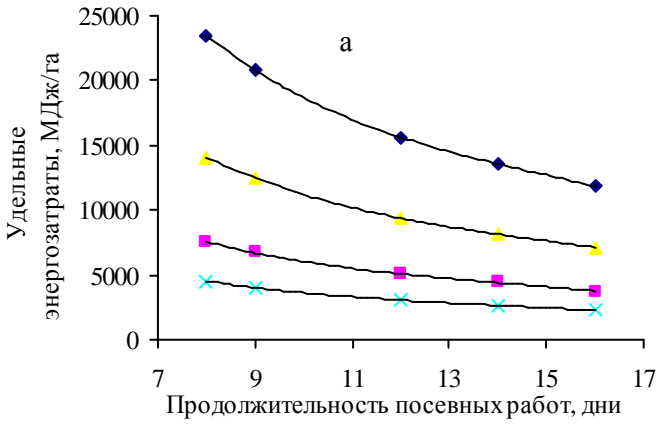
В модели приняты следующие обозначения:

$i$  – виды работ;  $j$  – виды агрегатов;  $\Delta t_i$  – прогнозируемая продолжительность проведения полевых механизированных работ  $i$ -го вида;  $l, d, o, a, s$  – соответственно марки тракторов, сельскохозяйственных машин, сенокосилок, автомобилей, свеклоуборочных комбайнов;  $K_{ij\Delta t}$  – количество агрегатов  $j$ -го типа, необходимых для выполнения  $i$ -ой механизированной работы в  $\Delta t$ -й период времени;  $K_l; K_a; K_s; K_d$  – соответственно искомое количество тракторов, автомобилей, свеклоуборочных комбайнов, сельскохозяйственных машин, сенокосилок, необходимых для выполнения механизированных работ в агротехнические сроки;  $N_{ij\Delta t}$  – число рабочих, участвующих в выполнении  $j$ -м агрегатом  $i$ -й работы в  $\Delta t$ -й период сезона;  $I$  – множество механизированных работ, которые выполняются при возделывании и уборке сахарной свеклы;  $T, J, T, L, A, S, D, O$  – соответственно множество периодов выполнения механизированных работ, множество агрегатов, тракторов, автомобилей, свеклоуборочных комбайнов, сельскохозяйственных машин, марок сенокосилок;  $E_{ij\Delta t}^n$  – прямые затраты энергии  $j$ -го агрегата, на  $i$ -й ра-

боте в  $\Delta t$ -й период времени;  $E_{i\Delta t}^{жк}$  – энергозатраты живого труда на  $j$ -ом агрегате, на  $i$ -й работе в  $\Delta t$ -й период времени;  $E_l^k; E_a^k; E_s^k; E_d^k; E_o^k$  – соответственно энергоёмкость тракторов, автомобилей, свеклоуборочных комбайнов, сельскохозяйственных машин и сцепок;  $Q_{i\Delta t}$  – объём механизированных работ  $i$ -го вида, выполненный за период  $\Delta t$ ;  $\Theta_i$  – фактический темп выполнения  $i$ -й механизированной работы;  $\Theta_{ni}^{np}$  – темп выполнения  $i$ -й механизированной работы, диктуемый складывающимися условиями сезона;  $W_{cmij}$  – сменная производительность агрегата  $j$ -го типа на работе  $i$ -го вида;  $H$  – нормативный коэффициент эффективности энергии, вложенной в производство сельскохозяйственной техники;  $C_i$  – сахаристость свеклы на  $i$ -м поле на начало уборки;  $C_{min}$  – минимально допустимая для уборки сахаристость свеклы;  $a_{сах}$  – энергетический эквивалент сахара;  $P_{Ci}$  – потери сахара от нарушения сроков  $i$ -й полевой механизированной работы в зависимости от складывающихся условий сезона.

Согласно разработанной модели адаптации в ООО «Агрофирме «Золотой колос» г. Сергач Нижегородской области на весенних полевых работах был проведён полнофакторный эксперимент типа  $2^3$ . Параметрами выхода модели являлись оптимальные энергетические затраты на проведение весенних полевых механизированных работ, а также оптимальный количественный состав технических средств. Для характеристики уровней эксплуатации техники использовался обобщённый коэффициент производственных условий, учитывающий при выполнении механизированных работ готовность технических средств  $x_1$ , степень организации выполнения работ  $x_2$ , природно-климатические факторы  $x_3$ .

Производственная проверка алгоритма энергетической оценки механизированных процессов возделывания сахарной свеклы показала, что энергоёмкость процессов каждый год различна, так как объёмы и сроки выполнения механизированных работ ежегодно корректируются складывающимися условиями производства. В качестве иллюстрации на рисунке 1 представлена зависимость удельных энергозатрат, необходимых для выполнения комплекса весенних полевых работ, в сроки, диктуемые скоростью развития природных процессов сезона, от продолжительности выполнения механизированных работ.



- ◆ прямые энергозатраты, низкий уровень эксплуатации техники
- прямые энергозатраты, высокий уровень эксплуатации техники
- ▲ косвенные энергозатраты, низкий уровень эксплуатации техники

Рисунок 1 – Графики изменения удельных энергозатрат на весенних посевных работах (а) и опрыскивании сахарной свеклы (б) в зависимости от продолжительности выполнения работ

На основе полученных данных было установлено, что сроки выполнения работ и уровни использования техники в технологических линиях во многих случаях могут быть определяющим при выборе стратегии ведения механизированных работ. Из рисунка 2 наглядно видно, что с повышением уровня использования техники удельные энергозатраты значительно снижаются. Наиболее ярко эта тенденция проявляется в сезоны, когда выполнение работ необходимо в сжатые сроки.

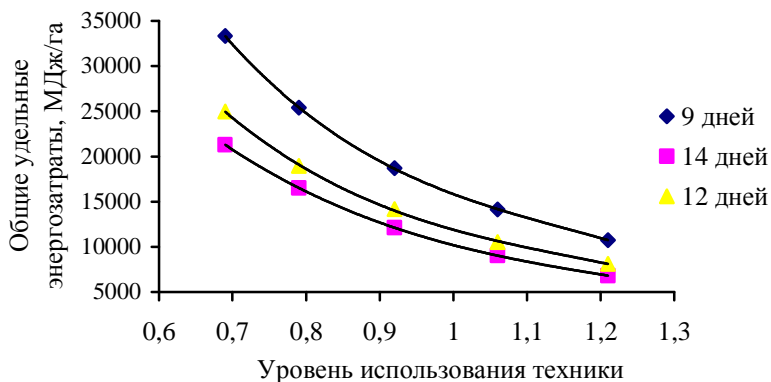


Рисунок 2 – Влияние уровня использования техники на величину энергозатрат в различные по скорости развития природных процессов сезоны

По результатам проведённых экспериментов и имитационного моделирования получены математические модели, определяющие оптимальные энергетические затраты на проведение весенних полевых механизированных работ для складывающихся условий сезона, а также состав и уровень использования техники (табл. 1).

На основе полученных уравнений можно сделать вывод, что на весенних полевых работах наибольшее влияние на производственный процесс оказывают природно-климатические условия, определяющие структуру технологических линий и уровень техногенных затрат.

По результатам исследований на механизированных работах установлены значительные колебания состава технологических звеньев в зависимости от складывающихся условий сезона (табл. 2).

Таблица 1 – Математические модели оптимальных

энергетических затрат и уровня использования техники  
на весенних полевых механизированных работах ( $S = 8\ 000$  га)

Параметр модели	Тип сезона	Уравнение математической модели
Энергозатраты, МДж/га	Весенние механизированные работы	
Прямые		$Y_{\text{пр}} = 2669,1 - 101,2 \cdot x_1 - 111,6 \cdot x_2 - 202,4 \cdot x_3$
Косвенные		$Y_{\text{кос}} = 980,7 - 48,0 \cdot x_1 - 52,9 \cdot x_2 - 96,1 \cdot x_3$
	Опрыскивание сахарной свеклы	
Прямые		$Y_{\text{пр}} = 305,6 - 19,0 \cdot x_1 - 19,4 \cdot x_2 - 65,3 \cdot x_3$
Косвенные		$Y_{\text{кос}} = 286,1 - 17,8 \cdot x_1 - 18,2 \cdot x_2 - 61,2 \cdot x_3$
Оптимальное количество МТА, шт.	Тип сезона	Уравнение математической модели
Весенние механизированные работы	Теплый	$Y = 128,9 - 8,9 \cdot x_1 - 9,6 \cdot x_2 - 17,9 \cdot x_3$
	Средний	$Y = 97,4 - 6,4 \cdot x_1 - 7,1 \cdot x_2 - 12,6 \cdot x_3$
	Холодный	$Y = 84,0 - 5,3 \cdot x_1 - 5,8 \cdot x_2 - 11,0 \cdot x_3$
Опрыскивание сахарной свеклы против сорняков	Теплый	$Y = 22,3 - 1,3 \cdot x_1 - 1,3 \cdot x_2 - 4,8 \cdot x_3$
	Средний	$Y = 20,0 - 1,3 \cdot x_1 - 1,3 \cdot x_2 - 4,0 \cdot x_3$
	Холодный	$Y = 18,0 - 1,0 \cdot x_1 - 1,0 \cdot x_2 - 3,8 \cdot x_3 + 0,3 \cdot x_{13} + 0,3 \cdot x_{23}$

На весенних полевых механизированных работах количество требуемых агрегатов в теплый сезон значительно выше, чем в холодный. Так для выполнения предпосевной культивации и посева сахарной свеклы в агротехнические сроки в теплый сезон при низком уровне эксплуатации техники необходимо 12 и 72 агрегата соответственно, то в холодный их количество сокращается до 8 и 47 агрегатов. Так установлено, что требуемое количество агрегатов сильно зависит от уровня эксплуатации техники. К примеру, на предпосевной культивации и посева при низком уровне эксплуатации в средний сезон количество необходимых агрегатов равно 9 и 54 соответственно, то при высоком уровне эксплуатации техники их количество сокращается до 5 и 31 агрегата.

Таблица 2 – Требуемый оптимальный состав технологических звеньев на весенних полевых работах в разные по природно-климатическим условиям сезоны (S = 8 000 га)

Технологическая операция	МТА, входящие в состав звена	Количество МТА при различных условиях проведения механизированных работ, шт.					
		теплый		средний		холодный	
		Уровень эксплуатации техники					
		низ-кий	высо-кий	низ-кий	высо-кий	низ-кий	высо-кий
<b>Весенние полевые механизированные работы</b>							
Предпосевная культивация	John Deere 8420+Lemken Kompaktor-800	12	7	9	5	8	5
Посев сахарной свеклы	МТЗ-82+ Monopil SE-12	72	41	54	31	47	27
<b>Опрыскивание сахарной свеклы против сорняков</b>							
Транспортировка воды	МТЗ-1221+РЖТ-10	9	5	8	4	7	4
Опрыскивание	МТЗ-82 + RAU Sprido Train	26	14	24	12	22	11

На работах, связанных с опрыскиванием всходов сахарной свеклы, наблюдаются аналогичные зависимости. Количество потребных агрегатов и удельные энергозатраты также уменьшаются от теплого сезона к холодному. Верхняя граница оптимального числа опрыскивателей в сезон с теплыми условиями составила 26 агрегатов, в сезон с холодными условиями их потребность уменьшается до 11 агрегатов.

В результате внедрения разработанной интенсификации свекловодства и оптимизации технологических процессов на весенних полевых механизированных работах наблюдается положительный энергетический эффект в среднем равный 14,1 %. При этом общие удельные энергетические затраты сокращаются от 1 023 МДж/га при высоком уровне эксплуатации техники в холодный влажный сезон до 6 447 МДж/га в теплый сухой сезон при низком уровне использования техники.



## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52647-2006. Свекла сахарная. Технические условия. 6 с.
2. Методология и методика энергетической оценки агротехнологий в агроландшафтах. Москва.: МСХА им. К. А. Тимирязева. 2007. 21 с.

### **MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL LINES OF PLANTING AND SPRAYING OF SUGAR BEET BASED ON ENERGY RESOURCES ECONOMY**

***Keywords:** energy efficiency factor, mathematical model, spraying, planting of sugar beet, technogenic energy, energy equivalent, energy costs.*

***Annotation.** A mathematical model of energy assessment of mechanized processes of cultivating of sugar beet is made. Presented the main results of the production test and simulation modeling for use wile mechanized works in spring.*

---

**ДЕНЦОВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ** – аспирант кафедры механизации животноводства и электрификации сельского хозяйства, учебный мастер кафедры физики и прикладной механики, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, Нижний Новгород, (maikl71988@mail.ru)

**DENTSOV MIKHAIL NIKOLAYEVICH** – aspirant of the chair of cattle breeding and electrification of agriculture, training master of the chair of physics and applied mechanics, Nizhny Novgorod state agricultural academy, Russia, Nizhny Novgorod, (maikl71988@mail.ru)

---