



Оценка и снижение энергозатрат зерноочистительно-сушильного комплекса

Юрий Николаевич Сапьян,
старший научный сотрудник;
Владимир Андреевич Колос,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;

Магомедсалам Иминович Сулейманов,
кандидат технических наук, научный сотрудник;
Елена Николаевна Кабакова,
ведущий специалист, e-mail: icgsmvim@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Снижение энергозатрат на зерноочистительно-сушильных комплексах – актуальная, но сложная задача для сельхозпроизводителей. При организации работы зерносушильного комплекса возникает задача формирования оптимальных с позиции энергосбережения вариантов конфигурации поточных линий с учетом свойств исходного материала и товарной продукции, состояния и технического уровня оборудования и других факторов. Применение метода энергосберегающей оптимизации для повышения энергоэффективности и сокращения энергозатрат зернокомплекса в научно-методической литературе освещено недостаточно. *(Цель исследования)* Адаптировать критерии и алгоритм энергосберегающей оптимизации полевой технологии к оценке и повышению статуса энергоэффективности, снижению энергозатрат и выявлению максимально доступного потенциала энергосбережения зернокомплекса при энергоаудите. *(Материалы и методы)* Рассмотрели проблему снижения энергоемкости поточных линий зернокомплекса. Обосновали применимость метода и частных критериев энергоэффективности послеуборочных технологий к задаче его энергосберегающей оптимизации. Разработали алгоритм оптимизации с математическим описанием и набором входных данных. *(Результаты и обсуждение)* Сформулировали условие присвоения зернокомплексу статуса энергоэффективного. Установили, что при использовании эталонного базового аналога, дефиците финансовых средств у производителя и отсутствии спонсоров данный статус недостижим, а ожидаемый потенциал прямого энергосбережения практически нереализуем. Предложили целевую функцию энергосберегающей оптимизации зернокомплекса – максимум доступного потенциала прямого энергосбережения и метод вычисления. *(Выводы)* Обосновали критерии, разработали алгоритм энергосберегающей оптимизации зернокомплекса, обеспечивающей снижение прямой энергоемкости поточных линий и энергозатрат. Разработали методики определения и анализа входных и выходных данных, оценки статуса энергоэффективности, принципы обновления оборудования. Предложили метод вычисления потенциала прямого энергосбережения в рамках существующих технико-технологических и финансовых ограничений. Практическое применение результатов работы обеспечит корректную, достоверную и оперативную оценку энергозатрат на зернокомплексе и их снижение до доступного минимума.

Ключевые слова: зерноочистительно-сушильный комплекс, поточные линии, энергозатраты, энергосберегающая оптимизация, вычислительный алгоритм, энергоэффективность, потенциал энергосбережения.

Для цитирования: Сапьян Ю.Н., Колос В.А., Сулейманов М.И., Кабакова Е.Н. Оценка и снижение энергозатрат зерноочистительно-сушильного комплекса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 51-55. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-51-55.

Assessing and Reducing Energy Consumption of Grain Cleaning and Drying Equipment

Yuriy N. Sap'yan,
senior research engineer;
Vladimir A. Kolos,
Ph.D.(Eng.), key research engineer;

Magomedsalam I. Suleymanov,
Ph.D.(Eng.), research engineer;
Elena N. Kabakova,
key expert

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Reducing energy costs of using grain cleaning and drying equipment is an urgent, but difficult task for agricultural producers. When organizing the operation of grain drying equipment, the problem arises of forming optimal configuration options for production lines from the standpoint of energy saving, taking into account the properties of the source material and commercial

products, the condition and technical level of the equipment, and other factors. The use of the energy-saving optimization method to increase energy efficiency and reduce the energy consumption of grain drying equipment in the scientific and methodological literature is not sufficiently covered. (*Research purpose*) To adapt the criteria and algorithm of energy-saving optimization of field technology to assess and improve the status of energy efficiency, reduce energy consumption and identify the maximum available energy saving potential of grain drying equipment during energy audit. (*Materials and methods*) The authors examined the problem of reducing the energy intensity of the production lines of grain drying equipment. They justified the applicability of the method and particular criteria for the energy efficiency of post-harvest technologies to the task of its energy-saving optimization. They also developed an optimization algorithm with a mathematical description and a set of input data. (*Results and discussion*) The authors determined the requirements for grain drying equipment to be considered energy efficient. It was established that when using the reference basic analogue, the manufacturer's shortage of financial resources and the absence of sponsors, this status is unattainable, and the expected direct energy saving potential is practically unachievable. The authors proposed the target function of energy-saving optimization of grain drying equipment - the maximum available direct energy-saving potential and the calculation method. (*Conclusions*) The paper provides the offered criteria and a developed algorithm for energy-saving optimization of grain drying equipment, which reduces the direct energy consumption of production lines and energy costs. The authors developed methods for determining and analyzing input and output data, evaluating energy efficiency status, and principles for updating equipment. They proposed a method for calculating the direct energy-saving potential taking into account the existing technical, technological and financial limitations. The practical application of the study results will ensure correct, reliable and efficient assessment of energy costs of using grain drying equipment and their reduction to an affordable minimum.

Keywords: grain cleaning and drying equipment, production lines, energy consumption, energy saving optimization, computational algorithm, energy efficiency, energy saving potential.

■ **For citation:** Sapyan Yu.N., Kolos V.A., Suleymanov M.I., Kabakova E.N. Otsenka i snizhenie energozatrat zernoochistitel'no-sushil'nogo kompleksa [Evaluation and reduction of energy consumption of grain cleaning and drying equipment]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 51-55 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-51-55.

Снижение энергозатрат на зерноочиститель-но-сушильных комплексах (ЗСК) – актуальная, но сложная для сельхозпроизводителей задача, которая решается с помощью сертифицированных энергоаудиторов. Уровень снижения характеризуется энергосберегающим потенциалом относительно базового образца – эталонного аналога с самыми высокими технико-экономическими показателями в данном районе, местности или регионе [1, 2]. При организации работы ЗСК возникает задача формирования оптимальных с позиции энергосбережения вариантов конфигурации поточных линий с учетом назначения, физических, биохимических и технологических свойств исходного материала и товарной продукции, состояния и технического уровня оборудования, систем контроля-управления процессами и других действующих факторов [3-5]. Однако применение энергосберегающей оптимизации как средства повышения энергетической эффективности (ЭЭ) и сокращения энергозатрат ЗСК, в отличие от технологий выращивания зерновых и других культур [3, 6, 7], в научно-методической литературе освещено недостаточно.

Цель исследования – адаптировать критерии и алгоритм энергосберегающей оптимизации полевой технологии к оценке и повышению статуса ЭЭ, снижению энергозатрат и выявлению максимально доступного потенциала энергосбережения ЗСК при энергоаудите.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Обработка урожая уменьшает энергопотенциал конечной продукции, поэтому для энергосберегающей оптимизации ЗСК неприменимы такие интегральные критерии полевой технологии, как коэффициент и индекс уровня полной и прямой ЭЭ, включающие этот показатель [1].

В связи со сравнительно небольшой номенклатурой используемых топливно-энергетических (ТЭР) и других ресурсов оптимизацию ЗСК достаточно проводить в технологическом цикле с оценкой результатов частными критериями. К ним относятся базовые, начальные и прогнозные расходы ТЭР на единицу продукции поточных линий, прямая энергоемкость ее производства, прямые энергозатраты и потенциал прямого энергосбережения (ППЭС).

Для их вычисления необходим математический алгоритм и набор постоянных и вариативных входных данных, таких как производительность и операционные расходы ТЭР поточных линий, масса поступившего зерна и конечной продукции обследуемого и базового ЗСК. Эти данные определяют после ознакомления с техдокументацией, наблюдения за работой, верификации и актуализации схем поточных линий и операционных карт. При сомнениях в соответствии фактических и паспортных данных отдельных машин проводят выборочные эксперименты с приборными измерениями на штатных технологических операциях. Часовой расход жидкого топлива сушилкой измеряют объемным расходомером *Promass 80/83F*



DNS, природного газа – Prowirl 72F DN40. Расход биотоплива (БТ) определяют по взвешенной массе, сгоревшей в топочном агрегате за время опыта. Потребляемую машинами электрическую мощность измеряют анализатором качества электроэнергии MI 2492 PowerQ без разрыва электрических цепей.

Сопоставимый операционный расход топлива z -й сушилкой на традиционном топливе (ТТ), жидком или газообразном, на сушке s -й продукции t -й культуры рассчитывают по формулам, физ. ед./пл. т:

$$g_{\text{TTzst}} = G_{\text{TTzst}} / W_{\text{ПЛzst}}, \quad (1)$$

где G_{TTzst} – измеренный при экспериментах часовой расход ТТ, физ. ед./ч;

$W_{\text{ПЛzst}} = W_{0\text{zst}} k_{\text{в}} k_{\text{кн}}$ – сопоставимая производительность сушилки, пл. т/ч;

$W_{0\text{zst}} = W_{3\text{zst}}(100 - \omega_3)/(100 - \omega_0)$ и $W_{0\text{zst}} = M_{0\text{zst}}/T_{\text{stz}}$ – производительность по сырому зерну сушилки непрерывного и периодического действия, т/ч;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент влажности зерна до сушки (ω_0) и после сушки (ω_3) [3];

$k_{\text{кн}}$ – коэффициент вида культуры и назначения продукции [3];

$W_{3\text{zst}} = M_{\text{stz}} T_{\text{stz}}$ – производительность сушилки по сухой продукции, т/ч;

M_{stz} и $M_{0\text{stz}}$ – фактическая масса сухого и сырого зерна, т;

T_{stz} – продолжительность эксперимента, ч.

Расход топлива сушилкой на БТ g_{BTzst} рассчитывают по формуле, аналогичной (1), после подстановки соответствующих переменных.

Сопоставимый расход электроэнергии сушилкой на ТТ (БТ), бункером активного вентилирования, кВт·ч/пл. т:

$$g_{\text{эзst}} = P_{\text{zst}} / W_{\text{ПЛzst}}, \quad (2)$$

где P_{zst} – измеренная потребляемая мощность, кВт.

Сопоставимый расход электроэнергии зерноочистительной машиной (эксплуатационный), кВт·ч/эк. т:

$$g_{\text{эзst}} = P_{\text{zst}} / W_{\text{ЭКzst}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{ЭКzst}} = W_{0\text{zst}} k_1 k_2$ – эксплуатационная производительность машины, эк. т/ч;

k_1 – коэффициент, учитывающий вид культуры;

k_2 – коэффициент, учитывающий влажность и засоренность исходного зерна.

Расход электроэнергии новыми исправными машинами, а также транспортерами, нориями и т.п. рассчитывают по установленной мощности, коэффициентам ее использования и паспортной производительности. Сопоставимый расход ТЭР на базовом ЗСК определяют по данным мониторинга, энергоаудита или паспортов машин; при расчетах исходную массу, влажность и засоренность зерна принимают такими же, как на обследуемом ЗСК.

Алгоритм определения оценочных показателей

ЭЭ ЗСК следующий.

Расход ТТ поточной линией на продукцию s -го вида t -й культуры вычисляют по формулам, физ. ед./пл. т:

$$g_{\text{TTst}} = g_{\text{TTzst}} M_{\text{stz}} / M_{\text{st}}, \quad (4)$$

где M_{st} – масса продукции поточной линии с сушилкой на ТТ, пл. т.

Для линии с сушилкой на БТ в виде дров, соломы, пеллет [1, 4, 8, 9] его расход g_{BTst} вычисляют по формуле, аналогичной (4), физ. ед./пл. т

Расход ТТ на внутрихозяйственное производство и транспортировку БТ, переходящий на продукцию, равен, физ. ед./пл. т:

$$g_{\text{TTстБТ}} = g_{\text{TTБТ}} g_{\text{BTst}},$$

где $g_{\text{TTБТ}}$ – суммарный расход ТТ оборудованием, производящим БТ, и средствами доставки его к сушилке, физ. ед./физ. ед.;

Расход электроэнергии линией на s -ю продукцию t -й культуры составит, кВт·ч/пл. т:

$$g_{\text{эст}} = (\sum g_{\text{эзst}} M_{\text{stz}}) / M_{\text{st}}, \quad (5)$$

где $g_{\text{эст}}$ – операционный расход z -й машиной, установкой или другим потребителем, имеющим отношение к линии, кВт·ч/пл. т.

К расходу электроэнергии на продукцию линии с сушилкой на БТ добавляют переходящий расход на производство БТ, кВт·ч/пл. т:

$$g_{\text{TTэст}}^{\text{БТ}} = g_{\text{TT}}^{\text{БТ}} g_{\text{BTst}},$$

где $g_{\text{э}}^{\text{БТ}}$ – расход электроэнергии оборудованием, производящим БТ, кВт·ч/физ. ед.

Определим прямую энергоемкость продукции линии с сушилкой на ТТ, МДж/пл. т:

$$\mathcal{E}_{\text{Пst}} = g_{\text{TTst}} e_{\text{TT}} + g_{\text{эст}} K_{\text{э}}, \quad (6)$$

где e_{TT} – энергосодержание ТТ, МДж/физ. ед. [1];

$K_{\text{э}} = 3,6 \text{ МДж/кВт·ч}$ – коэффициент пересчета единиц электроэнергии.

Прямая энергоемкость линии с сушилкой на БТ, МДж/пл. т:

$$\mathcal{E}_{\text{Пst}} = g_{\text{BTst}} e_{\text{БТ}} + g_{\text{TTst}}^{\text{БТ}} e_{\text{TT}} + (g_{\text{эст}} + g_{\text{эст}}^{\text{БТ}}) K_{\text{э}}. \quad (7)$$

По полученным значениям энергоемкости вычисляют начальные прямые энергозатраты соответственно поточной линии $Q_{\text{Пst}}$ и всего ЗСК $Q_{\text{П}}$, МДж:

$$Q_{\text{Пst}} = \mathcal{E}_{\text{Пst}} M_{\text{st}}; \quad Q_{\text{П}} = \sum \mathcal{E}_{\text{Пst}} Q_{\text{Пst}}. \quad (8)$$

Ожидаемый ППЭС по определению представляет собой соотношение (%):

$$П_{\text{ПО}} = 100 (Q_{\text{П}} - Q_{\text{ПБ}}) / Q_{\text{П}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{ПБ}}$ – энергозатраты базового аналога ЗСК, МДж.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Статус энергоэффективного может быть присвоен обследуемому ЗСК при условии:

$$\frac{\mathcal{E}_{\text{Пст}}}{\mathcal{E}_{\text{ПБст}}} \leq 1, \quad (10)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ПБст}}$ – прямая энергоёмкость s -й продукции t -й культуры базового ЗСК, МДж /пл. т.

На практике уменьшение энергоёмкости поточных линий до базовых значений и ниже требует больших финансовых издержек на обновление оборудования. Поэтому при использовании для сравнения показателей ЭЭ эталонного базового аналога, дефиците финансовых средств и отсутствии спонсоров условие (10) невыполнимо. Аналогично, не может быть реализован ожидаемый (теоретический) ППЭС обследуемого ЗСК (9), производный от энергоёмкости поточных линий. При отсутствии базового аналога выражения (9) и (10) не имеют смысла.

Для снижения энергозатрат после определения по (6)–(10) начальных показателей ЭЭ разрабатывают энергосберегающие мероприятия: организационно-административные – для непосредственного стимулирования экономии ТЭР и технико-технологические (опорные, финансируемые хозяйством, и инновационные, инвестируемые спонсорами) – для реновации объекта. Их анализируют методом экспертных оценок с использованием энергетических и экономических критериев [6-10], а также итеративной процедуры оценки ЭЭ и предлагаемых вариантов состава и схем поточных линий ЗСК.

Наиболее масштабные мероприятия – замена и модернизация машин, не отвечающих современным требованиям к конструкции и параметрам, качеству выполнения операций, надежности, универсальности, технике безопасности и экологии. По этим же показателям на основе прямого сравнения выбирают перспективные энергосберегающие машины с учетом стоимости, модульности, габаритов, операционной производительности и расходов ТЭР.

По результатам дальнейших итеративных оптимизационных вычислений по вариативным входным данным и анализа полученных данных выбирают состав оборудования и конфигурацию поточных линий. Следует начинать с анализа операции сушки – как самой энергоёмкой и лимитирующей производительность поточных линий. Целесообразность применения сушилки на БТ (типа КС-8, «Астра-Ингул», «Риела») или комплектования штатной твердотопливным топочным агрегатом (ВУ-Т-1,5, АТ-1) оценивают по комплексу параметров и фактических эксплуатаци-

онных показателей и, в конечном счете, по соотношениям, аналогичным (10). При этом за базовый вариант принимают линию с сушилкой на ТТ. Не менее важна модернизация систем контроля-управления работой ЗСК, обеспечения качества и сохранности продукции [3-5, 8-10].

По завершении энергоаудита ЗСК формируют план экономически эффективных мероприятий по практической реализации ППЭС, рассматривают факторы, препятствующие его выполнению, и компромиссные решения [6, 7]. Функция цели энергосберегающей оптимизации ЗСК – максимум доступного ППЭС ($P_{\text{ПД}}$), %:

$$P_{\text{ПД}} = 100 (Q_{\text{П}} - Q_{\text{ПД}}) / Q_{\text{П}} \rightarrow \max, \quad (11)$$

где $Q_{\text{ПД}}$ – доступные прогнозные энергозатраты, определяемые по формулам, аналогичным (8), подстановкой соответствующих переменных, МДж.

Решение задачи сводится к поиску условных экстремумов РПД в рамках объективных ограничений подстановкой в (11) различных значений $Q_{\text{ПД}}$, получаемых путем алгоритмизированных итеративных вычислений по формулам (1) – (8).

Выводы

Обосновали критерии и разработали алгоритм энергосберегающей оптимизации ЗСК для повышения ЭЭ, снижения энергозатрат и реализации максимально доступного ППЭС. Представили методики определения и анализа входных и выходных данных, оценки статуса ЭЭ, принципы отбраковки устаревших и выбора новых машин для поточных технологических линий ЗСК, целевую функцию энергосберегающей оптимизации и метод решения в рамках существующих технико-технологических и финансовых ограничений.

Практическое применение алгоритмизированных итеративных вычислений при энергосберегающей оптимизации ЗСК обеспечит корректную, достоверную и оперативную оценку и снижение энергозатрат до доступного минимума.

Материалы статьи могут быть использованы при разработке типовых инструкций по энергоаудиту в сельскохозяйственном производстве, позволяющих существенно повысить ЭЭ и обеспечить практическую реализацию ППЭС послеуборочных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елизаров В.П., Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Максимов Д.А., Морозов Ю.Л. Методика топливно-энергетической оценки производства продукции растениеводства. М.: ВИМ. 2012. 84 с.
2. Ушаков В.Я., Харлов Н.Н., Чубик П.С. Потенциал энергосбережения и его реализация на предприятиях ТЭК. Томск: ТПУ. 2015. 283 с.
3. Чеботарев В.П. Сушка зерна. Теория, расчет, эксперимент. Минск: НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. 2012. 520 с.
4. Данилов Ю.Д. Мероприятия по снижению энергозатрат при сушке зерна // *Успехи современной науки*. Т. 4. №4. 2017. С. 15-17.
5. Сычугов Н.П., Сычугов Ю.В., Исупов В.И. Машины,



агрегаты и комплексы послеуборочной обработки зерна и семян трав (монография). Киров: Веси. 2015. 404 с.

6. Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Кабакова Е.Н. Энергосберегающая оптимизация технологии растениеводства при энергоаудите // *Вестник ВИЭСХ*. 2016. N3(18). С. 24-30.

7. Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Михеев В.В., Ловкис В.Б. Повышение энергоэффективности выращивания биомассы для переработки в биотопливо. *Агропанорама*. 2018. N3(127). С. 18-20.

8. Голубкович А.В., Павлов С.А., Марин С.А., Дадыко А.Н. Сушка зерна с использованием топок на твердом топливе // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N6. С. 9-15.

9. Чижиков А.Г. Пути снижения затрат энергии при сушке зерна // *Наука в Центральной России*. 2014. N3(9). С. 75-81.

10. Чеботарев В.П. Низкотемпературная сушка и режимное хранение зерна. Минск: НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. 2011. 201 с.

REFERENCES

1. Elizarov V.P., Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Maksimov D.A., Morozov Yu.L. Metodika toplivno-energeticheskoy otsenki proizvodstva produktsii rasteniyevodstva [Methodology of fuel and energy assessment of crop production]. Moscow: VIM. 2012. 84 (In Russian).

2. Ushakov V.Ya., Kharlov N.N., Chubik P.S. Potentsial energosberezheniya i yego realizatsiya na predpriyatiyakh TEK [Prospects for energy conservation and its implementation in the energy sector]. Tomsk: TPU. 2015. 283 (In Russian).

3. Chebotarev V.P. Sushka zerna. Teoriya, raschet, eksperiment [Grain drying theory, calculation, experiment]. Minsk: NPTS NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. 2012. 520 (In Russian).

4. Danilov Yu.D. Meropriyatiya po snizheniyu energozatrat pri sushke zerna [Measures to reduce energy consumption during grain drying]. *Uspekhi sovremennoy nauki*. Vol. 4. N4. 2017. 15-17 (In Russian).

5. Sychugov N.P., Sychugov Yu.V., Isupov V.I. Mashiny, agregaty i komplekсы posleuborochnoy obrabotki zerna i semyan trav (monografiya) [Machines, units and facilities of post-harvest processing of grain and grass seeds (monograph)]. Kirov: Vesi. 2015. 404 (In Russian).

6. Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Kabakova Ye.N. Energosberezgayushchaya optimizatsiya tekhnologii rasteniyevodstva pri energoaudite [Energy-saving optimization of crop production technology with energy audit]. *Vestnik VIESH*. 2016. N3(18). 24-30 (In Russian).

7. Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Mikheev V.V., Lovkis V.B. Povyshenie energoeffektivnosti vyrashchivaniya biomassy dlya pererabotki v biotopivo [Improving the energy efficiency of growing biomass for processing into biofuels]. *Agropanorama*. 2018. N3(127). 18-20 (In Russian).

8. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Marin S.A., Dadyko A.N. Sushka zerna s ispol'zovaniyem topok na tverdom toplive [Drying grain using solid fuel furnaces]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. N6. 9-15 (In Russian).

9. Chizhikov A.G. Puti snizheniya zatrat energii pri sushke zerna [Ways to reduce energy costs when drying grain]. *Nauka v Tsentral'noy Rossii*. 2014. N3(9). 75-81 (In Russian).

10. Chebotarev V.P. Nizkotemperaturnaya sushka i rezhimnoye khraneniye zerna [Low-temperature drying and monitoring grain storage]. Minsk: NPTS NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. 2011. 201 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18.10.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 18.10.2019

Статья принята к публикации 26.11.2019
The paper was accepted
for publication on 26.11.2019