

*Н. В. ОБОЛЕНСКИЙ, Д. Ю. ДАНИЛОВ*

## **ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА**

***Ключевые слова:** кассетное устройство, теплоизоляция, лабораторные исследования, производственная апробация, влажность.*

***Аннотация.** Приводится практическое и теоретическое обоснование, а также расчет теплоизоляции устройства для исследования процесса сушки зерна.*

Завершены диссертационные исследования на тему: «Обеспечение кондиционной влажности зерна в фермерских хозяйствах путём создания энергосберегающего кассетного устройства для его сушки».

ГБОУ ВПО НГИЭИ получен патент [1] на полезную модель с названием «Устройство для исследования процесса сушки зерна» (в дальнейшем тексте устройство), созданное и изготовленное на кафедре «Механика и сельскохозяйственные машины».

Для определения целесообразности теплоизоляции устройства его опытный образец подвергся испытаниям в лабораторных (рис.1) и производственных условиях ООО «Кузьминка» Краснооктябрьского района Нижегородской области (рис.2).



Рисунок 1 – Лабораторные исследования теплоизоляции устройства



Рисунок 2 – Производственные исследования теплоизоляции устройства

На рис. 3 и 4 показаны результаты замера посредством инфракрасного тепловизора Flir T-335 температурных полей конструктивных элементов устройства.



Рисунок 3 – Температурное поле с наружной стороны воздуховода при: мощности 5,6 кВт и скорости движения воздуха 4,4 м/с

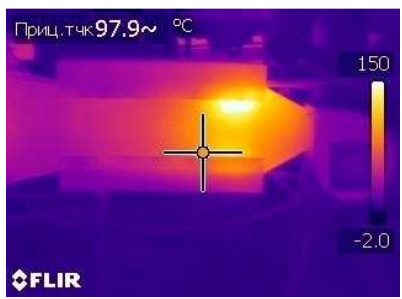
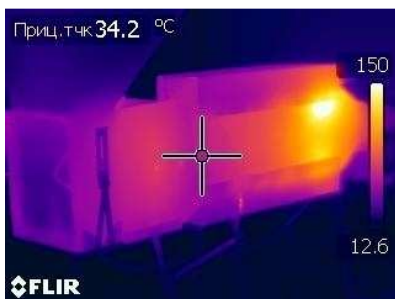
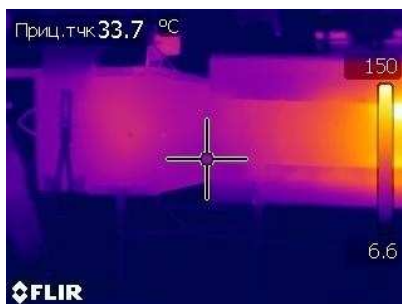
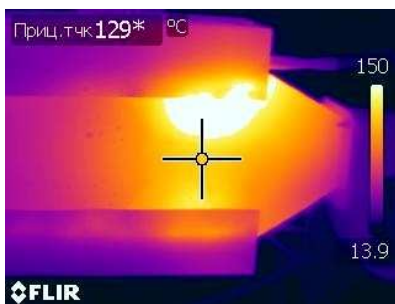


Рисунок 4 – Температурные поля с наружной стороны теплогенератора при: мощности 7,5 кВт и скорости движения воздуха 2,9 м/с

Проведённые исследования показали недопустимо высокие температуры отдельных поверхностей устройства, приводящие к обгоранию красочного покрытия (рис.2) и являющиеся источниками травматизма.

Это обусловило необходимость теоретического обоснования выбора теплоизоляции устройства.

Мощность, необходимая для нагрева сушильного агента (воздуха), рассчитывается по формуле (Вт) [2]

$$P = \frac{GC_p \Delta t_a \psi}{3,6 \tau}, \quad (1)$$

где  $G$  – масса нагреваемой среды, кг;  $C_p$  – удельная теплоемкость нагреваемой среды, кДж/(кг·°C) (табл.19 [2]); перепад между температурами нагретой и абсолютной величиной нагреваемой среды, определяемый по формуле (°C)

$$\Delta t_a = t_a - |t_n|; \quad (2)$$

3,6 – тепловой эквивалент электрической энергии, кДж/(Вт·ч);  $\tau$  – время, за которое требуется нагреть воздух на величину  $\Delta t_a$ , ч;  $\psi$  – коэффициент, учитывающий увеличение мощности на тепловые потери, практические значения которого для не теплоизолированных нагревателей воздуха электрических (НВЭ) 1,03.

Рассчитав необходимую для нагрева воздуха мощность, приступают к выбору и расчету потребного количества ТЭН, их размещению и определению габаритов НВЭ (в устройстве это теплогенератор).

Окончательно габариты НВЭ определяют в зависимости от их типа.

Определив габариты НВЭ, прочность деталей и плотность их соединений, необходимо вычислить температуру его поверхности и КПД.

Температуру наружной поверхности плоских стенок рассчитывают по формуле (°C)

$$t_{\text{ст. П}} = \frac{K_{\text{п}} \Delta t_{\text{сд}}}{\alpha_{\text{п}}} + t_{\text{сд}}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент теплопередачи плоских стенок, Вт/(м·°C);  $t_{\text{сд}}$  – температура среды, окружающей изделие, в частном случае может быть  $t_{\text{сд}} = t_{\text{н}}$ , °C;  $\alpha_{\text{п}}$ , – суммарный коэффициент теплоотдачи плоских стенок, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\Delta t_{\text{сд}}$  – перепад между температурой, окружающей изделие и нагреваемой в нём среды (°C):

$$\Delta t_{\text{сд}} = t_{\text{а}} - t_{\text{сд}}. \quad (4)$$

Величина  $\alpha_{\text{п}}$  при практических расчетах определяется по заданной температуре наружной поверхности НВЭ и выражаются уравнениями для плоской стенки (по Нуссельту) [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)]:

$$\alpha_{\text{п}} = 9,75 + 0,07 (t_{\text{д}} - t_{\text{сд}}), \quad (5)$$

где  $t_{\text{д}}$  – температура наружной поверхности, допустимая по условиям эксплуатации, °C.

Коэффициент теплопередачи для плоской стенки определяется из формулы

$$\frac{1}{K_{\text{п}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{а}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  – толщина теплопередающей стенки, м;  $\alpha_{\text{а}}$  – коэффициент теплоотдачи нагреваемого в НВЭ воздуха, который при некоторых практических расчетах НВЭ можно вычислять по формулам Шака, Вт/(м<sup>2</sup>·°C). В частности, коэффициент турбулентного потока воздуха в пучке ТЭН прямоугольных НВЭ [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)]:

$$\alpha_{\text{а}} = f_{\text{а,б}} f(\text{Ш})'' \frac{v_{0\text{max}}^{0,6}}{d_{\text{эк}}^{0,39}} = f_{\text{а,б}} \frac{1,6 \sqrt[4]{T_{\text{к}}} v_{0\text{max}}^{0,61}}{d_{\text{эк}}^{0,39}}, \quad (7)$$

где  $v$  – средняя скорость движения среды в подогревателе, м/с;  $v_0$  – скорость газа при  $t = 0$  °С и давлении  $10,2 \cdot 10^{-6}$  Па, определяемая по формуле (м/с)

$$v_0 = \frac{273v}{273 + t_a}; \quad (8)$$

$T_K$  – температура нагреваемой среды по Кельвину;

$d_{\text{ЭК}}$  – диаметр сечения, эквивалент-ного прямоугольному, определяемый по формуле (2.3);  $f_{a,b}$  – коэффициент, учитывающий способ расположения ТЭН, а также отношение шага  $s$  к их диаметру, определяемый по формулам: для коридорного расположения ТЭН (рис.5, а)

$$f_a = 1,07 - 0,65 \frac{\left(\frac{s_2}{D_{\text{ЭК}}}\right)^{1,5}}{\left(\frac{s_1}{D_{\text{ЭК}}}\right)^4}, \quad (9)$$

для шахматного расположения ТЭН (рис.5, б)

$$f_b = 0,874 + \frac{0,286}{\left(\frac{s_1}{D_{\text{ЭК}}}\right)^2} + 0,84 \left(\frac{s_2}{D_{\text{ЭК}}}\right), \quad (10)$$

где  $s_1, s_2$  – шаги поперечного и продольного расположения ТЭН, м.

Если представить НВЭ как замкнутый объем с температурой воздуха внутри него  $t_a = \text{const}$  и омываемый воздухом с температурой  $|t_n| = \text{const}$ , то за температуру его стенки, имеющей толщину 1,5 мм, можно принять полу-сумму температур  $t_a$  и  $|t_n|$ . В самом же деле внутренняя полость НВЭ сообщается с внешней, и в ней, кроме разогретого воздуха, имеются разогретые ТЭН [3], нагревающие стенку еще и посредством излучения, вследствие чего фактическая температура

$$t_{\text{CT}} > 0,5 (t_a + |t_{\text{H}}|), \quad (11)$$

в частности, при установке НВЭ на открытом воздухе (°C):

$$t_{\text{CT}} = 0,535 (t_a + |t_{\text{H}}|), \quad (12)$$

а при установке в теплоизолированном корпусе (°C):

$$t_{\text{CT}} = 0,740 (t_a + |t_{\text{H}}|). \quad (13)$$

Более высокой температуры стенки НВЭ при работе ее в теплоизолированном корпусе можно достичь нагревом воздуха внутри этого корпуса. Экспериментальные исследования проф. Оболенского Н.В. показывают, что температура стенки НВЭ в этом случае (°C):

$$t_{\text{CT}} = 0,560 (t_a + t_{\text{CD}}), \quad (14)$$

а при установке в теплоизолированном корпусе (°C):

$$t_{\text{CD}} = 1,786 t_{\text{CT}} - t_a. \quad (15)$$

Рассчитанная температура наружной поверхности изделия сравнивается с заданной или допустимой для подогревателей данного типа. Если полученная расчетная температура поверхности подогревателя больше заданной или допустимой, следует заменить материал корпуса (в случае небольшой разницы) или изолировать НВ, ввести в его конструкцию защитный кожух и повторить расчет (в случае значительной разницы и невозможности замены материала). Изменяя параметры теплоотдающей поверхности, материал и толщину корпуса, вводя теплоизоляцию и кожухи, можно добиться необходимых результатов. Однако следует по возможности избегать введения дополнительных элементов в конструкции подогревателей, так как они значительно увеличивают их габариты, массу и стоимость. Поэтому теплоизоляционные материалы в конст-

рукциях подогревателей следует применять только в обоснованных случаях. Например, для уменьшения тепловых потерь емкостных подогревателей жидкостей, в которых среда в нагретом состоянии должна сохраняться значительное время без подогрева, или подогревателей, температура наружных поверхностей которых без теплоизоляции превышает допустимые нормы.

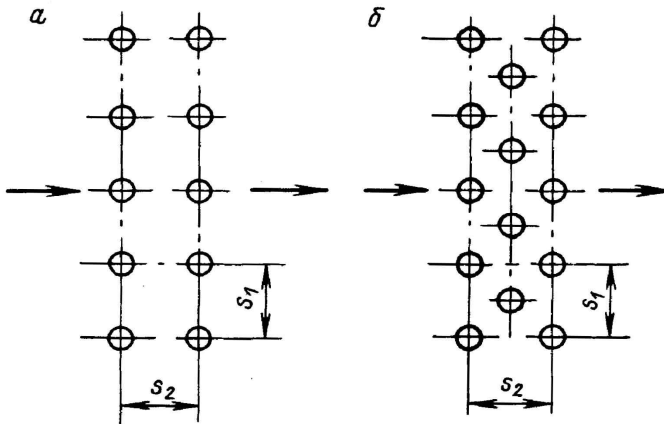


Рисунок 5 – Схемы расположения ТЭН:

*a* – коридорная; *б* – шахматная.

$s_1, s_2$  – шаг между оболочками ТЭН

Расчет температуры наружной поверхности подогревателей, имеющих тепловую изоляцию и кожухи, ведется с введением в формулу (5.6) дополнительных слагаемых:

$$\frac{1}{K_{\text{п}}} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta'_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{\delta'_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_n}; \quad (16)$$

где  $\delta'_1, \dots, \delta'_n$  – толщина изоляции, кожуха и т. д., м;  
 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – коэффициент теплопроводности материалов слоя изоляции, кожуха и т. д., Вт/(м·°С);  $\alpha_a$  и  $\alpha_n$  – соответственно



коэффициенты теплоотдачи турбулентного потока воздуха нагреваемого в устройстве и суммарный коэффициент теплоотдачи плоских стенок, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Тепловыделения (тепловые потери) с нагретой поверхности определяются по формуле (Вт)

$$\phi_{\text{п}} = \alpha F_{\text{пв}} (t_{\text{пв}} - t_{\text{сд}}), \quad (17)$$

где  $F_{\text{пв}}$  – площадь теплоотдающей поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $t_{\text{пв}}$  – температура теплоотдающей поверхности, в частных случаях  $t_{\text{пв}} = t_{\text{ст}}$ , °C.

Тепловые потери изделия, имеющего несколько различно ориентированных поверхностей, равны (Вт):

$$\phi_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \phi_{\text{п}i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i F_{\text{пв}i} (t_{\text{пв}i} - t_{\text{сд}i}), \quad (18)$$

где  $n$  – число теплоотдающих поверхностей.

Теплоотдача в среду, охлаждающую изделие, определяется по формуле (Вт)

$$\phi_{\text{пв}} = \frac{Y' \gamma C_p \Delta t'_{\text{сд}}}{3,6}, \quad (19)$$

где  $Y'$  – расход воздуха через изделие, м<sup>3</sup>/ч;  $\Delta t'_{\text{сд}}$  – перепад температур между температурой нагретого воздуха (агента сушки) охлаждающей среды и температурой среды, окружающей НВ (°C):

$$\Delta t'_{\text{сд}} = t_{\text{н ср}} - t_{\text{сд}}. \quad (20)$$

Чтобы рассчитать КПД изделия, сначала определяют тепловые потери по формуле (19) или (Вт)

$$\phi_{\text{пп}} = K_{\text{п}} F_{\text{п}} (t_{\text{пв}} - t_{\text{сд}}); \quad (21)$$

где  $F_{\text{п}}$  – площадь плоской стенки (поверхности), м<sup>2</sup>.

Расчетный КПД в общем случае определяется из отношения утилизируемой части мощности к потребному

количеству энергии для тепловой обработки среды по формуле

$$\eta = \frac{P - \sum_{i=1}^n \phi_{\text{п.ц}}}{P}. \quad (22)$$

КПД нагревателя не должен быть менее 95 %. В том случае, когда расчетный КПД окажется меньше допустимого, следует ввести в конструкцию изделия тепловую изоляцию, увеличить первоначально принятую ее толщину или применить другой теплоизоляционный материал с меньшим коэффициентом теплопроводности и повторить расчет.

Из исследований опубликованных в [2] следует, что при обеспечении КПД нагревательного устройства больше 95 % температуры его поверхностей не превышают норм, требуемых Правилами техники безопасности.

Сущность практического расчета теплоизоляции кассетного устройства состоит из выбора теплоизоляционного материала и расчета его толщины.



Рисунок 6 – Теплоизолированное устройство для сушки зерна

Для теплоизоляции устройства (рис.6) выбран утеплитель изолвер фольгированный, а для расчета её толщины принята формула (2.22), из которой следует, что толщина слоя теплоизоляции, м:

$$\delta'_1 = \lambda_1 \left( \frac{1}{K_{\text{п}}} - \frac{1}{\alpha_a} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} - \frac{\delta'_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{п}}} \right), \quad (23)$$

где  $\lambda_{\text{ст}}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_{\text{п}}$  – коэффициенты теплопроводности материалов стенки, теплоизоляции и фольги, Вт/(м·°C):  $\lambda_{\text{ст}} = 52$ ,  $\lambda_1 = 0,05$ ,  $\lambda_{\text{п}} = 230$ ;  $\delta_{\text{ст}}$ ,  $\delta'_1$ ,  $\delta'_{\text{п}}$  – толщины стенки, теплоизоляции и фольги, м;  $\delta_{\text{ст}} = 0,002$ ,  $\delta'_1 = 0,0002$ ;  $K_{\text{п}}$  – коэффициент теплопередачи плоских стенок, Вт/(м·°C);  $\alpha_{\text{п}}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи плоских стенок, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\alpha_a$  – коэффициент теплоотдачи нагреваемого в теплогенераторе воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

$\alpha_a$  определяем по формуле (7), для чего рассчитываем  $f_a$  по формуле (9)  $D_3$

$$f_a = 1,07 - 0,65 \frac{\left( \frac{0,11}{0,009} \right)^{1,5}}{\left( \frac{0,1}{0,009} \right)^4} = 1,068;$$

$v_0$  по формуле (8)

$$v_0 = \frac{273 \cdot 3,8}{273 + 60} = 3,11 \text{ м/с};$$

$D_3$  – диаметр сечения кожуха эквивалентного прямоугольному, определяем по формуле, м

$$D_3 = \sqrt{\frac{4bh}{\pi}}, \quad (24)$$

где  $b$  – ширина живого сечения теплогенератора, м;  
 $h$  – высота живого сечения теплогенератора, м;

$$D_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,22 \cdot 0,35}{\pi}} = 0,31 \text{ м}.$$

Таким образом,

$$\alpha_g = 1,068 \frac{1,6 \sqrt[4]{333} \cdot 3,11^{0,61}}{0,31^{0,39}} = 23,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

$\alpha_n$  определяем по формуле (5):

$$\alpha_n = 9,75 + 0,07(35 - 20) = 10,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

$K_n$  определяем из формулы (6), Вт/ (м<sup>2</sup>·°C),

$$K_n = 10,8 \times (35 - 20) : 40 = 4,05.$$

Расчётная толщина слоя теплоизоляции будет, м:

$$\delta_1 = 0,05 \left( \frac{1}{4,05} - \frac{1}{23,1} - \frac{0,002}{52} - \frac{0,0002}{230} - \frac{1}{10,8} \right) = 0,11.$$

Принимаем толщину изоляции равной двум слоям изоверафольгированно, выпускающегося толщиной 0,05 м, т.е. равной 0,1 м.

Для проверки правильности расчета толщины изоляции по формуле (21) определяем тепловые потери, Вт,

$$\phi_{n1} = 4,05 \times 1,82(35 - 20) = 113,6,$$

а по формуле (22) – КПД, который не должен быть менее 95 %.

$$\eta = \frac{4900 - 113,6}{4900} = 0,977.$$

Процесс отработки теплоизоляции опытного образца устройства отражен на рис. 7



Рисунок 7 – Экспериментальная обработка теплоизоляции

В таблице 1 приведены сравнительные данные температур конструкционных элементов теплоизолированного и не теплоизолированного устройства.

Адекватность результатов теоретического и экспериментального исследования определяется степенью согласованности результатов расчетов по формулам выбранных математических моделей исследуемых процессов с экспериментальными данными.

Анализ данных показывает, что введение теплоизоляции понижает температуры стенок теплогенератора на  $49,9...57,6$ , а стенок воздуховода на  $17,7...18,7$  °С, т.е. понижает температуры с недопустимых  $38,5...40,1$  °С у стенок воздуховода до  $20,6...21,5$  и с  $70,3...78,8$  до  $20,1...21,2$  °С у стенок теплогенератора.

Таблица 1– Сравнительные данные температур конструкционных элементов теплоизолированного и не теплоизолированного устройства

Конструкционный элемент – стенка	Температуры конструкционных элементов, °С	
	теплоизолированных	не теплоизолированных
теплогенератора правая	20,9	72,4
теплогенератора левая	20,1	70,3
теплогенератора верхняя	21,2	78,8
теплогенератора нижняя	20,7	76,1
воздуховода правая	21,2	39,2
воздуховода левая	20,8	38,5
воздуховода верхняя	21,5	40,1
воздуховода нижняя	20,6	39,3

Таким образом, экспериментально доказано, что конструкция устройства обеспечивает безопасную эксплуатацию, а теоретические расчеты по вышеприведённым формулам позволяют определить наиболее оптимальное решение теплоизоляции.

Выводы:

1. Создано и запатентовано кассетное устройство для сушки зерна.
2. Разработан алгоритм с математическим обеспечением расчета теплоизоляции, произведён расчет, осуществлена теплоизоляция и её исследования опытного образца кассетного устройства для сушки зерна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оболенский Н. В. Электронагрев в сельскохозяйственных обрабатывающих и перерабатывающих производствах: монография. Н.Новгород: НГСХА. 2007. 350 с.
2. Оболенский Н. В. Электронагрев в сельскохозяйственных обрабатывающих и перерабатывающих производствах: монография. Н.Новгород: НГСХА. 2007. 350 с.
3. Патент на полезную модель № 115164 РФ. Устройство для исследования процесса сушки зерна / Н. В. Оболенский, Д. Ю. Данилов (РФ). – 4 с: ил.1. Оpubл. 27.04.2012. Бюлл. № 12.
4. Рудобашта С. П., Оболенский Н. В., Мокеев А. А. Устройство для экологически чистого нагрева воздуха //Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. №11. С.13 – 14.

## NECESSITY OF USE HEAT ISOLATION GADGET FOR RESEARCH OF PROCESS OF CROPS DRYING

**Keywords:** *cassette gadget, heat isolation, laboratory researches, manufacturing approbation, humidity.*

**The summary.** *It is done practical and theoretical necessity and calculation of heat isolation gadget for research of process of crops drying.*

---

**ОБОЛЕНСКИЙ НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и сельскохозяйственные машины», Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино, ([obolenkinv@mail.ru](mailto:obolenkinv@mail.ru)).

**ДАНИЛОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ** – старший преподаватель кафедры «Механика и сельскохозяйственные машины», Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино, ([danilovdy@mail.ru](mailto:danilovdy@mail.ru)).

**OBOLENSKII NIKOLAI VASIL'EVICH** –the doctor of technical sciences, the professor of chair of mechanics and agricultural cars, the Nizhniy Novgorod state engineering-economic institute, Russia, Knyaginino, ([obolenskinv@mail.ru](mailto:obolenskinv@mail.ru)).

**DANILOV DMITRII YUR'EVICH** –the senior teacher of chair of mechanics and agricultural cars, the Nizhniy Novgorod state engineering-economic institute, Russia, Knyaginino, ([danilovdy@mail.ru](mailto:danilovdy@mail.ru)).

---