

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ДВИГАТЕЛЯ КОМБАЙНА ДЛЯ СУШКИ ЗЕРНА ПРИ ПРЯМОМ КОМБАЙНИРОВАНИИ\*

© Бирюков А.Л., Гайдидей С.В.,  
Зефиров И.В., Кузнецова Н.И.



**Александр Леонидович Бирюков**

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия  
имени Н.В. Верещагина  
Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2  
E-mail: biryukov\_alex@mail.ru



**Сергей Владимирович Гайдидей**

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия  
имени Н.В. Верещагина  
Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2  
E-mail: sgajdidej@mail.ru



**Игорь Владимирович Зефиров**

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия  
имени Н.В. Верещагина  
Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2  
E-mail: zefirov1951@yandex.ru



**Наталья Ивановна Кузнецова**

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия  
имени Н.В. Верещагина  
Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2  
E-mail: natashakyza@yandex.ru

*Объектом исследования является зерноуборочный комбайн, конструкция которого позволяет использовать теплоту отработавших газов двигателя для предварительной сушки зерна. Цель – разработать конструкцию такого зерноуборочного комбайна. Проводились теоретические исследования по обоснованию оптимальных конструктивных решений, конструкторские расчеты. Рассмотрена возможность использовать теплоту двигателя комбайна для сушки зерна при прямом комбайнировании. Проанализированы возможные варианты подачи сушильного агента в поток зерновой массы. Анализ известных решений позволил выделить варианты использования теплоты двигателя для подсушки зерна, наиболее оптимальные с точки зрения эффективности сушки и простоты исполнения. Выявлено, что наиболее оптимальным будет способ подачи сушильного агента в вентилятор, подающий воздух на решета, и подачи подогретого воздуха в бункер. Обоснована конструктивная схема модернизированного комбайна. Произведен тепловой расчет теплообменника. Необходимая площадь поверхности теплообменника для зерноуборочного комбайна Вектор-410 составляет 4,57 кв. м.*

*Зерноуборочный комбайн, утилизация теплоты, конструкция, теплообменник, тепловой расчет, подсушка зерна.*

Одной из причин, обуславливающих потери урожая зерновых в России, являются сложные погодные условия в период уборки. Особенно неблагоприятные условия уборки зерновых наблюдаются в Северо-Западном регионе.

Изменения в климате привели к снижению урожайности зерновых культур. Например, резкое падение урожайности зерновых в Вологодской области произошло в 2017 году<sup>1</sup> (табл.). Это связано, в первую очередь, с большим количеством выпавших осадков (до двух месячных норм дождей). Трудности с уборкой зерновых из-за обильных осадков наблюдались и в 2019 году.

Одним из путей сохранения выращенного урожая зерновых является снижение влажности зерна в процессе уборки. В этой области исследователями предлагается ряд конструкций технических устройств и зерноуборочных комбайнов.

Передвижная зерносушилка [1, с. 109–110] включает зернотранспортирующие и воздухоподающие органы, сушильную и воздухоохлаждающую камеры, топку с теплогенератором для твердого, жидкого или газообразного энергоносителя, бункеры влажного и готового (высушенного) зерна. Такая зерносушилка не может агрегатироваться с самоходными комбайнами, так как не имеет рабочих органов для подачи влажного зерна из молотилок. Сушка зерна выполняется смесью воздуха с топочными газами, что ухудшает качество просушиваемого зерна.

Другое техническое решение – комбайн для уборки и сушки зерна [2], который содержит адаптер, молотилку, бункер с

выгрузным шнеком, измельчитель-разбрасыватель соломы и прицепную тележку. Бункер установлен на тележке и расположен за измельчителем-разбрасывателем соломы. Между бункером и измельчителем-разбрасывателем последовательно размещены на прицепной тележке топка с камерой горения и вентилятором и сушильная камера. В качестве топлива для нагревания сушильного воздуха используется измельченная солома. Недостатком такого устройства является исполнение сушильного агрегата на прицепной тележке, что снижает маневренность комбайна. Кроме того, использование для нагрева воздуха теплоты сгорания соломы является сомнительным с точки зрения пожарной безопасности.

Более рациональный и безопасный вариант – не полная сушка зерна, а его частичная подсушка с помощью теплоты двигателя комбайна с последующей досушкой до кондиционной влажности на зерносушильном пункте.

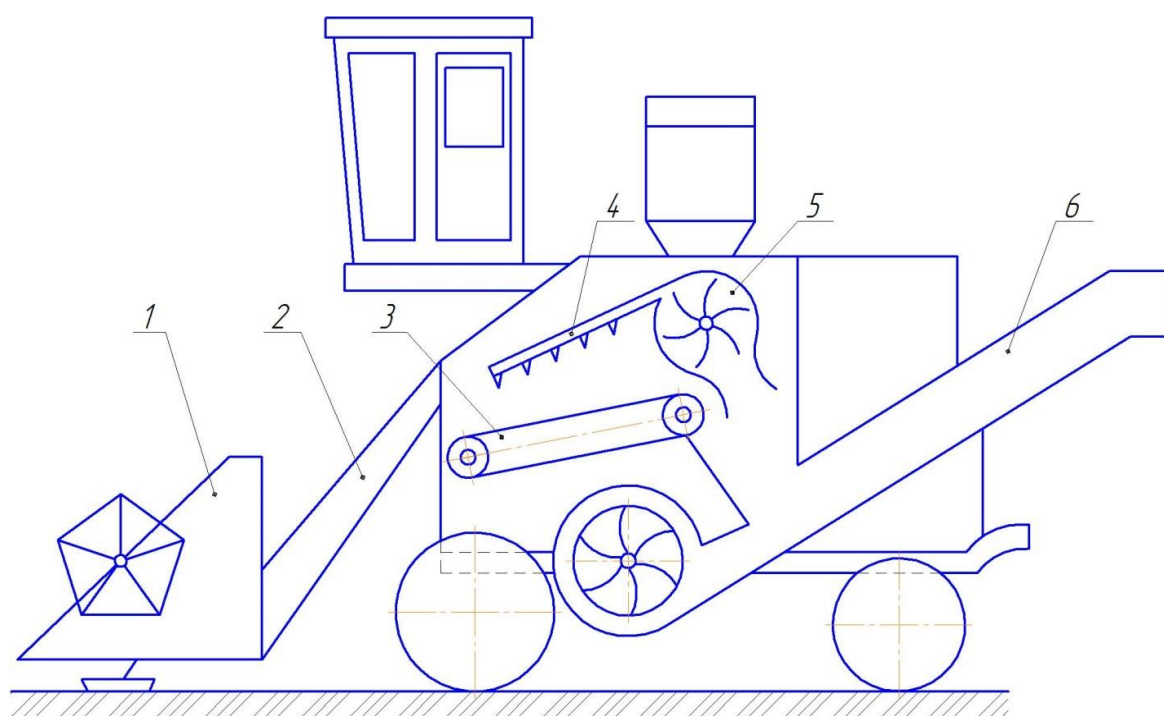
Например, в зерноуборочной машине [3] (рис. 1) скошенная зерновая масса от жатки 1 по наклонной камере 2 поступает на транспортер 3. Далее, проходя по транспортеру 3, зерновая масса подсушивается воздухом, подогретым теплотой радиатора двигателя комбайна. Этот воздух поступает по воздухопроводу 4. Затем зерновая масса напором теплого воздуха дополнительного вентилятора 5 подается к пневмотранспортеру 6. При сходе массы на пневмотранспортер и при движении по нему зерновая масса дополнительно подсушивается отработанными газами двигателя.

<sup>1</sup> Вологодская область в цифрах. 2018: кр. стат. сб. / Вологдастат. Вологда, 2019. С. 80. URL: <https://vologdastat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%92%D0%9E%20%D0%B2%20%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%85.pdf> (дата обращения 29.05.2020).

**Таблица. Урожайность зерновых по Вологодской области, ц/га**

Культура	2014 год	2015 год	2016 год	2017 год	2018 год	средняя
Зерновые и зернобобовые культуры	22,1	22,0	19,8	16,7	15,9	19,3
Рожь озимая	25,3	16,8	17,0	13,1	15,6	17,6
Пшеница озимая	32,6	13,8	25,1	12,1	7,9	18,3
Пшеница яровая	17,6	20,5	17,3	16,8	15,2	17,5
Ячмень яровой	23,6	23,0	21,2	17,3	16,7	20,4

Источник: Вологодская область в цифрах. 2018: кр. стат. сб. / Вологдастат. Вологда, 2019. 148 с. URL: <https://vologdastat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%92%D0%9E%20%D0%B2%20%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%85.pdf> (дата обращения 29.05.2020).



**Рис. 1. Схема подсушки зерновой массы при уборке зерна комбайном**

Такое техническое решение имеет один существенный недостаток – в качестве теплоносителя на последнем этапе здесь используются отработавшие газы двигателя, содержащие как токсичные, так и канцерогенные вещества. Эффект от воздействия такого теплоносителя на зерновую массу, являющуюся продуктом питания, будет отрицательным. Кроме того, возможно снижение всхожести семенного зерна.

Нами были рассмотрены варианты подачи сушильного агента в поток зерновой массы в зерноуборочном комбайне [4–7].

Сушильный агент в поток зерновой массы в зерноуборочном комбайне можно подать:

- в наклонную камеру;
- в вентилятор;
- в зерновой шнек навстречу потоку зерна;
- в зерновой элеватор навстречу потоку зерна;
- в бункер.

При подаче сушильного агента в наклонную камеру сушильный агент будет распределяться по поступающей скошенной

зерновой массе, эффективность сушки окажется низкой, т. к. сушильный агент будет контактировать со стеблями и листьями.

При подаче сушильного агента в вентилятор эффективность сушки, несмотря на то что сушильный агент будет также контактировать со стеблями и листьями, достигается за счет большой плотности потока сушильного агента, проходящего через разреженную массу зерна.

При подаче в зерновой шнек навстречу потоку зерна и в зерновой элеватор навстречу потоку зерна эффективность сушки будет недостаточна по причине малого времени нахождения зерна в потоке сушильного агента и плотного состояния зерна.

При подаче сушильного агента в бункер время обработки окажется более продолжительным, что является достоинством такого способа. Однако необходимо ограничивать температуру сушильного агента.

Таким образом, на наш взгляд, наиболее оптимальным будет способ подачи сушильного агента в вентилятор, подающий воздух на решета, и подачи подогретого воздуха в бункер.

Нагрев сушильного агента будет производиться от системы отработавших газов и от системы охлаждения через рекуперативные теплообменники, один из которых, кроме этого, выполняет функции глушителя.

Предлагаемая схема модернизации комбайна с предварительной сушкой зерна за счет теплоты отработавших газов представлена на *рис. 2*.

Модернизация комбайна заключается в установке двух аналогичных теплообменников для подогрева воздуха теплотой отработавших газов и охлаждающей жидкости, вентиляторов для подачи воздуха в теплообменники, воздухопроводов.

Подсушка зерна на решетках осуществляется следующим образом. Отработав-

шие газы из двигателя через патрубок 1 (*рис. 2а*) поступают в теплообменник 2 и, отдав теплоту в нем, выходят через патрубок 6 в окружающую среду. Подогреваемый воздух подается вентилятором 5 в теплообменник, где нагревается и проходит через воздухопровод 3 к вентилятору, направляющему его плотным потоком на решета.

Подсушка зерна в бункере осуществляется следующим образом. Охлаждающая жидкость из системы охлаждения поступает через патрубок 1 (*рис. 2б*) в теплообменник 2 и, отдав теплоту в нем, возвращается обратно в систему охлаждения через патрубок 3. Подогреваемый воздух подается вентилятором 4 в теплообменник, где нагревается, и попадает через воздухопровод 5 в перфорированный в нижней части горизонтально расположенный в бункере воздухопровод, из которого поток воздуха, проходя через слой зерна и забирая влагу, выходит в окружающую среду.

Для определения потребной для сушки зерна при прямом комбайнировании теплоты проведен тепловой расчет теплообменника.

Уравнение теплового баланса теплообменника имеет вид [8]:

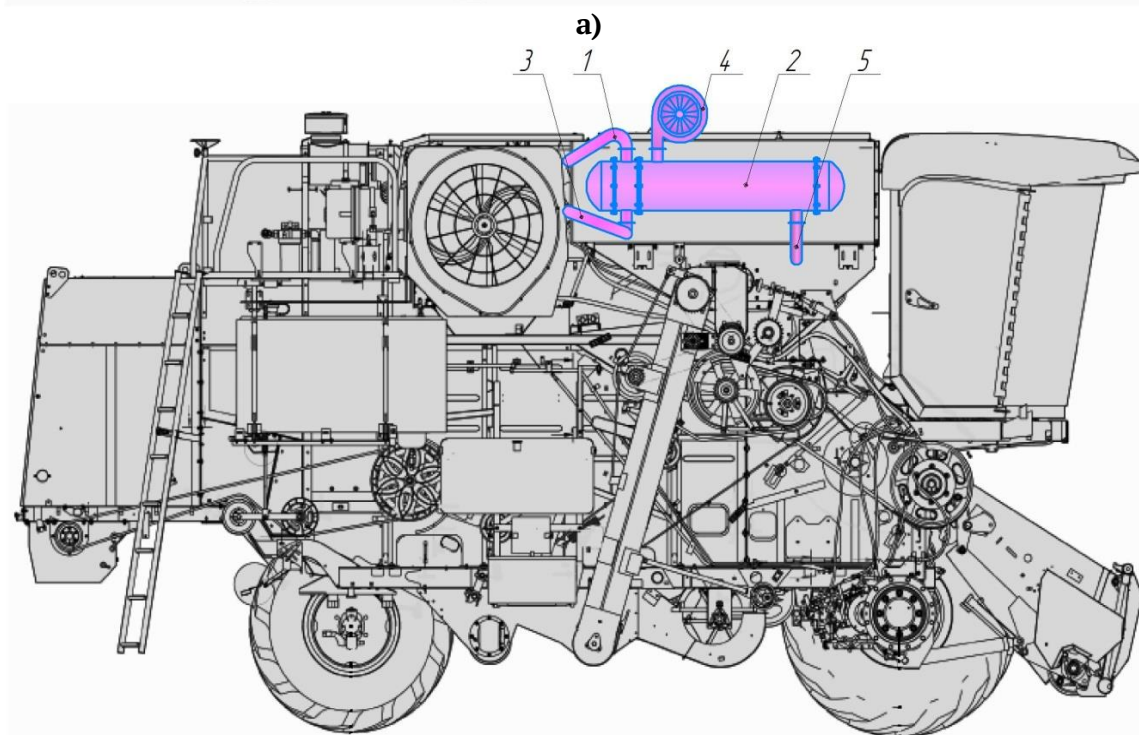
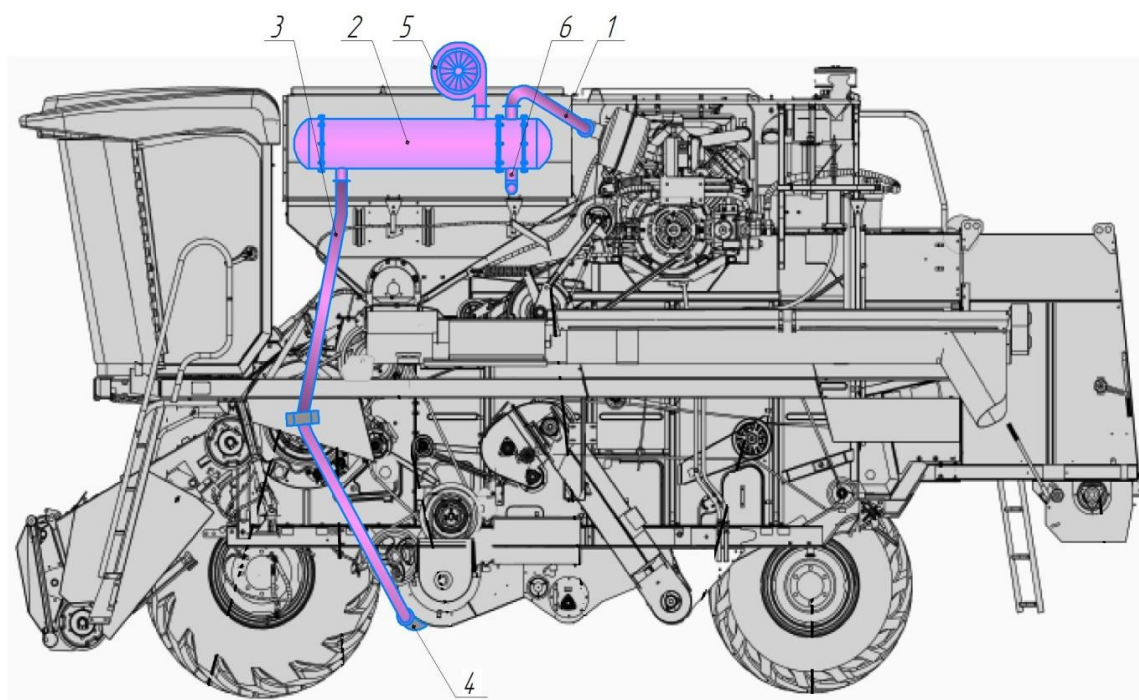
$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q, \quad (1)$$

где:  
 $Q_1$  – количество теплоты, отданное теплоносителем (отработавшими газами), кДж/с;  
 $Q_2$  – количество теплоты, переданное сушильному агенту (нагреваемому воздуху), кДж/с;  
 $\Delta Q$  – потери теплоты во внешнюю среду, кДж/с.

Количество теплоты  $Q_1$  найдем по формуле:

$$Q_1 = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}), \quad (2)$$





**а)**  
**б)**  
**Рис. 2. Схема модернизированного комбайна с предварительной сушкой зерна за счет теплоты отработавших газов:**  
**а – вид со стороны теплообменника отработавших газов;**  
**б – вид со стороны теплообменника охлаждающей жидкости**

где:  
 $G_1$  – поступление теплоносителя в теплообменник, кг/с;  $G_1 = 0,206 \text{ кг/с}$  [9];  
 $t_{1н}$  – температура теплоносителя на входе в теплообменник, °С; после турбины компрессора  $t_{1н} = 550^\circ\text{C}$  [10];

$t_{1к}$  – температура теплоносителя на выходе из теплообменника, °С; должна быть не менее  $110^\circ\text{C}$  (чтобы обеспечить достаточный средний температурный напор при движении теплоносителя и сушильного агента в противотоке), кроме того, чтобы

не было конденсата паров серной кислоты, которая содержится в отработавших газах двигателя,  $t_{1к}$  не должна быть меньше  $140^{\circ}\text{C}$ ; принимаем  $t_{1к} = 150^{\circ}\text{C}$ ;

$c_1$  – теплоемкость теплоносителя на входе в теплообменник, Дж/(кг·К);  $c_1 = 1130,5$  Дж/(кг·с) [11].

$$Q_1 = 0,206 \cdot 1130,5 \cdot (550 - 150) = 93153,2 \text{ Дж/с}$$

Для рекуперативного теплообменника 1...10% от  $Q_1$  [12] теряются во внешнюю среду. Принимаем данные потери в размере 5% от  $Q_1$ , тогда коэффициент полезного действия теплообменника составит  $\eta = 0,95$ .

Количество теплоты, которое будет потеряно во внешнюю среду:

$$\Delta Q = 0,05Q_1 = 0,05 \cdot 93153,2 = 4657,7 \text{ Дж/с} \quad (3)$$

Из формулы (1) найдем количество теплоты, переданное сушильному агенту:

$$Q_2 = Q_1 - \Delta Q \quad (4)$$

$$Q_2 = 93153,2 - 4657,7 = 88495,5 \text{ Дж/с}$$

Найдем расход сушильного агента по формуле:

$$Q_2 = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}), \quad (5)$$

где:

$G_2$  – поступление сушильного агента в теплообменник, кг/с;

$t_{2н}$  – температура сушильного агента (атмосферного воздуха) на входе в теплообменник,  $^{\circ}\text{C}$ ; принимаем в период уборки зерновых  $t_{2н} = 20^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{2к}$  – температура сушильного агента на выходе из теплообменника,  $^{\circ}\text{C}$ ; поскольку сушильный агент будет подаваться в вентилятор, где будет перемешиваться с атмосферным воздухом, принимаем  $t_{2к} = 120^{\circ}\text{C}$ ;

$c_2$  – теплоемкость сушильного агента на входе в теплообменник, Дж/(кг·К); для атмосферного воздуха  $c_2 = 1005$  Дж/(кг·К).

Из формулы (5) найдем поступление в теплообменник сушильного агента:

$$G_2 = \frac{Q_2}{c_2 (t_{2к} - t_{2н})}, \quad (6)$$

$$G_2 = \frac{88495,5}{1005 \cdot (120 - 20)} = 0,881 \text{ кг/с}$$

Объемный расход сушильного агента:

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_в}, \quad (7)$$

где:

$\rho_в$  – плотность сушильного агента на входе в теплообменник, кг/м<sup>3</sup>; для атмосферного воздуха  $\rho_в = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>.

$$V_2 = \frac{0,881}{1,29} = 0,683 \text{ м}^3/\text{с}$$

Плотность теплоносителя на входе в теплообменник [13]:

$$\rho_{1н} = \frac{P_u \cdot 10^4}{736 \cdot 29,27 \cdot T_{1н}}, \quad (8)$$

где:

$P_u$  – избыточное давление теплоносителя, для отработавших газов  $P_u = 840$  мм рт. ст.;  $T_{1н}$  – температура теплоносителя после турбокомпрессора, К;  $T_{1н} = t_{1н} + 273 = 823$  К.

$$\rho_{1н} = \frac{840 \cdot 10^4}{736 \cdot 29,27 \cdot 823} = 0,474 \text{ кг/м}^3$$

Внутренний диаметр трубы для теплоносителя определим по формуле [8]:

$$d_{1вн} = \sqrt{\frac{4G_1}{\pi \mu \varepsilon (2P_u \rho_{1н})^{0,5}}}, \quad (9)$$

где:

$P_u$  – избыточное давление теплоносителя, для отработавших газов,  $P_u = 0,12 \cdot 10^5$  Па;  $\mu$  – коэффициент расхода теплоносителя;  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия теплоносителя.

Для отработавших газов принимаем  $\mu\varepsilon \approx 1$ .

$$d_{1\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,206}{3,14 \cdot 1 \cdot (2 \cdot 0,12 \cdot 10^5 \cdot 0,474)^{0,5}}} = 0,05 \text{ м}$$

Для теплоносителя выбираем нержавеющую трубу 76,1×3,0 [14] (ГОСТ 9941-81, материал – сталь 12Х18Н10Т; внутренний диаметр  $d_{1\text{вн}} = 0,07 \text{ м}$ ; наружный диаметр  $d_{1\text{нар}} = 0,076 \text{ м}$ ; толщина стенки трубы  $\delta_1 = 0,003 \text{ м}$ ).

Объемный расход теплоносителя:

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_{1н}} \quad (10)$$

$$V_1 = \frac{0,206}{0,474} = 0,435 \text{ м}^3/\text{с}$$

В современных дизельных двигателях, устанавливаемых на зерноуборочных комбайнах, скорость выхода отработавших газов составляет 600–700 м/с. Часть кинетической энергии отработавших газов используют для привода турбокомпрессора [15].

Таким образом, скорость теплоносителя на входе в теплообменник определим по формуле [12]:

$$v_1 = \frac{4V_1}{\pi d_{1\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 0,435}{3,14 \cdot 0,07^2} = 113,1 \text{ м/с} \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи теплоносителя [12]:

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{d_{1\text{вн}}}, \quad (12)$$

где:

$Nu_1$  – критерий Нуссельта;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); для отработавших газов при температуре 550°C  $\lambda_1 = 0,057 \text{ Вт/(м · К)}$  [16].

При движении газов в трубах при  $Re > 10000$  используют критериальное уравнение [12]:

$$Nu = C\varepsilon_1 Re^{0,8}, \quad (13)$$

где:

$Re$  – критерий Рейнольдса;

$C$  – коэффициент, для отработавших газов  $C = 0,018$ ;

$\varepsilon_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий отношение длины трубы  $L$  к ее диаметру  $d$ ; при  $L/d \geq 50$   $\varepsilon_1 = 1$ .

Из формул (12) и (13) определим коэффициент теплоотдачи теплоносителя:

$$\alpha_1 = C\varepsilon_1 Re_1^{0,8} \frac{\lambda_1}{d_{1\text{вн}}} \quad (14)$$

Критерий Рейнольдса для теплоносителя на входе в теплообменник определяем по формуле [12]:

$$Re_1 = \frac{v_1 d_{1\text{вн}}}{\nu_1}, \quad (15)$$

где:

$\nu_1$  – коэффициент кинематической вязкости на входе в теплообменник,  $\nu_1 = \frac{\mu_1}{\rho_{1н}}$ ;

$\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости теплоносителя на входе в теплообменник, для отработавших газов  $\mu_1 = 0,038 \cdot 10^{-3} \text{ Н · с/м}^2$  [16].

$$\nu_1 = \frac{0,038 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Кг}}{\text{с · м}}}{0,474 \frac{\text{Кг}}{\text{м}^3}} = 8,02 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Re_1 = \frac{113,1 \cdot 0,07}{8,02 \cdot 10^{-5}} = 98716$$

Отсюда коэффициент теплоотдачи теплоносителя:

$$\alpha_1 = 0,018 \cdot 1 \cdot 98716^{0,8} \cdot \frac{0,057}{0,07} = 145 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Площадь поверхности теплообмена находим по формуле:

$$F = \frac{Q}{K\Delta t}, \quad (16)$$

где:

$Q = Q_2 = 88495,5 \text{ Дж/с}$  – количество теплоты, сообщаемой сушильному агенту;

$K$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\Delta t$  – средняя разность температур между теплоносителями,  $\text{К}$ .

Коэффициент теплопередачи найдем по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (17)$$

где:

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи теплоносителя,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; для отработавших газов

$\alpha_1 = 145 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\delta$  – толщина стенки трубки теплообменника,  $\text{м}$ ; для трубок теплообменника выбираем бесшовную нержавеющую трубу  $30 \times 2,0$  [17] (ГОСТ 9941-81, материал – сталь 12Х18Н10Т), для которой  $\delta = 0,002 \text{ м}$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; для нержавеющей стали при температуре  $550^\circ\text{C}$   $\lambda = 26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи сушильного агента,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; для воздуха  $\alpha_2 = 167 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

$$K = \frac{1}{\frac{1}{145} + \frac{0,002}{26} + \frac{1}{167}} = 77,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Средняя разность температур между теплоносителем и сушильным агентом определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}\right)}, \quad (18)$$

где:

$\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_m$  – соответственно наибольшая и наименьшая разности температур,  $\text{К}$ .

По графику (рис. 3) находим:

$$\Delta t_{\delta} = t_{1н} - t_{2к} = 430 \text{ К},$$

$$\Delta t_m = t_{1к} - t_{2н} = 130 \text{ К}.$$

Тогда средняя разность:

$$\Delta t = \frac{430 - 130}{\ln\left(\frac{430}{130}\right)} = 250,8 \text{ К},$$

а площадь поверхности теплообмена:

$$F = \frac{88495,5}{77,2 \cdot 250,8} = 4,57 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности теплообмена получается достаточно большая. При этом нужно учесть, что при высоких температурах отработанных газов происходит передача теплоты излучением:

$$\begin{aligned} Q_{изл} &= \alpha_{изл} \cdot F \cdot \Delta t = \\ &= 4,56 \cdot 4,57 \cdot 259,8 = 5226,5 \text{ Вт}, \quad (19) \end{aligned}$$

что составляет 6% от теплоты, передаваемой сушильному агенту, то есть площадь теплообменника может быть уменьшена на 6% [18].

Таким образом, в результате работы выполнен поиск существующих решений относительно конструкции зерноуборочного комбайна, позволяющей использовать теплоту отработавших газов двигателя для предварительной сушки зерна. С помощью анализа известных решений выделены варианты использования теплоты двигателя для подсушки зерна, наиболее оптимальные с точки зрения эффективности сушки и простоты исполнения.

Произведен тепловой расчет теплообменника зерноуборочного комбайна для осуществления возможности использовать теплоту отработавших газов двигателя и системы охлаждения двигателя для предварительной сушки зерна.



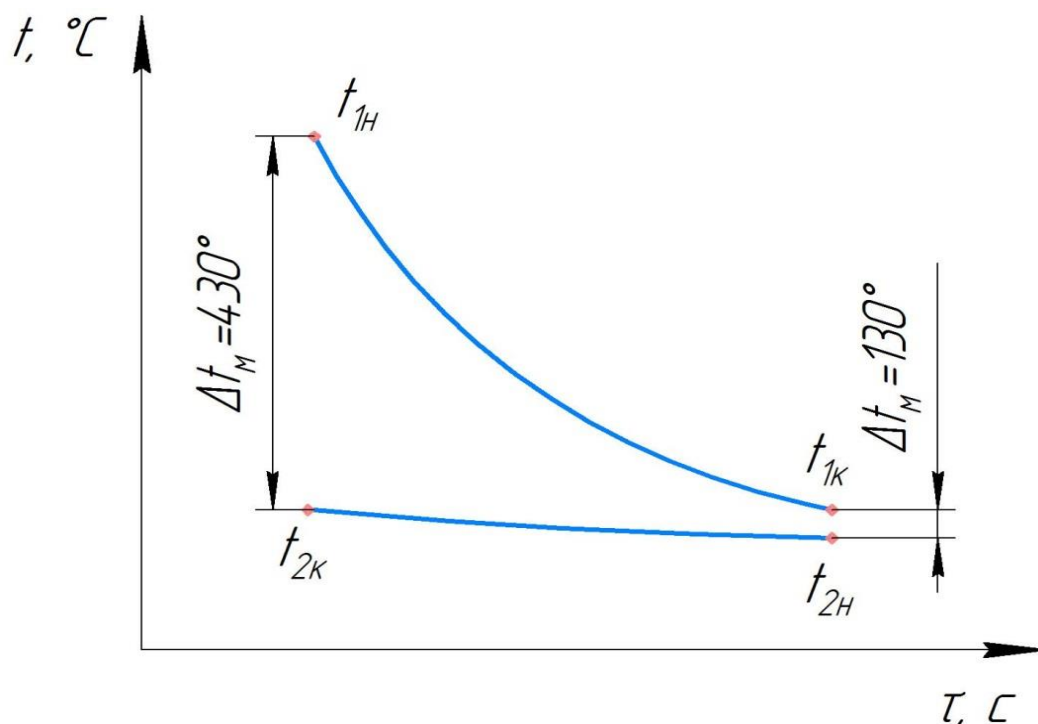


Рис. 3. График теплообмена

## ЛИТЕРАТУРА

1. Птицын С.Д. Зерносушилки. Технологические основы. Тепловой расчет конструкции. М.: Машиностроение, 1966.
2. Патент РФ №2287256, МПК А01D 41/02, А01D 41/133. Комбайн для уборки и сушки зерна / В.Ф. Власенко: заявлено 19.01.2005; опубл. 20.11.2006. Бюл. № 32.
3. Патент РФ 1463168, МПК А01D41/02. Зерноуборочная машина / А.Г. Баштовой, В.И. Безруков, В.В. Назаренко: заявлено 03.02.1987; опубл. 07.03.1989.
4. Патент РФ 163625, МПК А01D 41/133. Устройство для предварительной сушки зерна в зерноуборочном комбайне при уборке с использованием теплоты двигателя комбайна / С.В. Гайдидей, И.В. Зефиоров, Н.И. Кузнецова, П.С. Мартынов: заявлено 03.08.2015; опубл. 27.07.2016.
5. Предварительная сушка зерна в комбайне / Зефиоров И.В. [и др.] // Сельский механизатор. 2017. № 7. С. 6–7.
6. Патент РФ 169186, МПК А01D 41/133. Устройство для предварительной сушки зерна в зерноуборочном комбайне при уборке с использованием теплоты двигателя комбайна / С.В. Гайдидей, И.В. Зефиоров, Н.И. Кузнецова: заявлено 11.07.2016; опубл. 09.03.2017. Бюл. № 7.
7. Гайдидей С.В., Зефиоров И.В., Кузнецова Н.И. Использование теплоты двигателя для предварительной сушки зерна в зерноуборочном комбайне // Молочнохоз. вестн. 2017. № 4 (28). С. 133–141. URL: <http://molochnoe.ru/journal/ru/node/1301> (дата обращения 29.05.2020).
8. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1991. 359 с.
9. Николаев В.А., Кряклина И.В. Методика расчета теплообменника для нагрева воздуха теплом отработавших газов дизельного двигателя // Вестн. АПК Верхневолжья. 2016. № 4 (36). С. 67–74.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Вологодской области в рамках государственного научного гранта (договор № 9 от 25.12.2019).

10. Макушев Ю.П., Корнеев С.В., Рындин В.В. Агрегаты наддува двигателей: учеб. пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. 58 с.
11. Перри Дж.Г. Справочник инженера-химика: пер. с англ. / под ред. Н.М. Жаворонкова, П.Г. Романкова. Т. 1. М.: Химия, 1969. 640 с.
12. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. Теплотехника. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
13. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкости стандартными измеряющими устройствами.
14. Трубы и нержавеющие стали // Специальные сплавы и стали. Каталог. URL: [https://www.russteels.ru/catalog/truby\\_svarnye\\_kruglye/76%2c1x3\\_truba\\_nerzhaveyushchaya\\_tp\\_304l\\_en\\_10217-7\\_tl](https://www.russteels.ru/catalog/truby_svarnye_kruglye/76%2c1x3_truba_nerzhaveyushchaya_tp_304l_en_10217-7_tl) (дата обращения 29.05.2020).
15. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства / Р.А. Амерханов [и др.]. М.: Колос-Пресс, 2002. 24 с.
16. Теплопроводность дымовых газов, теплофизические свойства продуктов сгорания топлива // Thermalinfo.ru – Справочник по свойствам веществ и материалов. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/teploprovodnost-dymovyh-gazov-teploffizicheskie-svoystva-produktov-sgoraniya-topliva>
17. Специальные сплавы и стали. URL: [https://www.russteels.ru/catalog/truby\\_besshovnye/30x2\\_truba\\_nerzhaveyushchaya\\_besshovnaya\\_12x18n10t\\_gost\\_9941-81\\_6m](https://www.russteels.ru/catalog/truby_besshovnye/30x2_truba_nerzhaveyushchaya_besshovnaya_12x18n10t_gost_9941-81_6m) (дата обращения 29.05.2020).
18. Николаев В.А., Кряклина И.В. Методика расчета теплообменника для нагрева воздуха теплом отработавших газов дизельного двигателя // Вестн. АПК Верхневолжья. 2016. № 4 (36). С. 67–74.

### Сведения об авторах

Александр Леонидович Бирюков – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2; e-mail: biryukov\_alex@mail.ru

Сергей Владимирович Гайдидей – старший преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2; e-mail: sgajdidej@mail.ru

Игорь Владимирович Зефиров – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2; e-mail: zefirov1951@yandex.ru

Наталья Ивановна Кузнецова – кандидат экономических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2; e-mail: natashakyza@yandex.ru

## USING COMBINE ENGINE'S HEAT FOR DRYING GRAIN IN DIRECT COMBINE OPERATIONS

Biryukov A.L., Gaididei S.V., Zefirov I.V., Kuznetsova N.I.

*The object of the research is a combine harvester the design of which allows to use the heat of engine exhaust gases for grain pre-drying. The purpose of the work is to develop the design of such a combine harvester. The authors carried out the theoretical research on the justification of the optimal design solutions and design calculations. The possibility of using the heat of the combine engine for drying grain during direct combine processing is considered. The possible options for supplying the drying agent to the grain mass flow are analyzed. The analysis of known solutions allowed to identify the options for using engine heat for drying grain which are the most optimal in terms of drying efficiency and ease of execution. It is revealed that the most optimal method is to supply the drying agent to the fan that supplies air to the sieve, and to supply the heated air to the hopper. The design scheme of the modernized combine is grounded. Thermal calculation of the heat exchanger is performed. The required surface area of the heat exchanger for Vector-410 combine harvester is 4.57 sq. m.*

*Combine harvester, heat recovery, construction, heat exchanger, heat calculation, grain drying.*

### Information about the authors

Aleksandr L. Biryukov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin”. 2, Schmidt Street, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: biryukov\_alex@mail.ru

Sergey V. Gaididei – Senior Lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin”. 2, Schmidt Street, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: sgajdidej@mail.ru

Igor' V. Zefirov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin”. 2, Schmidt Street, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: zefirov1951@yandex.ru

Natalia I. Kuznetsova – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin”. 2, Schmidt Street, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: natashakyza@yandex.ru