

разработка технических средств для сбора данных;
разработка автоматизированных и роботизированных систем сельскохозяйственных машин для реализации технологий информационно-управляемого сельского хозяйства;
разработка комплексов отечественного программного обеспечения;
разработка систем управления и принятия решений.

В условиях жесткой конкуренции, совершенствование производства сельскохозяйственной продукции, основанное на технологиях информационно-управляемого сельского хозяйства, является экономически обоснованным и позволит, по предварительным расчетам, снизить себестоимость производства сельскохозяйственной продукции, и повысить эффективность отрасли в целом.

Список использованных источников

1. Труфляк, Е. В. Точное земледелие: учеб. пособие / Е. В. Труфляк, Е. И. Трубилин; Кубан. гос. агр. ун-т. – Краснодар, 2015. – 383 с.
2. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis_papers/How_to_Feed_the_World_in_2050_RU.pdf.
3. Рунов, Б. Новейшие технологии (точное земледелие) – основа развития выгодного сельского хозяйства / Б. Рунов, Н. Пильникова // Экономика сельского хозяйства России. – № 2. – 2010. – С. 25–34.
4. Д. К. Обзор задач точного земледелия и аграрных роботизированных средств / Д. К. Ву, В. В. Нгуен, О. Я. Соленая, А. Л. Ронжин // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – № 3. (77). – 2017. – С. 13–19.
5. Рунов Б. А. Основы технологии точного земледелия. Зарубежный и отечественный опыт / Б. А. Рунов, Н. В. Пильникова. – 2-е изд., исправ. и доп. – СПб.: АФИ, 2012. – 120 с.
6. Труфляк, Е. В. Интеллектуальные технические средства в сельском хозяйстве / Е. В. Труфляк // Известия Великолукской ГСХА. – 2015. – № 4. – С. 25–34.

УДК 629.1

Поступила в редакцию 28.07.2019

Received 28.07.2019

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет,

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТИПОРАЗМЕРНОГО РЯДА ТРАКТОРОВ «БЕЛАРУС»

Оптимальной является система охлаждения (СО), с входящей в нее системой более высокого уровня, обеспечивающей наилучшие показатели функционирования. В данном случае – это двигатель внутреннего сгорания (ДВС) мобильной машины. Показатели функционирования двигателя определяются его тепловым состоянием и оцениваются температурой основных его элементов. Косвенно, таким показателем, может приниматься температура охлаждающей жидкости СО. Оптимальная система охлаждения – это система, во-первых, полностью отвечающая своим целям, и, во-вторых, обеспечивающая заданный температурный режим двигателя при наименьших материальных расходах на изготовление и наименьших энергетических затратах на функционирование [1].

В статье решена задача оптимизации параметров системы охлаждения с ограничениями-неравенствами и использованием условия Куна-Таккера.

Ключевые слова: оптимизация, система охлаждения, тип размерный ряд, трактор

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshko²

¹Belarusian State Agrarian Technical University,

²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization

PARAMETER OPTIMIZATION OF COOLING SYSTEMS STANDARD SERIES OF TRACTORS “BELARUS”

Optimal is the cooling system that provides the best performance of the higher-level system in which the cooling system is located. In this case, it is the internal combustion engine of a mobile machine. The performance of the engine is determined by its thermal condition and the temperature of its main elements. Indirectly, this indica-

tor can be taken as the coolant temperature of the cooling system. The optimal cooling system is a system that, firstly, fully meets its goals, and, secondly, provides a predetermined temperature regime of the engine at the lowest material costs for the manufacture and operation [1].

The problem of optimization of parameters of the cooling system with constraints-inequalities and the use of the Kuhn-Tucker condition is solved in the article

Keywords: optimization, cooling system, size range, tractor

Основная часть

Температурный режим двигателя является ограничивающим (допускаемым) параметром. Исходя из его значения, определяются показатели основных компонентов системы – поверхность охлаждения радиатора, расходы охлаждающей жидкости и потока воздуха. Данные замеры являются варьируемыми или переменными при обеспечении заданного температурного режима двигателя. Температурный режим ДВС, или искомая величина, является функцией совокупности переменных показателей системы.

В группу параметров, характеризующих СО, входят теплотехнические показатели – теплоотдача в охлаждающую жидкость; теплоемкости теплоносителей; коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи теплоносителей и поверхностей радиатора; ограничивающие значения условий эксплуатации трактора – температура окружающей среды.

Искомый показатель, в заданных пределах, обеспечивает качество системы. Искомые величины характеристики, в том числе и переменные, обеспечивают необходимые результаты, а его значение, в заданных пределах, будет оптимальным, но при условии, что переменные данные будут удовлетворять условию максимума или минимума. Так, поверхность охлаждения радиатора должна быть наименьшей, но обеспечивать теплопередачу требуемого количества теплоты от жидкости к потоку воздуха. Расходы теплоносителей должны иметь наименьшие энергетические затраты на их прокачку, но обеспечивать перенос и рассеивание заданного количества теплоты.

Представим последовательность решения задачи оптимизации.

Коэффициент теплопередачи поверхности охлаждения радиатора потоку воздуха [1], кДж/(кг·К):

$$k_T = \frac{1}{\frac{\psi}{\alpha_V} + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{\delta_m}{\lambda_{cm}}} \times 10^{-3}, \quad (1.1)$$

где α_V – коэффициент теплоотдачи от охлаждающей жидкости к стенке трубок, Вт/(м²·К), $\alpha_V = 2500 \dots 5000$ Вт/(м²·К);

α_W – коэффициент теплоотдачи от стенки трубок воздуху, Вт/(м²·К), $\alpha_W = 100$ Вт/(м²·К);

δ_m – толщина стенки трубки, м (0,00005...0,0002 м);

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности от стенки трубки, для медных трубок $\lambda_{cm} = 330$ Вт/(м·К);

ψ – коэффициент оребрения, для трубчато-пластинчатых радиаторов принимаем $\psi = 7,5 \dots 10$.

Поверхность охлаждения радиатора определяется по формуле [1]:

$$F_{охл} = 60 \cdot 10^3 \frac{G_V c_{PV} \rho_V (t_{V2} - (t_{V2} - 5))}{k_T \left(\frac{(t_{V2} + (t_{V2} - 5))}{2} - t_w \right)}, \quad (1.2)$$

где G_V – расход охлаждающей жидкости, м³/ч (л/мин). В дальнейших расчетах будут приняты диапазоны допустимых значений расхода охлаждающей жидкости для ряда двигателей с целью определения оптимального значения и минимизации затрат на привод жидкостного насоса;

c_{PV} – средняя теплоемкость охлаждающей жидкости, принимаем $c_{PV} = 3,608$ кДж/(кг·К);

ρ_V – плотность охлаждающей жидкости, принимаем среднее значение $\rho_V = 1034$ кг/м³;

t_{V2} – температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора, принимаем $t_{V2} = 85 \dots 105$ °С.

Подставляя (1.1) в формулу (1.2) получим:

$$F_{\text{охл}} = 60 \cdot 10^3 \frac{G_V c_{PV} \rho_V (t_{V2} - (t_{V2} - 5))}{\left(\frac{(t_{V2} + (t_{V2} - 5))}{2} - t_w \right)} \times \left(\frac{\psi}{\alpha_V} + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{\delta_m}{\lambda_{\text{см.}}} \right), \quad (1.3)$$

После упрощения выражение (1.3) примет вид:

$$F_{\text{охл}} = \frac{G_V c_{PV} \rho_V \left(\frac{\psi}{\alpha_V} + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{\delta_m}{\lambda_{\text{см.}}} \right)}{12(t_{V2} - t_w - 2,5)}. \quad (1.4)$$

Учитывая, что площадь поверхности охлаждения радиатора, находится в пределах $F_{\text{охл}} = 12 \dots 45 \text{ м}^2$, будем считать, что решение задачи оптимизации (поиска минимума функции (1.4) будет иметь физический смысл, если $F_{\text{охл}} \geq 12$. Запишем условия и ограничения задачи оптимизации, а также ограничения на целевую функцию:

$$\begin{cases} F_{\text{охл}} = \frac{G_V c_{PV} \rho_V \left(\frac{\psi}{\alpha_V} + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{\delta_m}{\lambda_{\text{см.}}} \right)}{12(t_{V2} - t_w - 2,5)} \rightarrow \min, \\ 85 \leq t_{V2} \leq 105, \\ 2500 \leq \alpha_V \leq 5000, \\ G_{V \min} \leq G_V \leq G_{V \max}, \\ F_{\text{охл}} \geq 12. \end{cases} \quad (1.5)$$

где $G_{V \min}$, $G_{V \max}$ – изменяющийся в зависимости от типа двигателя расход охлаждающей жидкости.

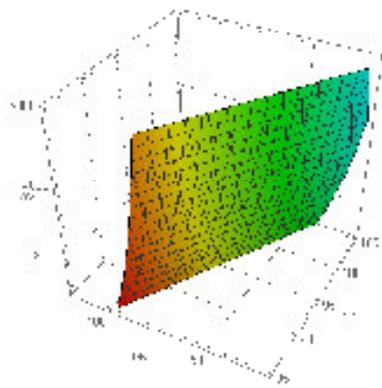
Для ряда двигателей повышенной мощности, а, следовательно, повышенной теплонагруженности (DEUTZ и CATERPILLAR мощностью 264 кВт и выше) следует функцию 1.5 привести к следующему виду:

$$\begin{cases} F_{\text{охл}} = \frac{G_V c_{PV} \rho_V \left(\frac{\psi}{\alpha_V} + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{\delta_m}{\lambda_{\text{см.}}} \right)}{12(t_{V2} - t_w - 2,5)} \rightarrow \min, \\ 93 \leq t_{V2} \leq 109, \\ 2500 \leq \alpha_V \leq 5000, \\ G_{V \min} \leq G_V \leq G_{V \max}, \\ F_{\text{охл}} \geq 12. \end{cases} \quad (1.6)$$

На рис. 1 представлены результаты решения задачи оптимизации для пяти мощностных рядов двигателей тракторов «Беларус» [2–4, 7,8].

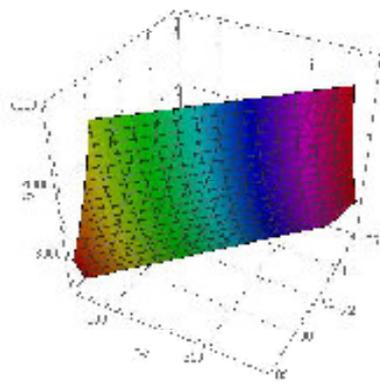
Приведем пример расчета для (рис. 1) в (двигатели мощностью 96–156 кВт). После подстановки в функцию (1.4) известных значений получим:

$$\begin{aligned} F_{\text{охл}} &= \frac{G_V c_{PV} \rho_V \left(\frac{\psi}{\alpha_V} + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{\delta_m}{\lambda_{\text{см.}}} \right)}{12(t_{V2} - t_w - 2,5)} = \frac{G_V \cdot 3,608 \cdot 1034 \left(\frac{9}{\alpha_V} + \frac{1}{100} + \frac{0,0001}{330} \right)}{12(t_{V2} - 46 - 2,5)} = \\ &= \frac{310,89 \cdot G_V \left(0,01 + \frac{9}{\alpha_V} \right)}{t_{V2} - 48,5}. \end{aligned} \quad (1.7)$$



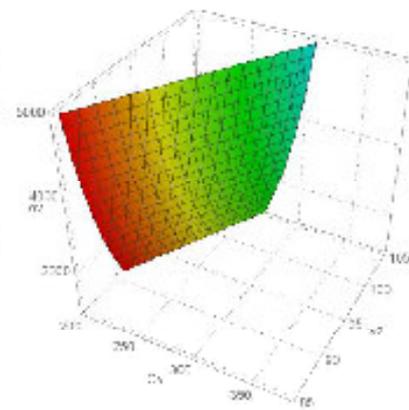
марка тракторов:
 Беларус-320/Беларус-952;
 26–70 кВт; $80 \leq G_V \leq 180$;
 $G_V = 138,629$ л/мин;
 $\alpha_V = 3408,22$ Вт/(м² К);
 $t_{12} = 93,90$ °С; $F_{\text{охл}} = 12,00$ м²

а



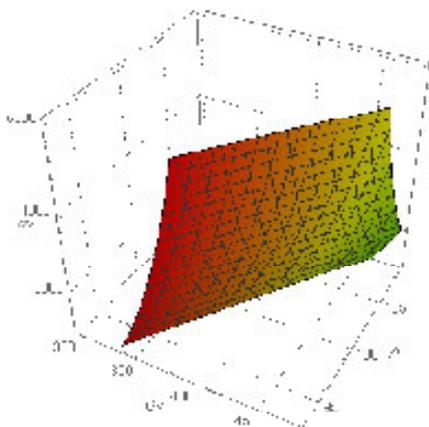
марка тракторов:
 Беларус-1025/Беларус-1220.6;
 70–90 кВт; $180 \leq G_V \leq 280$;
 $G_V = 180,74$ л/мин;
 $\alpha_V = 4464,19$ Вт/(м² К);
 $t_{12} = 104,76$ °С; $F_{\text{охл}} = 12,00$ м²

б



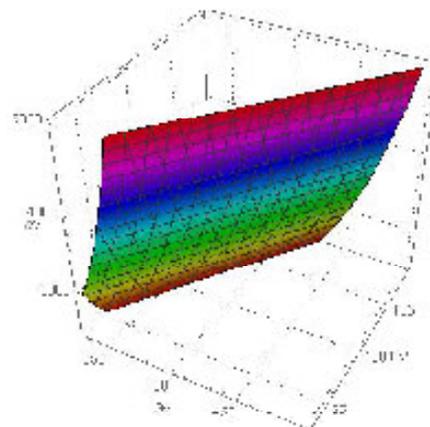
марка тракторов:
 Беларус-1221/Беларус-2022.5;
 96–156 кВт; $200 \leq G_V \leq 380$;
 $G_V = 200,00$ л/мин;
 $\alpha_V = 5000,00$ Вт/(м² К);
 $t_{12} = 105,00$ °С; $F_{\text{охл}} = 12,99$ м²

в



марка тракторов: Беларус-3022/ Беларус-3022ДЦ.1;
 186–223 кВт; $300 \leq G_V \leq 400$; $G_V = 300,00$ л/мин;
 $\alpha_V = 5000,00$ Вт/(м² К); $t_{12} = 109,00$ °С; $F_{\text{охл}} = 18,19$ м²

г



марка тракторов: Беларус-3522/ Беларус-4522; 264–343
 кВт; $330 \leq G_V \leq 500$; $G_V = 330,00$ л/мин;
 $\alpha_V = 5000,00$ Вт/(м² К); $t_{12} = 109,00$ °С; $F_{\text{охл}} = 20,01$ м²

д

Рис. 1. – Результаты решения задачи оптимизации

Для удобства расчетов введем следующие обозначения:

$x_1 \Leftrightarrow G_V$, $x_2 \Leftrightarrow \alpha_V$, $x_3 \Leftrightarrow t_{12}$. Тогда система (1.5) примет вид:

$$\begin{cases} F(x) = 310,89x_1(0,01 + 9/x_2)/(x_3 - 48,5), \\ (x_1 - 200)(x_1 - 380) \leq 0, \\ (x_2 - 2500)(x_2 - 5000) \leq 0, \\ (x_3 - 85)(x_3 - 105) \leq 0, \\ F(x) \geq 12. \end{cases} \quad (1.8)$$

После нахождения стационарных точек и проверки условий Куна-Таккера получим следующую систему уравнений, которую необходимо решить для нахождения значения точек экстремума:

$$\begin{cases} x_4 \cdot (x_1 - 380) + x_4 \cdot (x_1 - 200) + (310,89 \cdot (0,01 + 9 / x_2)) / (x_3 - 48,5) = 0, \\ -2798,01 \cdot x_1 / (x_2^2 \cdot (x_3 - 48,5)) + x_5 \cdot (x_2 - 5000) + x_5 \cdot (x_2 - 2500) = 0, \\ -(310,89 \cdot x_1 \cdot (0,01 + 9 / x_2)) / ((x_3 - 48,5)^2) + x_6 \cdot (x_3 - 105) + x_6 \cdot (x_3 - 85) = 0, \\ (x_1 - 200) \cdot (x_1 - 380) = 0, \\ (x_2 - 2500) \cdot (x_2 - 5000) = 0, \\ (x_3 - 85) \cdot (x_3 - 105) = 0. \end{cases}$$

В результате решения системы получим следующее:

$$x_1 = 200, x_2 = 5000, x_3 = 105.$$

Таким образом, решение задачи оптимизации, в соответствии с принятыми обозначениями, можно представить в виде:

$$G_v = 200 \text{ л/мин}, \alpha_v = 5000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}, t_{v2} = 105 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При этом значение целевой функции будет минимальным, в соответствии с условием (1.5), и составит $F_{\text{охл}} = 12,99 \text{ м}^2$.

Результаты проведенной работы свидетельствуют о том, что с ростом теплонапряженности по таким двигателям тракторов, как TCD 2013 L06 4V («Беларус-3522») и Caterpillar C13 («Беларус-4522») при минимальной площади поверхности радиатора (20–25 м²) и средней производительности жидкостного насоса (200–300 л/мин) можно обеспечить заданный тепловой режим. На режимах работы двигателя, отличных от максимальной и номинальной загрузки, достаточно обеспечивать производительность насоса на уровне 150 л/мин.

Заключение

Решена задача оптимизации параметров системы охлаждения с ограничениями-неравенствами и использованием условия Куна-Таккера, результаты которой свидетельствуют о том, что с ростом теплонапряженности по таким двигателям тракторов, как TCD 2013 L06 4V («Беларус-3522») и Caterpillar C13 («Беларус-4522») при минимальной площади поверхности радиатора (20–25 м²) и средней производительности жидкостного насоса (200–300 л/мин) можно обеспечить заданный тепловой режим. На режимах работы двигателя, отличных от максимальной и номинальной загрузки, достаточно обеспечивать производительность насоса на уровне 150 л/мин.

Список использованных источников

1. Якубович, А. И. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей. Конструкция, теория, проектирование / А. И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В. Е. Тарасенко. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2013. – 473 с.
2. Турчак Л. И. Основы численных методов. – М.: Наука, 1987. – 318 с.
3. Мудров А. Е. Численные методы для ЭВМ на языках Бэйсик, Фортран, Паскаль. – Томск: МП 'РАСКО', 1991. – 272 с.
4. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
5. Бобровник, А. И. Системный выбор энергетических параметров колесных тракторов: справочник / А. И. Бобровник, И. Н. Усс, В. Е. Тарасенко [и др.]. – Минск, БГАТУ, 2011. – 104 с.
6. Тракторы BELARUS. [Электронный ресурс]. – 2018. Режим доступа: <http://www.belarus-tractor.com/catalog/tractors/>. – Дата доступа 24.05.2018.
7. Тарасенко, В. Е. Определение параметров автотракторных радиаторов / В. Е. Тарасенко // Інженерія природокористування. – Харків, 2016. – №2 (6). – С. 12–18.
8. Тарасенко, В. Е. Эффективность охлаждающих поверхностей автотракторных радиаторов / В. Е. Тарасенко // Исследования, результаты. – Алматы, 2015. – №01 (065). – С. 155–163.