

obtained to determine the cycle time of transport facilities for a specific technological scheme using positioning and monitoring means. The use of systems for positioning and monitoring the technical means during harvesting and transportation makes it possible to reduce downtimes, and enhance the system performance. In case of direct-flow grain transportations, the use of machine positioning and monitoring systems results in 12–23% reduction in interdependent idle times of machines; the performance of harvesting-transportation system at the same time is 7–11% lower than the estimated maximum, and rational transportation distances are no more than 12–15 km. When dump trailers are used, the operation of combine harvesters is more independent of transport facilities, and the number of truck tractors decreases by the number of harvesters in the system. This technological scheme of transportation is expedient at distances of up to 5 km; with that, the performance of the harvesting-transportation system increases by 4.9%. With a random distribution of grain threshing places, the building of unloading lines with the use of positioning and monitoring means three times reduces ineffective runs of machines on the field.

Keywords: harvesting machines, transport facilities, harvesting-transportation system, positioning and monitoring.

УДК 62-932.4

**С.А. БУЛГАКОВ, старший преподаватель,
Д.М. ВОРОНИН, доктор технических наук, профессор**

Новосибирский государственный аграрный университет

630039, Россия, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160

e-mail: Bulgakoff-serg@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГРЕВА ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕ ПУСКА В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Исследован процесс изменения теплового состояния двигателя и закономерности процесса теплообмена в двигателе в режиме работы «свободный разгон – выбег» в условиях отрицательных температур. Осуществлены поисковые эксперименты, в которых изучено влияние режимов прогрева двигателя в различных условиях после пуска на время прогрева. Исследование проведено на бензиновом двигателе ЗМЗ-406 с распределенным впрыском топлива. Приведена математическая модель зависимости времени прогрева двигателя после пуска в условиях отрицательных температур от влияния температуры окружающей среды; температуры двигателя до начала прогрева, представленной температурой охлаждающей жидкости; частоты вращения коленчатого вала. Определены уровни варьирования этих факторов. Все они являются значимыми и оказывают существенное влияние на функцию отклика. Анализ экспериментальных данных представлен в виде уравнения регрессии второго порядка. Согласно модели построены поверхности отклика для визуальной оценки влияния того или иного параметра на изменение общего времени прогрева. Экспериментально установлено, что наибольшее воздействие на общее время прогрева в исследуемом диапазоне имеет частота вращения коленчатого вала; температура охлаждающей жидкости также оказывает значительное влияние на общее время прогрева, а температура окружающего воздуха воздействует в наименьшей степени. Приведена оценка применяемого способа прогрева бензинового двигателя в условиях отрицательных температур.

Ключевые слова: прогрев двигателя, послепусковой прогрев, время прогрева, оптимизация прогрева, интервал варьирования.

Зимой существенно изменяется температурный режим двигателей автомобилей, что объясняется повышением теплоотдачи с поверхности агрегата в окружающую среду. В связи с этим резко возрастает время прогрева

двигателей после пуска и уменьшается период их охлаждения после остановки [1–4].

Для определения значимости факторов, влияющих на время прогрева, и их оптимального интервала были проведены поисковые эксперименты, в которых изучено влияние режимов прогрева двигателя в различных условиях после пуска на время прогрева. Установлено, что наиболее важными из этих факторов являются температура окружающей среды, температура двигателя до начала прогрева, частота вращения коленчатого вала.

Низкие температуры обуславливают рост относительных насосных и тепловых потерь, ухудшение процессов смесеобразования и, как следствие, увеличение удельного расхода топлива при пониженной частоте вращения и мощности двигателя в неустойчившемся режиме на холостом ходу [5, 6], что приводит к увеличению времени прогрева.

Цель работы – исследовать процесс изменения теплового состояния двигателя и закономерности теплообмена в нем в режиме «свободный разгон – выбег» в условиях отрицательных температур.

Для определения значимости факторов и их оптимального интервала проведены поисковые однофакторные эксперименты. На основании поисковых экспериментов и технической характеристики двигателя ЗМЗ-406 для дальнейших исследований приняты следующие значения параметров технологического процесса: температура окружающего воздуха от -30 до -8°C ; температура охлаждающей жидкости от -30 до 90°C ; частота вращения коленчатого вала от 1000 до 5000 мин^{-1} .

Для оценки всех коэффициентов при небольшом интервале факторов проводят исследование по плану факторного эксперимента, в котором переменные варьируются на трех уровнях. В результате сравнения существующих планов по критериям D-, E-, A- и Q-оптимальности выбран композиционный симметричный трехуровневый план № 38 [7, 8], которым предусмотрено проведение 16 опытов с варьированием факторов. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в табл. 1.

Изменение параметров процесса прогрева двигателя проводили по выбранному плану с учетом интервалов варьирования (табл. 2).

Планирование второго порядка заканчивается отысканием адекватного квадратичного уравнения типа [7, 8]:

$$Y = b_0 + \sum_{i,j,k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i,j,k} b_{ij} X_i X_j X_k + \sum_{i,j,k} b_{ii} X_i^2. \quad (1)$$

Таблица 1
Факторы и интервалы их варьирования в процессе прогрева двигателя после пуска в условиях отрицательных температур

Фактор	Условные обозначения	Код	Уровень факторов			Интервал варьирования
			Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)	
Температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{в}}$	X_1	Минус 30	Минус 19	Минус 8	11
Температура охлаждающей жидкости, $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ож}}$	X_2	Минус 30	30	90	60
Частота вращения коленчатого вала, мин^{-1}	n_e	X_3	1000	3000	5000	2000

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований изменения параметров процесса прогрева двигателя

Номер опыта	Фактор			Отклик в повторностях			Среднее значение отклика	Дисперсия
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}$	$S^2(Y_i)$
1	2	3	4	6	7	8	9	10
1	0	-1	-1	28	27,6	27,1	27,57	0,20
2	0	-1	1	11,2	12	12,8	12,00	0,64
3	0	1	-1	17	15,7	16,5	16,40	0,43
4	0	1	1	8,4	8	8,8	8,40	0,16
5	-1	0	-1	23,3	24,5	25,2	24,33	0,92
6	-1	0	1	13,4	12,9	12,4	12,90	0,25
1	2	3	4	6	7	8	9	10
7	1	0	-1	19,2	19,1	19,3	19,20	0,01
8	1	0	1	5,3	7,1	6,1	6,17	0,81
9	-1	-1	0	18,8	18,1	18,4	18,43	0,12
10	-1	1	0	19,7	18,2	18,8	18,90	0,57
11	1	-1	0	20,2	20	20,5	20,23	0,06
12	1	1	0	4,8	5,2	5,6	5,20	0,16
13	0	0	0	11,7	9,5	10,6	10,60	1,21
14	0	0	0	12,2	11,5	10	11,23	1,26
15	0	0	0	12,1	10,9	9,8	10,93	1,32
16	0	0	0	9,9	11,9	10,6	10,80	1,03

Необходимо проанализировать полученную модель, т.е. определить характер изменения отклика в изучаемой области в зависимости от влияния факторов. В нашем случае результатом математической обработки экспериментальных исследований является уравнение регрессии второго порядка в кодированном виде:

$$t \approx 10,951 - 2,971X_1^2 - 3,667X_2^2 - 6,004X_3^3 + 2,163X_1 + 2,608X_2 + 2,566X_3 - 3,875X_1X_2 - 0,4X_1X_3 + 1,892X_2X_3. \quad (2)$$

Для анализа и систематизации уравнение второго порядка приводится к типовой канонической форме:

$$Y - Y_S \approx B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2, \quad (3)$$

где Y – значение критерия оптимизации; Y_S – значение критерия оптимизации в оптимальной точке; X_1, X_2, X_3 – новые оси координат, повернутые относительно старых x_1, x_2, x_3 ; B_{11}, B_{22}, B_{33} – коэффициенты регрессии в канонической форме.

Таким образом, уравнение (2) в канонической форме имеет вид:

$$Y \approx 10,568 + 4,6740X_1^2 + 0,3272X_2^2 + 2,3346X_3^2. \quad (4)$$

Как видно из уравнения (4), коэффициенты регрессии канонического уравнения имеют одинаковые знаки, следовательно, поверхность отклика имеет экстремум [9] с координатами центра фигуры $X_1 = 0,105$, $X_2 = 0,369$, $X_3 = 0,268$. Факторы соответственно имеют следующие значе-

ния: температура окружающего воздуха – $T_{\text{в}} = -17,84 \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура охлаждающей жидкости – $T_{\text{ож}} = -14,94 \text{ }^{\circ}\text{C}$; частота вращения коленчатого вала – $n_{\text{е}} = 1634 \text{ мин}^{-1}$.

Согласно модели, выраженной уравнением (2), построены поверхности отклика для визуальной оценки влияния того или иного параметра на изменение общего времени прогрева t . Для этого продифференцировали уравнение по каждой из переменных, приравнивали производные к нулю, получили систему линейных уравнений, состоящую из трех уравнений.

Удобство формы (4) для анализа и оптимизации определяется тем, что все X в квадратах, следовательно, изменение значений отклика зависит только от знака коэффициента и не зависит от направления движения по оси X от центра s . В частности, отклик (критерий оптимизации) будет возрастать всегда, когда изменяется X , имеющий при себе коэффициент $B_i > 0$, и уменьшаться, когда у X стоит коэффициент $B_i < 0$.

В нашем случае при изучении влияния факторов X_1 и X_2 на критерий оптимизации (рис. 1), каноническое уравнение регрессии имеет вид:

$$Y \approx 11,4939 + 0,440X_1^2 + 4,269X_2^2. \quad (5)$$

Поверхность отклика – параболоид. Оба коэффициента B_{11} и B_{22} имеют одинаковые знаки. Центры эллипсов являются минимумом, поскольку коэффициенты положительные и эллипсы вытянуты по оси X_1 :

$$\text{tg} 2\psi \approx \frac{b_{ij}}{b_{ii} - b_{jj}} \approx \frac{58,754}{2,163 - 12,608} \approx 8,43. \quad (6)$$

В этом случае величина фактора X_1 принятого интервала варьирования фактора сместится на 0,2015 шага варьирования от центра плана и составит в натуральном виде $-16,78 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а фактор X_2 на 0,2491, или $44,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом $Y_s = 11,49$ мин, угол поворота осей координат от начального положения – $\psi = 41,62$ град.

Анализируя поверхность отклика, можно сказать, что изменение температуры воздуха вправо и влево от центра поверхности отклика приводит к увеличению общего времени прогрева на меньшую величину ($11,5 - 11,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что составляет $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$), чем при изменении температуры охлаждающей жидкости ($11,5 - 15,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что составляет $4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Следовательно,

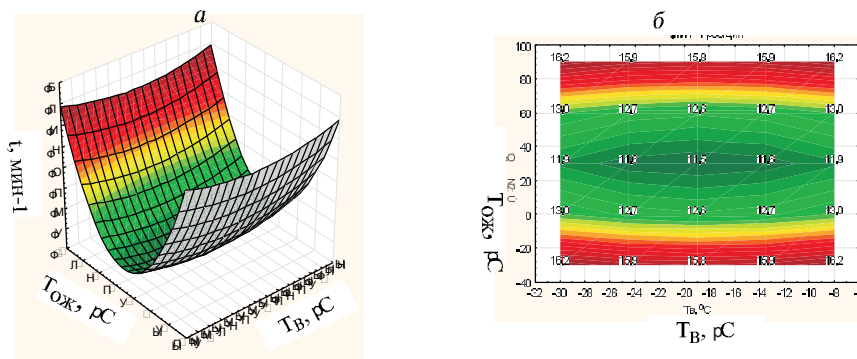


Рис. 1. Влияние факторов $X_1 X_2$:
а – поверхность отклика; б – двумерное сечение

температура окружающего воздуха (X_1) оказывает меньшее влияние на общее время прогрева, чем температура охлаждающей жидкости (X_2).

Изучение влияния X_1 и X_3 на критерий оптимизации проведен аналогично. Получено уравнение регрессии (7) и поверхность отклика (рис. 2). Центр интервалов варьирования факторов сместился, в кодированном виде получили следующие значения: $X_1 = 0,3504$; $X_3 = 0,2020$; $Y_S = 11,5891$, угол поворота осей координат $\psi = 13,05$ град., коэффициенты регрессии $B_{11} = -2,46$; $B_{33} = -2,23$:

$$Y \approx 11,5891 - 2,46X_1^2 - 2,23X_3^2, \quad (7)$$

Поверхность отклика – эллиптический параболоид. Оба коэффициента B_{11} и B_{33} имеют одинаковые знаки. Центр эллипсов является максимумом. Анализируя поверхность отклика, можно сказать, что изменение температуры окружающего воздуха вправо и влево от центра поверхности отклика приводит к уменьшению общего времени прогрева (9,4–6,9 – 2,5 мин) на большую величину, чем изменение частоты вращения коленчатого вала (9,1–6,9 – 2,2 мин). Следовательно, частота вращения коленчатого вала (X_3) оказывает меньшее влияние на общее время прогрева, чем температура окружающего воздуха (X_1).

Изучение влияния X_2 и X_3 на критерий оптимизации проведено аналогично. Получены уравнение регрессии (7) и поверхность отклика (рис. 3). Центр интервалов варьирования факторов сместился, в кодированном виде получили следующие значения: $X_2 = 0,4281$, $X_3 = 0,2811$, $Y_S = 11,8727$, угол поворота осей координат $\psi = 43,73$ град., коэффициенты регрессии $B_{22} = 1,640$; $B_{33} = 3,533$:

$$Y \approx 11,8727 + 1,640X_2^2 + 3,533X_3^2. \quad (8)$$

Сделан вывод, что изменение температуры охлаждающей жидкости вправо и влево от центра поверхности отклика приводит к увеличению общего времени прогрева (15,4–17,0 – 1,6 мин) на меньшую величину, чем при изменении частоты вращения коленчатого вала (13,5–17,0 – 3,5 мин). Следовательно, частота вращения коленчатого вала (X_3) оказывает боль-

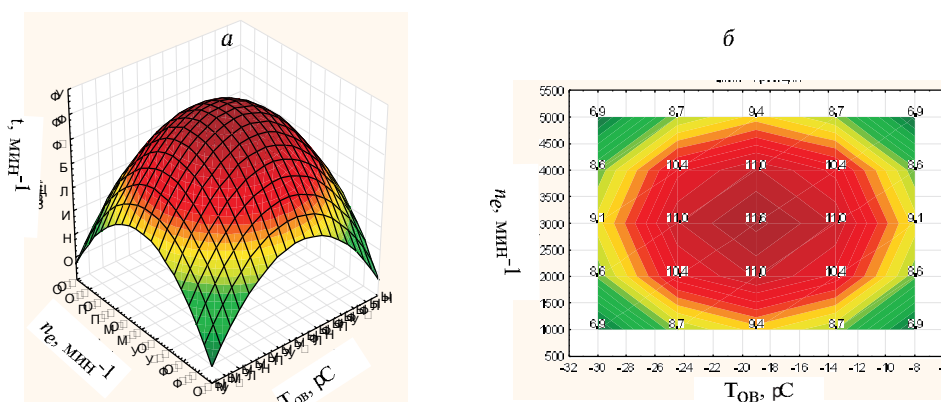


Рис. 2. Влияние факторов X_1X_3 :
а – поверхность отклика; б – двумерное сечение

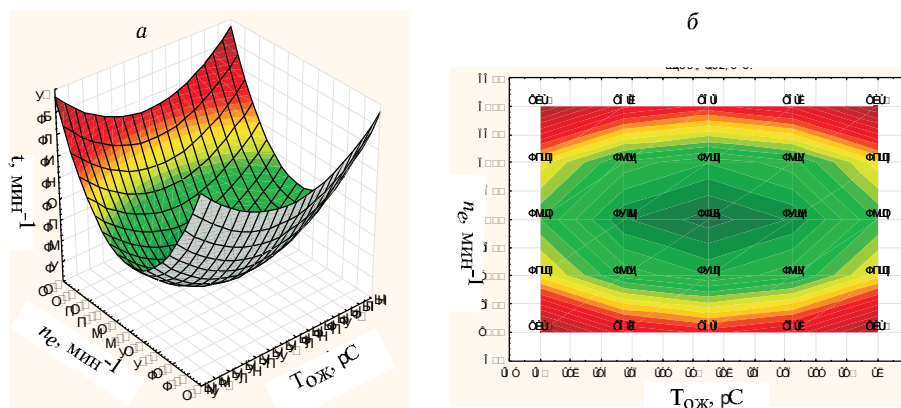


Рис. 3. Влияние факторов X_2X_3 :
а – поверхность отклика; б – двумерное сечение

шее влияние на общее время прогрева, чем температура охлаждающей жидкости (X_2).

Каноническое преобразование экспериментальной модели, полученной применением симметричного композиционного плана типа B_k [10, 11], показало, что в натуральном виде параметры оптимизации следующие: температура окружающего воздуха, $T_B = -17,84 ^\circ\text{C}$; температура охлаждающей жидкости, $T_{ож} = 52,14 ^\circ\text{C}$; частота вращения коленчатого вала $n_e = 3536 \text{ мин}^{-1}$.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшее влияние на общее время прогрева двигателя в исследуемом диапазоне имеет частота вращения коленчатого вала.
2. Температура охлаждающей жидкости также оказывает значительное воздействие на общее время прогрева.
3. Температура окружающего воздуха оказывает наименьшее влияние.
4. В процессе прогрева двигателя в режиме работы «разгон – выбег» изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя на 1000 мин^{-1} влечет изменение времени прогрева на 23 %, изменение температуры окружающего воздуха на $10 ^\circ\text{C}$ – на 2 %, начальная разница температур охлаждающей жидкости и окружающей среды на $10 ^\circ\text{C}$ – на 12 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карнаухов В.Н. Сбережение топливно-экономических ресурсов при эксплуатации автомобильного транспорта в низкотемпературных условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 2000. – 41 с.
2. Крохта Г.М. Повышение эффективности эксплуатации энергонасыщенных тракторов в условиях Западной Сибири: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1995.
3. Тюлькин В.А. Оценка приспособленности автомобилей к зимним условиям эксплуатации по темпу охлаждения двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2000. – 17 с.
4. Эртман С.А. Приспособленность автомобилей к зимним условиям эксплуатации по температурному режиму двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2004.
5. Резник Л.Г., Федорова Г.С., Чистяков А.Н. Изменение показателей топливной экономичности автомобилей под влиянием режимов движения и низких температур окружающего

- воздуха // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технической техники. – Тюмень: Феликс, 2006. – С. 179–187.
6. **Булгаков С.А.** Особенности прогрева двигателя в режиме работы «свободный разгон–выбег» // Вестн. Алтайского ГАУ. – 2015. – № 5. – С. 149.
7. **Андрукович П.Ф., Голикова Т.И., Костина С.Г.** Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: Наука, 1969. – С. 140–153.
8. **Бродский В.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И.** Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
9. **Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М.** Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
10. **Адлер В.А., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 221 с.
11. **Цыбулевский В.В., Маслов Г.Г., Дидманидзе О.Н.** Оптимизация параметров и режимов работы машин методами планирования эксперимента. – М.: «Триада», 2007. – 291 с.

Поступила в редакцию 16.06.2016

**S.A. BULGAKOV, Senior Lecturer,
D.M. VORONIN, Doctor of Science in Engineering, Professor**

Novosibirsk State Agrarian University
160, Dobrolyubova St, Novosibirsk, 630039, Russia
e-mail: Bulgakoff-serg@mail.ru

INVESTIGATING THE PROCESS OF WARMING UP AN ENGINE AFTER STARTING IN COLD WEATHER

There was studied the process of changing the state of an engine and the laws of heat transfer in the engine in acceleration-rundown mode in cold weather. Search experiments on studying the effects of engine warming-up modes under different conditions after starting for warming-up time were performed. The study was conducted on the petrol engine ZMZ-406 with distributed fuel injection. There is given a mathematical model of warming-up times after starting in cold weather depending on ambient temperatures, on temperature of the engine before warming-up represented by cooling liquid temperature, on rotary speed of the crankshaft. The variation levels of these factors were determined. All of them are important, and have a significant impact on the response function. The analysis of experimental data is presented in the form of a second-order regression equation. According to the model, response surfaces were built to visually assess an impact of one or other parameter on changing the total warming-up time. It has been experimentally found that the total warming-up time is mostly influenced by rotary speed of the crankshaft. The coolant temperature has a significant impact, too, and the ambient temperature has the least impact. There is given an assessment of this method for warming up the petrol engine in cold weather.

Keywords: engine warming-up, after-start warming-up, warming-up time, warming-up optimization, variation interval.