

УДК 621.431.7

**В.Е. Тарасенко**

(УО «БГАТУ»,  
г. Минск, Республика Беларусь);

**А.А. Жешко**

(РУП «НПЦ НАН Беларуси по  
механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)

## **ПАРАМЕТРЫ И ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ**

### **Введение**

Исследование систем охлаждения аналитическим методом является теоретическим, оно позволяет представить происходящие процессы с помощью математических формул и алгоритмов. Экспериментальное исследование является методом подтверждения или опровержения теоретического исследования, сопоставления экспериментальных значений параметров с полученными расчетным путем результатами.

Основной количественной характеристикой системы охлаждения является температура. Она определяет меру содержания средой тепловой энергии и является основным параметром для определения тепловых потоков и количества теплоты. Степень изменения содержания тепловой энергии определяется разностью температуры тела или среды до и после нагревания.

Температурные показатели системы охлаждения зависят от параметров и характеристик системы, которые имеют численные значения. Алгебраические соотношения между температурными показателями и параметрами характеристик системы принято называть *уравнениями состояния системы*. Состояние системы описывается формулами и уравнениями и определяется численными значениями ее параметров или функций состояния.

### **Уравнения состояния системы охлаждения при воздействии возмущающих факторов**

Систему охлаждения следует рассматривать как целое, но состоящее из частей или отдельных компонентов. В системе охлаждения различают жидкостный контур, в котором охлаждающая жидкость под действием приложенной к ней работы циркулирует в рубашке охлаждения и омывает поверхности цилиндров и других наиболее нагретых деталей. Разность температуры жидкости и омываемых поверхностей является предпосылкой нагрева жидкости и отвода теплоты от омываемых поверхностей. Согласно основным положениям теплообмена, теплота переходит от более нагретых тел, сред к менее нагретым. Количество отводимой теплоты определяется разностью температуры охлаждающей

жидкости, поступающей в рубашку охлаждения из радиатора, и температуры жидкости на выходе из рубашки охлаждения. Степень нагрева жидкости и количество отводимой теплоты определяются градиентом температуры или разностью температур наружных поверхностей цилиндров и омывающей жидкости, расходом жидкости в рубашке охлаждения. Жидкостный контур системы охлаждения описывается уравнениями состояния, основными параметрами которых является температура жидкости  $t_{V1}$  на входе в рубашку охлаждения и конечная температура  $t_{V2}$ , при этом  $t_{V2} > t_{V1}$ . Перепад температуры до и после нагрева жидкости равен  $\Delta t_V = t_{V2} - t_{V1}$  и зависит от массового расхода жидкости.

Количественную характеристику реальной жидкостной системы как тепловой представляют начальная и конечная температуры жидкости. Другие параметры – вязкость жидкости и ее масса, являются физическими параметрами, имеющими иную природу.

Теплота от жидкости передается потоку воздуха через разделяющие поверхности радиатора. Совокупность устройств, обеспечивающих направленную циркуляцию воздуха, образует воздушный контур. Воздушный контур также является тепловым контуром, в котором циркулирующий воздушный теплоноситель характеризуется начальной температурой  $t_{W1}$  (температура воздуха на входе в радиатор) и конечной температурой  $t_{W2}$  (температура воздуха на выходе из радиатора).

Разность температур воздушного теплоносителя, равная  $\Delta t_W = t_{W2} - t_{W1}$ , характеризует и оценивает происходящие в контуре процессы теплообмена. Процессы теплообмена в воздушном контуре описываются уравнениями состояния, включающими температурные показатели, массовые расходные параметры теплоносителя и другие физические величины.

Система охлаждения в целом описывается уравнением состояния, характеризующим процессы передачи теплоты от охлаждающей жидкости потоку воздуха через поверхности радиатора. Процессы теплообмена между охлаждающей жидкостью и воздухом характеризуются средней температурой жидкости  $\bar{t}_V$  и средней температурой воздуха  $\bar{t}_W$ . Количество отведенной от жидкости теплоты и переданной потоку воздуха также зависит от теплопередающих способностей материала поверхностей охлаждения радиатора и характеризуется коэффициентом теплопередачи, площадью передающих теплоту поверхностей.

В целом систему охлаждения можно рассматривать как тепловую систему, взаимодействующую с окружающей средой. Начальной температурой этой теплопередающей системы является средняя температура окружающей среды за пределами капота трактора или автомобиля  $\bar{t}_{ОКР}$ , конечной – средняя температура системы охлаждения, равная  $\bar{t}_{CO} = \bar{t}_{V-W} = (\bar{t}_V + \bar{t}_W)/2$ .

Количественная оценка тепловых процессов между системой охлаждения и окружающей средой характеризуется перепадом температур  $\Delta \bar{t}_{CO-OKP} = \bar{t}_{CO} - \bar{t}_{OKP}$ . Уравнение состояния системы охлаждения в неявном виде в математической форме имеет вид:

$$f(\bar{t}_{CO}, \bar{t}_{OKP}, Q_i, G_V, G_W, F) = 0, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – количество теплоты, поступающей в охлаждающую жидкость или передаваемой поверхностью охлаждения радиатора, или рассеиваемой потоком воздуха;

$G_V$  – расход охлаждающей жидкости;

$G_W$  – расход охлаждающего воздуха;

$F$  – площадь поверхности радиатора.

Это уравнение означает, что существуют некоторые соотношения между конкретными значениями параметров в зависимости от состояния системы. Уравнение (1) запишем в виде:

$$\bar{t}_{CO} = \varphi(Q_i, G_V, G_W, F, \bar{t}_{OKP}, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} = 0. \quad (2)$$

При неизменных структурных параметрах и температуре окружающей среды  $\frac{dt}{d\tau} = 0$  и  $\bar{t}_{CO} = \text{const}$  температурный режим системы охлаждения и тепловое состояние двигателя характеризуются как стационарные. При изменении структурных или входных параметров, например изменении теплового потока одного из контуров ( $Q_i^* > Q_i$ ), уравнение (2) запишем в виде:

$$\bar{t}_{CO} = \varphi(Q_i^*, G_V, G_W, F, \bar{t}_{OKP}, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} \neq 0, \quad (3)$$

где знак (\*) здесь и далее будет означать новое, изменившееся значение параметра. Температурный режим системы охлаждения и тепловое состояние двигателя переменны и характеризуются как нестационарные.

Для приведения системы в стационарное установившееся состояние необходимо изменить один из входных параметров, например расход охлаждающей жидкости, тогда уравнение (3) будет иметь вид:

$$\bar{t}_{CO} = \varphi(Q_i^*, G_V^*, G_W, F, \bar{t}_{OKP}, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} = 0. \quad (4)$$

Состояние отдельных контуров, в которых осуществляется теплообмен, характеризуется выходными показателями.

Запишем уравнения состояния составляющих контуров системы в функции зависимых переменных:

- жидкостный контур

$$\bar{t}_V = C_V \cdot f(Q_V, G_V, t_{V1}, t_{V2});$$

- воздушный контур

$$\bar{t}_w = C_w \cdot f(Q_w, G_w, t_{w1}, t_{w2}).$$

Уравнение состояния системы в целом определяется количеством поступающей в систему теплоты, площадью поверхности охлаждения и средними температурами теплоносителей. Основным показателем является температура системы охлаждения, равная по значению температуре охлаждающей жидкости на выходе из двигателя. Состояние системы охлаждения в функции зависимых переменных в математической форме имеет вид:

$$\bar{t}_{CO} = K_T \cdot f(Q_F, F, \bar{t}_v, \bar{t}_w).$$

Условия устойчивости стационарного температурного режима обеспечиваются при  $Q_V = Q_F = Q_W$ . При нестационарном температурном режиме системы охлаждения температуры теплоносителей и средняя температура системы охлаждения переменны во времени и  $Q_V \neq Q_F \neq Q_W$ . В общем виде уравнения состояния системы охлаждения описывают процессы в функции параметров и внешних возмущающих факторов. Система охлаждения описывается приведенными уравнениями состояния каждого контура и поверхности охлаждения радиатора. Взаимодействия между уравнениями осуществляются согласно условиям устойчивости температурного режима.

### Математическая модель расчета параметров и показателей

Аналитические уравнения состояния каждого из контуров системы охлаждения идентичны и имеют примерно одинаковые математическую структуру и написание. Процессы теплообмена в них описываются расходами теплоносителей и площадью поверхности охлаждения радиатора, температурными показателями. Это позволяет процессы теплообмена рассматриваемых контуров при воздействии возмущающих факторов описать одной математической моделью. Теплообмен жидкостного и воздушного контуров в общем виде запишем следующей функциональной зависимостью:

$$Q_i = C \cdot f(G_i, t_1, t_2, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} = 0. \quad (5)$$

В уравнении (5) параметр  $G_i$  определяет расходы теплоносителей – жидкости или воздуха, температурные показатели определяют начальную  $t_1$  и конечную  $t_2$  температуры теплоносителей, при этом  $t_2$  всегда больше  $t_1$ . Указанные параметры являются переменными, коэффициент  $C$  во всех случаях является постоянным. При стационарном температурном режиме системы аргументы функции (5) имеют постоянные значения, т. е.  $\frac{dt}{d\tau} = 0$  и функция неизменна. Изменение одного или несколь-

ких аргументов приводит к изменению функции в сторону увеличения или уменьшения и к нарушению стационарного температурного режима, в этом случае  $\frac{dt}{d\tau} \neq 0$ .

Уравнение теплообмена в радиаторе записывается в виде:

$$Q_F = C \cdot f(F, \bar{t}_v, \bar{t}_w, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} = 0. \quad (6)$$

Система охлаждения взаимодействует с двигателем и окружающей средой, подвержена воздействию внутренних и внешних возмущающих факторов. Воздействие этих факторов является определяющим на показатели ее функционирования [1, 2, 3]. Опишем систему охлаждения в общем виде. Состояние объекта исследования описывается некоторым множеством параметров. К их числу относятся структурные, входные параметры и выходные показатели.

Структурные параметры системы охлаждения описывают состав и свойства составляющих компонентов, которые представим в виде подмножества:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}. \quad (7)$$

Верхний уровень структуры системы охлаждения состоит из двух контуров – жидкостного и воздушного, взаимодействие которых приведено в работах [4, 5]. Средний уровень структуры состоит из составляющих компонентов, параметры которых определяют свойства системы. Основными составляющими компонентами являются водяной насос, вентилятор, радиатор, параметры которых входят в состав подмножества (7).

Входные параметры характеризуют воздействие внешней среды и других возмущающих факторов на объект исследований и представляются в виде:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}. \quad (8)$$

При анализе и оценке входных параметров системы охлаждения принимаются нагрузочные факторы – режим работы двигателя, воздействие на систему охлаждения со стороны оператора; факторы окружающей среды – окружающая температура, погодные условия и др. Приведенные факторы носят случайный характер, например колебания нагрузки, изменения погодных условий. К возмущающим факторам следует также отнести отложения накипи на внутренних полостях рубашки охлаждения, трубок радиаторов, засорение и замасливание поверхностей радиатора и др.

Выходные показатели характеризуют реакцию системы охлаждения на внешнее воздействие и описываются в виде:

$$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}. \quad (9)$$

Выходными показателями является температура теплоносителей – охлаждающей жидкости, воздуха, просасываемого через радиатор.

Приведенные подмножества взаимоувязаны между собой и образуют аналитическую модель системы охлаждения двигателя как объекта исследований. Описание объекта исследования, или аналитическая модель системы охлаждения, представляется в виде:

$$Y = \varphi(X, S). \quad (10)$$

Строгая зависимость между входными параметрами и выходными показателями системы, их взаимосвязь позволяют отнести системы охлаждения к детерминированным системам, у которых известна реакция на различные входные воздействия. Решение поставленной задачи заключается в поиске такой структуры объекта, которая обеспечила бы его функцию при известных  $X$  и  $Y$ , учитывая ограничения, в виде предельно допускаемых значений расходов теплоносителей, температур теплоносителей и окружающей среды.

При воздействии возмущающих факторов, приводящих к изменению температурного режима, система охлаждения приводится к стационарному температурному режиму путем изменения одного или нескольких параметров. Под изменением параметров понимается регулирование, например, расхода теплоносителей, поверхности охлаждения радиатора. Используя подмножества (7)–(10), запишем уравнения теплообмена системы при стационарном и нестационарном температурных режимах как два уравнения в общем виде:

$$X = C \cdot \varphi(S, Y_1, Y_2, \tau), \quad \frac{dY}{dt} = 0; \quad (11)$$

$$X^* = C \cdot \varphi(S^*, Y_2^*, Y_1, \tau), \quad \frac{dY}{dt} \neq 0. \quad (12)$$

В уравнениях 11 и 12 аргумент  $S$  описывает структурные параметры – расход теплоносителя или значение поверхности охлаждения радиатора, выходные показатели  $Y_1$  и  $Y_2$  оценивают температуры теплоносителя, при этом значение показателя  $Y_2 > Y_1$ . Функция  $X$  определяет значение входного параметра при функционировании системы и при воздействии возмущающих факторов. Коэффициент  $C$  в обоих случаях имеет постоянное значение  $\tilde{N} = \text{const}$ .

Уравнение (11) описывает систему в стационарном состоянии. Структурные параметры системы, обеспечивающие требуемое значение выходных показателей, принимаем как номинальные. Уравнение (12) описывает нестационарное состояние системы, при котором показатель  $Y_2$  принял значение  $Y_2^*$ .

Чтобы привести систему по уравнению (12) к стационарному состоянию, необходимо изменить один из структурных параметров, т. е. система примет стационарное состояние при другом значении парамет-

ра  $S$  и условию, что  $X^* = X$ . Возможны два случая: случай, когда  $Y_2^* > Y_2$ , тогда  $S^* = (S + \delta S)$ ; случай, когда  $Y_2^* < Y_2$ , тогда  $S^* = (S - \delta S)$ . Уравнение (12) при приведении системы в стационарное состояние запишем в виде:

$$X^* = C \cdot F\{(S \pm \delta S), [(Y_2^* \mp \delta Y_2) - Y_1]\}. \quad (13)$$

В уравнении 13 показатель  $Y_2^*$  отличается от  $Y_2$  на величину  $\delta Y_2$ , знак минус (-) указывает на его увеличение ( $Y_2^* - \delta Y_2 = Y_2$ ) и знак плюс (+) – на его уменьшение ( $Y_2^* + \delta Y_2 = Y_2$ ). Для приведения системы к стационарному состоянию по уравнению (13) необходимо изменить структурный параметр на величину  $\delta S$ , чтобы получить требуемое значение показателя  $Y_2^*$ , т. е. изменить его на  $\delta Y_2$ .

Запишем уравнения (11) и (12) в виде системы уравнений:

$$X = C \cdot \varphi[S, (Y_2 - Y_1)]. \quad (14)$$

$$X^* = C \cdot \varphi\{(S \pm \delta S), [(Y_2^* \mp \delta Y_2) - Y_1]\}. \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) могут иметь и другое написание, если показатель  $Y_2$  принять постоянным, а  $Y_1$  – переменным. Приняв в рассматриваемом случае  $(Y_2 - Y_1) = \Delta Y$ ,  $(Y_2^* - Y_2) = \delta Y_2$ ,  $X^* = X$  и решая систему из уравнений (14) и (15), получим функциональное равенство

$$\varphi(S, \Delta Y) = \varphi\{(S \pm \delta S), (\Delta Y \mp \delta Y_2)\}. \quad (16)$$

Равенство (16) является аналитическим решением функциональных уравнений (14) и (15), при котором нестационарный температурный режим переводится в стационарный. Из равенства (16) определим параметры системы охлаждения, которые необходимо принять, чтобы температурный режим установился стационарным.

Приращение  $\delta S$  определяет изменение параметра  $S$ , а приращение  $\delta Y_2$  определяет изменение показателя  $Y_2$ , при котором функции будут равны ( $X^* = X$ ). Изменение показателя  $Y_2$  в зависимости от изменения параметра  $S$  описывается уравнением:

$$\delta Y_2 = \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\delta S} \pm 1} \cdot S, \quad (17)$$

где  $\delta S$  – изменение (увеличение или уменьшение) параметра  $S$  от его номинального значения, при котором показатель  $Y_2$  будет иметь требуемое значение.

Отношение  $\frac{\delta S}{S}$  определяет относительное изменение параметра,

которое обозначим  $\beta_s$ , и уравнение (17) будет иметь вид:

$$\delta Y_2 = \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\beta_s} \pm 1}.$$

В уравнении (17) и далее знак сверху применяется при ( $Y_2^* > Y_2$ ) и снизу – при ( $Y_2^* < Y_2$ ).

Показатель, получивший приращение вследствие воздействия внешних факторов, будет равен:

$$Y_2^* = Y_2 \mp \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\beta_s} \pm 1}.$$

Среднее значение изменяющихся показателей будет определяться по формуле:

$$\bar{Y}^* = \bar{Y} \mp \frac{\delta Y_2}{2},$$

где  $\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$  является средним значением показателей  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Из формулы (17) получим приращение параметра  $S$  в зависимости от изменения показателя  $Y_2$ :

$$\delta S = \frac{S}{\frac{\Delta Y}{\delta Y_2} \mp 1}.$$

Относительное изменение параметра  $S$  к изменению показателя  $Y_2$  определяется по формуле:

$$\frac{\delta S}{\delta Y_2} = \frac{S^*}{\Delta Y},$$

где  $S^* = S + \delta S$  является значением параметра, при котором достигается требуемое значение показателя  $Y_2$ .

В таблице 5 приведены расчетные формулы параметров и показателей системы охлаждения в зависимости от возможных изменений структурных параметров. Расчеты по приведенным формулам проведем при исследованиях параметров и показателей системы.

Таблица 5 – Расчетные формулы параметров и показателей в общем виде

$X^* = X; S = \text{const}; Y_1 = \text{const}; Y_2 = \text{const}$		
$\delta Y_2 = \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\beta_s} \pm 1}$ (1)	$Y_2^* = Y_2 \mp \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\beta_s} \pm 1}$ (2)	$\bar{Y}^* = \bar{Y} \mp \frac{\delta Y_2}{2}$ (3)
$\delta S = \frac{S}{\frac{\Delta Y}{\delta Y_2} \mp 1}$ (4)	$\frac{\delta S}{\delta Y_2} = \frac{S^*}{\Delta Y}$ (5)	$\Delta Y^* = \Delta Y \left[ 1 \mp \frac{1}{\left( \frac{1}{\beta_s} \pm 1 \right)} \right]$ (6)



$\delta Y_1 = \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\beta_s} \pm 1} \quad (7)$	$Y_1^* = Y_1 \mp \frac{\Delta Y}{\frac{1}{\beta_s} \pm 1} \quad (8)$	$\bar{Y}^* = \bar{Y} \mp \frac{\delta Y_1}{2} \quad (9)$
$\delta S = \frac{S}{\frac{\Delta Y}{\delta Y_1} \mp 1} \quad (10)$	$\frac{\delta S}{\delta Y_1} = \frac{S^*}{\Delta Y} \quad (11)$	
$\delta X = X \frac{\delta Y_2}{\Delta Y} \quad (12)$	$Y_2^* = Y_2 \pm \Delta Y \frac{\delta X}{X} \quad (13)$	$\frac{\delta X}{\delta Y_2} = \frac{X}{\Delta Y} \quad (14)$

**Примечание** – Верхние знаки в уравнениях применяются при увеличении, нижние – при уменьшении структурных параметров.

### Заключение

Формулы таблицы 5 являются решением задач по определению параметров системы охлаждения в общем виде при воздействии на систему как внутренних, так и внешних возмущающих факторов. Расчеты могут проводиться в относительных величинах, что позволяет определить характер изменения параметров, и в абсолютных величинах, что позволяет рассчитать требуемое абсолютное значение параметра для удержания реальной системы в стационарном температурном режиме.

Графики функций, построенные по результатам расчетов, являются регулировочными графиками, позволяющими при изменении температурного режима теплоносителей системы путем изменения массовых расходов охлаждающей жидкости и потока воздуха, поверхности охлаждения радиатора удерживать теплоносители контуров охлаждения, а соответственно, и систему охлаждения в стационарном температурном режиме. Приведенные формулы позволяют определить параметры и показатели системы при нестационарном температурном режиме, если параметры и показатели стационарного режима известны, и определить значения параметров, которые могут нормализовать систему путем регулирования в режим стационарного теплообмена.

01.04.2014

### Литература

1. Тарасенко, В.Е. Влияние внешних факторов на температурный режим системы охлаждения дизеля трактора / В.Е. Тарасенко // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 25–26 августа 2010 г. / РУП «Науч.-практ. центр Нац. акад. Наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П.П. Казакевич (гл. ред.), О.О. Дударев. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2010. – С. 153–156.

2. Тарасенко, В.Е. Вероятность переохлаждения и перегрева двигателя трактора / В.Е. Тарасенко, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2013. – Вып. 47. – Т. 1. – С. 14–18.
3. Якубович, А.И. Нестационарный температурный режим дизеля / А.И. Якубович, В.Е. Тарасенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 3(4). – С. 19–23.
4. Якубович, А.И. Системы охлаждения двигателей тракторов и автомобилей. Конструкция, теория, проектирование: монография / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2011. – 435 с.
5. 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.: ил. – (Высшее образование: Магистратура).

УДК 621.431.7

**В.Е. Тарасенко**

(УО «БГАТУ»,

г. Минск, Республика Беларусь);

**А.А. Жешко**

(РУП «НПЦ НАН Беларуси по

механизации сельского хозяйства»,

г. Минск, Республика Беларусь)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКИ НА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЕЙ**

### **Введение**

В соответствии с функциональным назначением – отводить теплоту, система охлаждения подвержена тепловой нагрузке. Под *тепловой нагрузкой* будем понимать количество теплоты, поступающее в охлаждающую жидкость от стенок цилиндров и других деталей двигателя при сгорании топлива. В настоящей работе представлены результаты исследований тепловой нагрузки на системы охлаждения дизелей.

### **Основная часть**

Тепловая нагрузка в системе охлаждения создается тепловыми потоками от двигателя. Схема тепловых потоков в системе охлаждения представлена на рисунке 10. В охлаждающую жидкость в рубашке охлаждения теплота поступает от стенок цилиндров  $q_{ст}$  и вследствие конвекции распространяется по всему потоку жидкости. Некоторая часть теплоты теряется вследствие теплоотдачи от поверхности блок-картера двигателя  $q_m$ . К радиатору теплота переносится потоком жидкости  $q_v$ , а теплопроводностью материала трубок и пластин переносится к наружным поверхностям этих элементов и конвекцией рассеивается с потоком воздуха в окружающей среде  $q_w$ . Тепловые потоки в системе