

Математическое моделирование теплового аккумулятора для системы тепловой подготовки специальной техники

В.В. Конев, Д.М. Бородин, С.В. Созонов, Е.В. Половников, А.А. Плохов
Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Аннотация: В условиях автономного функционирования специальной техники возникает необходимость использования ее внутренних источников. Это можно осуществить использованием системы утилизации тепла двигателя внутреннего сгорания. Для этого предлагается тепловой аккумулятор. Проведено математическое моделирование теплового состояния теплового аккумулятора в стадии охлаждения. Определено, что основными факторами, влияющими на тепловое состояние теплового аккумулятора являются: толщина теплоизоляционного слоя, масса и температура теплоаккумулирующего материала, характеристики окружающей среды (температура, скорость ветра). В ходе исследования разработана методика расчета теплового состояния при охлаждении теплового аккумулятора. Методика представлена в общем виде в графической форме. Это позволяет упростить определение времени охлаждения теплового аккумулятора при его проектировании.

Ключевые слова: эксплуатация, тепловой аккумулятор, тепловая подготовка, теплопередача, система утилизации тепла, низкие отрицательные температуры.

При эксплуатации специальной техники в условиях Крайнего Севера и Арктики при низких отрицательных температурах возникают трудности с запуском агрегатов этих машин (ДВС, гидропривод, салон) в начале рабочей смены, после межсменной стоянки на открытой площадке [1 - 4]. С целью обеспечения работоспособности машин используются различные средства тепловой подготовки [5 - 7]. Одним из вариантов тепловой подготовки является система утилизации тепла, в которой используются тепловые аккумуляторы. Тепло, накопленное и сохраненное в тепловом аккумуляторе, используется для тепловой подготовки агрегатов машины после их межсменной стоянки [3, 4, 8].

Качество работы систем утилизации тепла зависит в первую очередь от качества теплового аккумулятора его теплового потенциала [8]. Поэтому рассмотрим процесс охлаждения теплового аккумулятора после его

заполнения охлаждающей жидкостью (теплоносителем) из подрубашечного пространства ДВС.

На скорость охлаждения оказывают влияние следующие факторы: теплотехнические характеристики теплоаккумулирующего и теплоизоляционного материала, площадь поверхности охлаждения и толщина теплоизоляционного слоя теплового аккумулятора, температура окружающего воздуха. Существует методика, позволяющая осуществлять перевод скорости ветра в температуру с учетом внешней температуры окружающего воздуха [3, 7, 9]. Поэтому, отдельно фактор – скорость ветра в исследовании не рассматривался. Очевидно, большое количество факторов усложняет процесс проведения любого исследования. Так, если рассматривать планирование полного факторного эксперимента, то количество опытов увеличивается в степени в зависимости от количества факторов, учитываемых в исследовании. При этом нет необходимости учитывать все факторы, т.к. возможны незначимые факторы, влияние которых на процесс может находиться в пределах погрешности исследуемого процесса.

При охлаждении теплового аккумулятора с увеличением времени $d\tau$, градиент температур стремится к нулю – достигается тепловое равновесие с внешней средой. Для исследования процесс охлаждения теплового аккумулятора выделяют три режима охлаждения: нерегулярный, регулярный и стационарный [3, 10]. При нерегулярном режиме в начальный отрезок времени $\tau=0$ перепад температур не одинаковый и не имеет общего математического описания процесса охлаждения в отношении к регулярному режиму. Это связано с тем, что теплофизические свойства материалов теплового аккумулятора разные.

На процесс охлаждения нерегулярный режим (учитывая его длительность) оказывает незначительное влияние по протяженности и

перепаду температур. Поэтому этим режимом в нашем исследовании мы пренебрегаем. Это было проверено предварительными экспериментальными исследованиями.

В соответствии с изложенным следует, что охлаждение всех элементов теплового аккумулятора в среде с температурой t_e начнется после того как эти элементы примут начальную температуру t_n . В итоге начнется регулярный режим, который характеризуется равными перепадом избыточной температуры $\mathcal{G} = t - t_e$, где t - текущая температура теплового аккумулятора. В период начала процесса охлаждения избыточная температура будет определяться по формуле: $\mathcal{G}_0 = t_n - t_e$.

Аналогично первому режиму (нерегулярному) исключаем из исследования стационарный режим, т.к. в этот период температура теплового аккумулятора во всех его точках сравнивается с температурой окружающего воздуха. Учитывая, что тепловой аккумулятор работоспособен при положительных температурах (его эффективность этим определяется) и процесс исследуется при отрицательных температурах окружающего воздуха, равенство температуры окружающего воздуха и теплового аккумулятора также исключается.

Рассматривая процесс охлаждения теплового аккумулятора определим его форму. Из ранее проведенных исследований определено, что скорость охлаждения будет зависеть от соотношения площади поверхности теплового аккумулятора к его объему. Очевидно, что чем больше отношение площади поверхности теплового аккумулятора к его объему, тем быстрее будет охлаждение [10].

Из этого положения следует, что наибольшее время охлаждения имеет шар, а наименьшее, соответственно куб и далее цилиндр. Учитывая трудоёмкость изготовления и эксплуатации, принята для теплового

аккумулятора форма в виде цилиндра, у которого диаметр и высота одинаковы.

Размеры теплового аккумулятора также определяют его эффективность. Относительные потери теплоты снижаются с увеличением размеров теплового аккумулятора. При этом размеры теплового аккумулятора определяются длительностью процесса охлаждения (требуемого теплового потенциала).

При оценке теплового потенциала теплового аккумулятора, определении его размеров, определяется толщина теплоизоляционного слоя. Как выше было рассмотрено, площадь поверхности теплоизоляции определяет время остывания теплового аккумулятора. Тогда возможно, что при большей толщине теплоизоляции тепловой аккумулятор имеет скорость охлаждения выше в сравнении с меньшей толщиной теплоизоляционного слоя. Это необходимо учитывать при проектировании теплового аккумулятора.

Теплопроводность определяется по формуле:

$$dt / d\tau = a(d^2t / dx^2 + d^2t / dy^2 + d^2t / dz^2) \quad (2)$$

Входные характеристики (условия однозначности) определены в виде:

- физических параметров теплоизоляционного материала (c, p, λ);

- формы и размеров теплового аккумулятора (δ, l);

- начальной температуры теплового аккумулятора,

$$\tau = 0, t = t_0 = f(x, y, z).$$

В проводимых исследованиях граничные условия задаются в виде условий третьего рода, тогда:

$$(dt / dn)_{n=0} = \alpha \frac{a}{\lambda(t_{n=0} - t_{жс})} \quad (3)$$

Уравнение (2) и условия однозначности позволяет представить обобщённую функцию в виде:

$$t = f(x, y, z, \tau, \alpha, \lambda, a, t_0, t_{жс}, l_n). \quad (4)$$

Для моделирования процесса охлаждения теплового аккумулятора примем следующие упрощения:

- теплоизоляцию рассматриваем в виде пластины с толщиной δ ;
- процесс охлаждения протекает при постоянной температуре окружающего воздуха $t_{воз} = const$;
- отвод тепла осуществляется при постоянном коэффициенте теплоотдачи ($\alpha = const$) в процессе охлаждения;

Отсчет температуры пластины в любой момент времени определяется от температуры окружающей среды ($t - t_{воз} = v$). Сделаем преобразование уравнения(2) и граничных условий(3) путем подстановки значения ранее указанной температуры v . Так как, температура по осям Y и Z не имеет изменений с течением времени, то $\frac{dv}{dy} = 0$ и $\frac{dv}{dz} = 0$. В соответствие с этим уравнение (2) будет представлено в следующем виде:

$$\frac{dv}{d\tau} = a \left(\frac{d^2v}{dx^2} \right). \quad (5)$$

Приняты следующие начальные условия:

$$\text{при } \tau = 0, v = v = v_0 = t_0 - t_{воз}, \quad (6)$$

Графическая форма представляется в виде системы, где начало координат находится на поверхности пластины. В соответствие с этим граничные условия для поверхности пластины будут следующие:

$$\text{при } x = 0, \quad \left(\frac{dv}{dn} \right)_{n=0} = 0, \quad (7)$$

при $x = \delta$,

$$\left(\frac{dv}{dn}\right)_{x=0} = \frac{-\alpha}{\lambda v_{x=\delta}}. \quad (8)$$

Уравнение (5) и условия, указанные в уравнениях (6 - 8) позволяют сформулировать поставленную задачу. Решение уравнения (5) с использованием начальных и граничных условий определяет зависимость температуры в пластине. При известном значении критерия Bi безразмерная температура имеет линейную зависимость от времени. Тогда, задачу можно решить графическим способом.

Значение безразмерной температуры Θ определяется по формуле:

$$\Theta = \frac{t_{мек} - t_{\text{воз}}}{t_0 - t_{\text{воз}}}, \quad (9)$$

Где, $t_{\text{вод}}$ - температура теплоносителя ($^{\circ}C$) (текущая) от времени (τ); t_0 - температура теплоносителя в начале процесса охлаждения, $^{\circ}C$; $t_{\text{воз}}$ - температура окружающего воздуха, $^{\circ}C$.

Пластина в процессе охлаждения с течением времени будет иметь разные кривые. Эта кривая убывает к поверхностям пластины монотонно. В графическом виде для любого момента времени касательные к кривым в точке с координатой $X=l$ будут проходить через направляющую точку (A), которая расположена от поверхности пластины на расстоянии X_0 . В соответствие с изложенным получим:

$$X_0 = \frac{\ell}{Bi}. \quad (10)$$

Как видно из выражения(10), расстояние точки A от поверхности пластины определяется условиями однозначности, которые можно использовать для любого момента времени при охлаждении теплового

аккумулятора. Следовательно, при неизменных граничных условиях, касательные ко всем температурным кривым поверхности пластины будут проходить через точку A . Это позволяет определить изменения температуры в тепловом аккумуляторе при заданном значении критерия Bi .

В исследуемой задаче критерий Bi имеет значения $0,1 \leq Bi < 100$. Процесс охлаждения теплового аккумулятора определяется термическими сопротивлениями, происходящими внутри теплового аккумулятора и снаружи. При этом выравнивание температуры (внутренние процессы) происходит быстрее, чем отвод тепла (внешние процессы) с поверхности теплового аккумулятора. Процесс охлаждения определяется интенсивностью теплоотдачи на поверхности теплоизоляции. Тогда логично утверждать, что результатом тепловых процессов в тепловом аккумуляторе является, температура на поверхности теплоизоляции. Это упрощает проводимые исследования при допустимой погрешности.

В соответствие с изложенным, при известной температуре на поверхности теплового аккумулятора можно получить графики с прямыми Bi . Алгоритм построения графика $\Theta = f(Bi, F_0)$ следующий:

1. Определение значения Gr (температурный напор определяется из экспериментальных данных).
2. Определение значения $N_{ив}$ в том числе с учетом ветра.
3. Определение значения α .
4. Проверка на условие $d > d_{кр}$.
5. Определение Bi .
6. Определение значения F_0 и значение температуропроводности (a).
7. Определение значения Θ .

Значения критерия F_0 и Θ , при охлаждении теплового аккумулятора, соответствуют определённому значению времени. Также для теплового

аккумулятора определены точки с одинаковым значением α . Эти значения позволяют определить значения критерия Bi . Результаты полученных значений представляются графически по оси X значения критерия F_0 , а по оси Y значения Θ .

С использованием построенного графика зависимости $\Theta = f(Bi, F_0)$ упрощается проектирование теплового аккумулятора, упрощается методика определения температуры в последующий момент времени при известной температуре окружающего воздуха, начальной температуры на поверхности теплового аккумулятора и температура его теплоносителя. Решение задачи достигается графическим методом - определения нужного Bi при пересечении полученных F_0 и Θ . Соответствующее значение Bi является характеристикой для проектируемого теплового аккумулятора.

Использование полученной методики, при начальных условиях: тепловой аккумулятор - цилиндр с объемом $0,03 \text{ м}^3$; теплоизоляция - пенопласт с толщиной $\delta = 0,1\text{м}$; температура окружающего воздуха минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$; начальная температура теплового аккумулятора плюс $85 \text{ }^\circ\text{C}$; понижение температуры теплоносителя в тепловом аккумуляторе на $(10 - 15 \text{ }^\circ\text{C}) - Bi = 16,39$. Это соответствует времени хранения тепла в тепловом аккумуляторе $17,3 \text{ ч}$.

Для практического применения полученной методики по определению времени охлаждения теплового аккумулятора при различном теплоизоляционном материале и его толщины разработана специальная компьютерная программа. Алгоритм разработанной программы в следующем:

1. Вводятся значения характеристики теплового аккумулятора: высота l , (м): $0,4; 0,5; 0,6; 0,7$; теплопроводность теплоизолирующего материала λ ,



$(\frac{Вт}{м^0С})$: 0,116; 0,066; 0,037; 0,047; теплоемкость материала c , $(\frac{кДж}{кг^0С})$: соответственно 0,82; 0,92; 0,67; 0,75; плотность теплоизоляции ρ , $(\frac{кг}{м^3})$: соответственно 770; 250; 200; 150; диаметр теплового аккумулятора d , (м): 0,4 м; 0,5 м; 0,6 м; 0,7; толщина теплоизоляции δ (м): 0,025; 0,05; 0,1; температура на поверхности теплоизоляции 0С : +3, +6, +9; β - коэффициент температурного расширения теплоносителя $\frac{1}{t}$: $\frac{1}{263}$; $\frac{1}{243}$; $\frac{1}{233}$; t_0 - начальная температура теплового аккумулятора, (0С): 85; 90; 95; $t_{год}$ - первая текущая температура теплоносителя (0С): 70; 75; 80; время охлаждения до текущей температуры теплоносителя τ (час): 0,2; 0,6; 0,1; 1,3.

2. Вводятся значения характеристики окружающей среды (температуры окружающего воздуха $t(^0С)$: -10; -30; -40; скорости ветра - $v\frac{м}{с}$: 10, 15; v , $\frac{м^2}{с}$ - коэффициент кинематической вязкости воздуха $13 \cdot 10^{-6}$; $g, (\frac{м^2}{с})$ - ускорение свободного падения 9,8; $Pr = 0,7$.

Если $v=0$, то:

3. Определяется Gr по формуле $Gr = g\beta l^3 \Delta T / \nu^2$; определяем $GrPr$.

4. Определяется Nu :

при условии $10^3 < GrPr < 10^9$, соответствующем ламинарному режиму
 $Nu = 0,76(GrPr)^{0,25} (Pr_c / Pr_c)^{0,25}$;

при условии $GrPr > 10^9$, соответствующем турбулентному режиму
 $Nu = 0,15(GrPr)^{0,33} (Pr_c / Pr_c)^{0,25}$.

При условии $v>0$, $Re = vl / \nu$:

- в случае $Re < 2000$, критерий Нуссельта определяется
 $Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} (Pr_c / Pr_c)^{0,25}$;

при $Re > 2000$, соответственно $Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} (Pr_c / Pr_c)^{0,25}$;

при $Re > 10000$, $Nu = 0,021 Re^{0,80} Pr^{0,43} (Pr_c / Pr_c)^{0,25}$.

5. Определяется значение α из выражения при рассчитанном значении критерия Нуссельта по формуле $Nu = \alpha l / \lambda$.

6. По формуле $d_{кр} = \frac{2\lambda}{\alpha}$ проверяется условие $d > d_{кр}$, если условие не выполняется, то необходимо пересмотреть вводные данные (характеристики теплоизоляции).

7. Определяется значение критерия Bi по формуле $Bi = \alpha \delta / \lambda$.

8. Определяется значение Θ по формуле $\Theta = (t_{вод}^{тек} - t_{воз}) / (t_0^{нач} - t_{воз})$.

9. Определяется температуропроводность - a по формуле $a = \lambda / (c_p \rho)$.

10. Согласно построенному графику $\Theta = f(Bi, F_0)$ на пересечении рассчитанных значений Θ и Bi определяется критерий F_0 . По формуле

$F_0 = \frac{a\tau}{\delta^2}$ находится время охлаждения теплового аккумулятора (τ).

В результате проведенных исследований определено, что основными факторами влияния на время охлаждения теплового аккумулятора являются: толщина теплоизоляционного материала, характеристики теплоносителя (масса и температура), характеристики окружающей среды (температура и скорость ветра). На основе математического моделирования процесса охлаждения теплового аккумулятора получена в общем виде графическая форма определения времени охлаждения теплового аккумулятора, разработан алгоритм и компьютерная программа на его основе.

Литература



1. Конев В.В., Созонов С.В., Бородин Д.М., Половников Е.В. Датчики для исследования теплового состояния машин, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера и Арктики //Инженерный вестник Дона, 2015, № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2791.

2. Конев В.В., Серебренников А.А., Бородин Д.М., Половников Е.В., Саудаханов Р.И. Модернизация гидропривода строительного-дорожных машин для северных условий эксплуатации // Современные проблемы науки и образования. 2015, № 1 URL: science-education.ru/121-17422.

3. Совершенствование системы предпусковой тепловой подготовки двигателя землеройной машины (на примере двигателя экскаватора ЭО-4121А) Конев В.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тюмень, 2002. 137 с.

4. Карнаухов Н.Н., Конев В.В., Разуваев А.А., Юринов Ю.В. Система предпусковой тепловой подготовки ДВС и гидропривода Пат. 2258153 Рос. Федерация, МПК7 F02N 17/06; заявитель и патентообладатель ТюмГНГУ. - № 2004104477/06; заявл. 16.02.2004; опубл. 10.08.2005, Бюл. № 22.

5. Thermal preparation of the trailbuilder fluid drive Konev V., Merdanov S., Karnaukhov M., Borodin D. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. T. 190 volume 1. pp. 697-706.

6. Sh. Merdanov, V. Konev, S. Sozonov, Experimental research planning heat training hydraulic motors: Scientific enquiry in the contemporary, world: theoretical basics and innovative approach, Vol. 5. - Technical Sciences. Research articles, B&M Publishing (San Francisco, California, USA) 2014. – pp.113-117.

7. Математическое моделирование теплового состояния строительного-дорожных машин Конев В.В., Закирзаков Г.Г., Райшев Д.В., Мерданов М.Ш., Саудаханов Р.И. Современные проблемы науки и образования, 2014, № 6 С. 320.



8. Конев В.В., Райшев Д.В., Закирзаков Г.Г., Созонов С.В. Моделирование системы утилизации тепла ДВС специальной и автотранспортной техники //Инженерный вестник Дона, 2015, № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2830.

9. Захаров, Н.С. Взаимосвязь между климатическими факторами / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.Н. Ракитин // Научно-технический вестник Поволжья, 2014, № 1 – С. 26-29.

10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник 4-е изд. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.

References

1. Konev V.V., Sozonov S.V., Borodin D.M., Polovnikov E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. № 1; URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2791.

2. Konev V.V., Serebrennikov A.A., Borodin D.M., Polovnikov E.V., Saudahanov R.I. Sovremennye problem nauki I obrazovanija. 2015. № 1; URL: science-education.ru/121-17422.

3. Sovershenstvovanie sistemy predpuskovoј teplovoj podgotovki dvigatelja zemlerojnoj mashiny (na primere dvigatelja jekskavatora JeO-4121A) [Improving the system of pre-launch preparation of the thermal engine earth moving machines (for example, the engine of the excavatorEO-4121A)] Konev V.V. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehničeskih naukTjumen', 2002. 137 p.

4. Karnauhov N.N., Konev V.V., Razuvaev A.A., JurinovJu.V. Pat. 2258153 Ros. Federacija, MPK7 F02N 17.06; zajavitel' ipatentoobladatel' TjumGNGU. № 2004104477.06; zajavl. 16.02.2004; opubl. 10.08.2005, Bjul. № 22.

5. Konev V., Merdanov S., Karnaukhov M., Borodin D. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. T. 190 volume 1. pp. 697-706.



6. Sh. Merdanov, V. Konev, S. Sozonov. Scientific enquiry in the contemporary, world: theoretical basiss and innovative approach, Vol. 5. Technical Sciences. Research articles, B&M Publishing (San Francisco, California, USA) 2014. pp.113-117.

7. Konev V.V., Zakirzakov G.G., Rajshev D.V., MerdanovM.Sh., Saudahanov R.I. Sovremennyyeproblemynaukiio obrazovanija. 2014. № 6. p. 320.

8. Konev V.V., Rajshev D.V., Zakirzakov G.G., Sozonov S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. № 1; URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2830.

9. Zaharov, N.S. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2014. № 1. p. 26-29.

10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]: uchebnik 4-e izd. M.: Jenergoizdat, 1981. 416 p.