

# Синтез системы управления процессом охлаждения масла в системе маслоснабжения газотурбинного двигателя

П. А. Мальцев<sup>1</sup>, Н. А. Шатилова<sup>2</sup>  
Санкт-Петербургский горный университет  
maltcev-pave@mail.ru, <sup>2</sup>n\_a\_shatilova@mail.ru

С. Е. Абрамкин  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
seabramkin@etu.ru

**Аннотация.** Цель работы – синтез системы управления процессом охлаждения масла в аппаратах воздушного охлаждения. Проведено исследование тепломассообменных процессов, протекающих в аппаратах. В результате определены допущения для построения математической модели, разработана математическая модель процесса, определены граничные и начальные условия, осуществлен переход к дискретно-непрерывной модели для проведения вычислительного эксперимента, определены возмущающие воздействия, проведено компьютерное моделирование. Результаты моделирования показали адекватность разработанной математической модели технологическому процессу. На основании полученных переходных процессов, аппроксимирована передаточная функция объекта исследования и осуществлен синтез системы управления процессом охлаждения масла.

**Ключевые слова:** аппарат воздушного охлаждения масла; математическая модель; тепломассообмен; система управления; передаточная функция.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Транспортировка природного газа по магистральным газопроводам осуществляется 411 компрессорными станциями. Основным технологическим элементом этих станций является газоперекачивающий агрегат (ГПА), состоящий из взаимосвязанной системы «двигатель – нагнетатель». Нормальная эксплуатация этой системы во многом зависит от работоспособности вспомогательных систем, в частности масляной системы и системы подогрева и охлаждения масла [1].

Обеспечение работоспособности масляной системы, особенно в районах Крайнего Севера во многом зависит от правильной работы системы подогрева и охлаждения масла. Охлаждение масла осуществляется в аппаратах воздушного охлаждения масла (АВОМ). Повышению эффективности работы АВОМ посвящены многочисленные исследования [2]–[7].

## II. СИСТЕМА МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Масляная система ГПА обеспечивает следующие функции [1]:

- охлаждение подшипников;
- обеспечение системы регулирования носителем энергии;
- уплотнение подшипников нагнетателя.

Масляная система ГПА состоит из маслососов (основных и резервных), маслобаков, охладителей масла, фильтров, подогревателей, средств измерения и исполнительных механизмов.

Маслосистема имеет два независимых источника энергии, так как основной насос работает от газовой турбины, а резервные – от двигателей переменного тока. Это обеспечивает надежность ее работы и в конечном итоге работоспособность турбины и нагнетателя.

Для нормальной работы подшипников турбины и гидравлической системы регулирования необходимо поддерживать заданные вязкость и температуру масла. Это связано с тем, что при длительных остановках турбины масло имеет относительно низкую температуру, и, следовательно, большую вязкость. В связи с этим перед пуском турбины его подогревают. При нормальной работе масло осуществляет не только смазку трущихся деталей, но и является охлаждающим агентом. При этом происходит теплосъем, образовавшегося во время трения тепла. Поэтому масло необходимо охлаждать, так как выделение тепла от трущихся деталей весьма значительно.

Работа системы маслоснабжения ГПА осуществляется следующим образом: при включении основного насоса масло из маслобака подается в нагнетательные линии. Далее масло поступает в блок АВОМ, где достигается его заданная температура. Из блока АВОМ масло поступает в фильтры, где происходит очистка от механических примесей, и подается на соединительные элементы ГПА, откуда сливается обратно в бак. Таким образом, осуществляется замкнутый цикл работы системы маслоснабжения.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что температура масла является основным параметром маслосистемы ГПА, соответственно исследование процессов теплообмена в АВОМ является актуальной задачей.

## III. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АВОМ

В основе работы АВОМ лежит передача излишнего тепла от масла к окружающей среде. Это осуществляется в ходе движения масла по оребренным трубкам теплообменной секции маслоохладителя. Процесс теплообмена возникает между теплоносителем и стенками трубок, в результате которого излишнее тепло

передается от масла к стенкам. При этом сами стенки охлаждаются потоками воздуха, нагнетаемого вентиляторами.

Теплообменные процессы, протекающие в АВОМ, описываются системой нелинейных уравнений Фурье, дополненной граничными и начальными условиями.

Допущения, принятые при разработке математической модели (ММ):

- масло – не сжимаемо;
- отсутствие внутреннего источника тепла в масле;
- теплофизические свойства масла и материала трубок теплообменной секции не зависят от температуры;
- скорость движения масла – постоянная величина;
- температура масла и стенок трубок не зависит от полярного угла;
- поток тепла, возникающий в следствии конвекции при движении масла вдоль оси  $x$ , много больше, чем поток тепла вдоль трубы, обусловленный теплопроводностью масла.

В основе ММ лежит уравнение теплопроводности. Так как АВОМ содержит трубку с внутренним и внешним радиусом ( $r_1$  и  $r_2$ ), то ММ создается в цилиндрической системе координат. Таким образом, запишем ММ теплообменного процесса в АВОМ в следующем виде [4]:

$$\frac{\partial \theta_M}{\partial t} = \alpha_M \left( \frac{\partial^2 \theta_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_M}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_M}{\partial x^2} \right) - v(r) \frac{\partial \theta_M}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_{CT}}{\partial t} = \alpha_{CT} \left( \frac{\partial^2 \theta_{CT}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_{CT}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_{CT}}{\partial x^2} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha_M = \lambda_M / (c_M \gamma_M)$  и  $\alpha_{CT} = \lambda_{CT} / (c_{CT} \gamma_{CT})$  – коэффициент температуропроводности масла и материала трубки;  $\lambda_M$  – теплопроводность масла;  $c_M$  – удельная теплоемкость масла;  $\gamma_M$  – плотность масла;  $\lambda_{CT}$  – теплопроводность материала трубки теплообменной секции;  $c_{CT}$  – удельная теплоемкость материала трубки теплообменной секции;  $\gamma_{CT}$  – плотность материала трубки теплообменной секции.

Уравнение (1) применимо при  $0 < r < r_1$ ,  $x > 0$ , а (2) при  $r_1 < r < r_2$ ,  $x > 0$ .

Отметим, что последнее допущение позволяет пренебречь в уравнении (1) второй производной по  $x$ :

$$\frac{\partial \theta_M}{\partial t} = \alpha_M \left( \frac{\partial^2 \theta_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_M}{\partial r} \right) - v(r) \frac{\partial \theta_M}{\partial x}. \quad (3)$$

Считаем, что на поверхности трубки поддерживается температура окружающей среды, т. е. имеет место, следующее граничное условие  $\theta_{CT}(x, r_2, t) = \theta_B$ . На основании этого можно не учитывать (2).

Принимая во внимание допущение, что скорость теплоносителя постоянна получим вместо уравнения (3) следующее уравнение теплового поля масла:

$$\frac{\partial \theta_M}{\partial t} = \alpha_M \left( \frac{\partial^2 \theta_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_M}{\partial r} \right) - v \frac{\partial \theta_M}{\partial x}. \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (4):

$$\theta_M(x, r_1, t) = \theta_B; \quad \frac{\partial \theta_M(x, 0, t)}{\partial r} = 0; \quad \theta_M(0, r, t) = \theta_{Bx}.$$

Начальные условия (при  $t = 0$ ):

$$\theta_M(x, r, 0) = \theta_{Bx}.$$

Уравнение (4) решаем методом конечных разностей. В результате преобразований, получим:

$$\frac{\theta_{Mi,j,k} - \theta_{Mi,j,k-1}}{\Delta t} = \alpha_M \left( \frac{\theta_{Mi,j-1,k-1} - 2\theta_{Mi,j,k-1} + \theta_{Mi,j+1,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta r j} \frac{\theta_{Mi,j,k-1} - \theta_{Mi,j-1,k-1}}{\Delta r} - v \frac{\theta_{Mi,j,k-1} - \theta_{Mi-1,j,k-1}}{\Delta x} \right),$$

где  $0 < i < N_x$ ,  $0 < j < N_r - 1$ ,  $k > 0$ ;  $N_x$  – количество точек дискретизации по переменной  $x$ ;  $N_r$  – количество точек дискретизации по переменной  $r$ ;  $k$  – текущий момент времени.

Выразим температуру в текущей точке в текущий момент времени:

$$\theta_{Mi,j,k} = \left[ \alpha_M \left( \frac{\theta_{Mi,j-1,k-1} - 2\theta_{Mi,j,k-1} + \theta_{Mi,j+1,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta r j} \frac{\theta_{Mi,j,k-1} - \theta_{Mi,j-1,k-1}}{\Delta r} - v \frac{\theta_{Mi,j,k-1} - \theta_{Mi-1,j,k-1}}{\Delta x} \right) \right] \Delta t + \theta_{Mi,j,k-1}, \quad (5)$$

Граничные условия в дискретном виде:

$$\theta_M(i, N_r - 1, k) = \theta_B; \quad \theta_M(i, 0, k) = \theta_M(i, 1, k);$$

$$\theta_M(0, j, k) = \theta_{Bx}.$$

На процесс влияют следующие возмущающие воздействия:

- изменение расхода охлаждающего воздуха, при изменении частоты вращения вентилятора;
- изменение температуры масла, поступающего на вход теплообменных секций АВОМ;
- изменение температуры окружающей среды.

#### IV. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА

Исходные данные для эксперимента: температура масла на входе в АВОМ 25 °С; температура окружающей среды 15 °С. При проведении эксперимента подавались возмущающие воздействия по температуре масла на входе в теплообменные секции АВОМ в диапазоне от 5 до 60 °С и температуре окружающей среды в пределах от 5 до 35 °С.

График переходного процесса при повышении температуры окружающей среды до 35 °С, представлен на рис. 1.

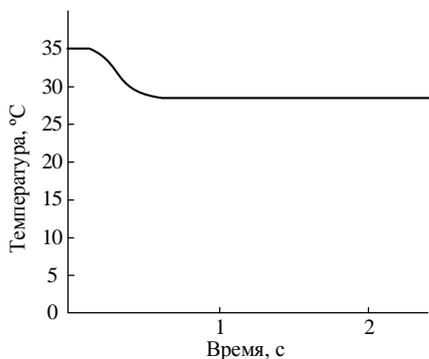


Рис. 1. График переходного процесса при увеличении температуры окружающей среды

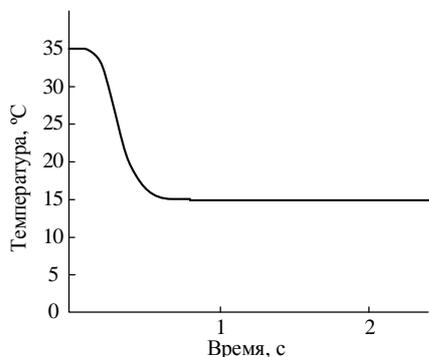


Рис. 2. График переходного процесса при понижении температуры масла

График переходного процесса при снижении температуры масла до 5 °С, представлен на рис. 2.

График переходного процесса при повышении температуры масла до 60 °С, представлен на рис. 3.

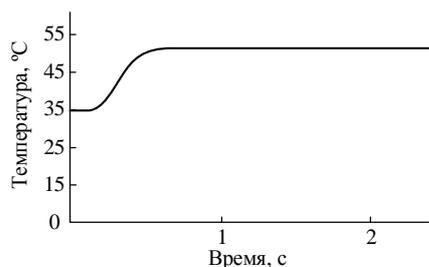


Рис. 3. График переходного процесса при повышении температуры масла

Анализ переходных процессов показал, что они носят монотонно-убывающий и монотонно-возрастающий характеры, в зависимости от возмущающего

воздействия. Время установления процесса находится в диапазоне 0,4...0,6 с. Так же по графикам видно, что при подаче возмущающего воздействия система не обеспечивает заданное значение по температуре масла, а устанавливается в новом значении. Для обеспечения заданного значения температуры масла на выходе из АВОМ, необходима разработка системы автоматического регулирования.

Анализ переходного процесса на рис. 3, показывает, что в данном случае передаточная функция (ПФ) объекта управления может быть представлена апериодическим звеном 1-го порядка с запаздыванием. Коэффициенты ПФ определены методом графической аппроксимации по переходному процессу на рис. 4.

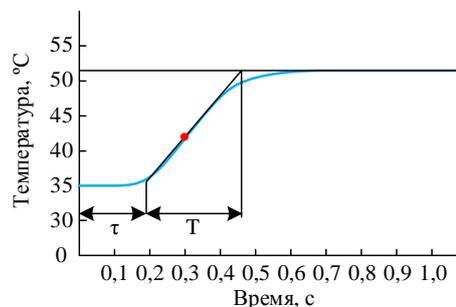


Рис. 4. Аппроксимация коэффициентов передаточной функции объекта управления

Представим ПФ объекта управления в виде

$$W(s) = \frac{0,68}{0,275s + 1} e^{-0,185s},$$

где  $s$  - оператор Лапласа.

Осуществим переход к замкнутой системе, добавив отрицательную обратную связь и синтезировав ПИД-регулятор. Структурная схема системы управления представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема системы управления

ПФ ПИД-регулятора запишем в виде [11]:

$$W_{\text{пер}}(s) = k_{\text{пер}} + \frac{1}{T_1 s} + T_2 s,$$

где  $k_{\text{пер}}$  - коэффициент усиления регулятора;  $T_1$  и  $T_2$  - постоянные времени интегрирующего и дифференцирующего звена.

После определения коэффициентов запишем ПФ ПИД-регулятора в виде:

$$W_{\text{пер}}(s) = 3,55 + \frac{1}{0,035s} + 0,39s.$$

График переходного процесса системы при температуре масла на входе 60 °С, представлен на рис. 6, при этом требуемая температура на выходе равна 40 °С.

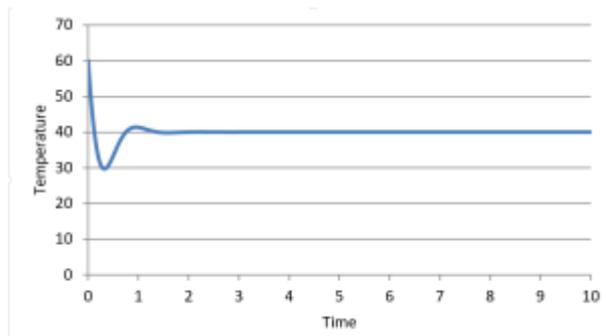


Рис. 6. График переходного процесса замкнутой системы

Изменим температуру масла на входе до 40 °С, а требуемую температуру до 25 °С график переходного процесса при данных значениях представлен на рис. 7.

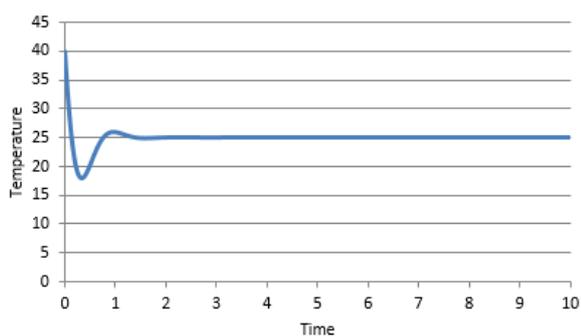


Рис. 7. График переходного процесса замкнутой системы при измененных значениях

Анализ переходных процессов показал, что система управления возвращает процесс к заданному значению температуры масла за время порядка 1,0 с.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель аппарата воздушного охлаждения масла с учетом принятых допущений. Определены начальные и граничные условия модели. Выявлены возмущающие воздействия присущие данному технологическому процессу. Осуществлен переход к дискретно-непрерывному виду модели. Проведено компьютерное моделирование, которое показало адекватность разработанной модели

технологическому процессу. Осуществлен синтез системы управления теплообменным процессом в АВОМ. Получены переходные процессы с учетом регулирования, которые показали эффективность синтезированной системы управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аранович Б.И., Лячек Ю.Т., Олейников В.А., Файнштейн А.А. Автоматическое управление газотурбинными установками. Л.: Недра, 1974. 216 с.
- [2] Хабибуллин И.И., Низамутдинов Р.М., Кадыров Р.Г., Николаенко И.В., Гуреев М.В., Тиунов С.В. Численное моделирование процессов теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Газовая промышленность. 2019. №2 (780). С.84-90.
- [3] Тиунов С.В., Скрыпник А.Н., Маршалова Г.С., Гуреев В.М., Попов И.А., Кадыров Р.Г., Чорный А.Д., Жукова Ю.В. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла // Энергетика. Изв. Высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. №2. С. 138-150.
- [4] Кузнецов В.А., Мигачева Л.А., Стариков А.В., Титов А.Р. Математическая модель процесса теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2012. №1 (26). С. 166-174.
- [5] Кузнецов В.А., Мигачев А.В., Стариков А.В., Титов А.Р. Особенности математической модели асинхронного электродвигателя аппаратов воздушного охлаждения масла // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Серия: Техн. науки. 2011. №3. С. 171-179.
- [6] Алимов С.В., Мигачева Л.А., Титов А.Р. Передаточные функции процесса теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Серия: Техн. науки. 2012. №4. С. 198-205.
- [7] Неволин А.М., Плотников П.Н. Повышение эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла газоперекачивающих агрегатов на базе газотурбинной установки ГТН-16 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2014. №4. С. 11-17.
- [8] Pyushin Y., Afanaseva O. Spatial Distributed Control System Of Temperature Field: Synthesis And Modeling. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2021, 16 (14), pp. 1491-1506
- [9] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Calculation of the First Switch-on Time of Distributed Object's Control Action. Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, 2020, pp. 750-754
- [10] Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1728 (1)
- [11] Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 196 с.