

Разработка системы управления аппаратом воздушного охлаждения масла в составе газоперекачивающего агрегата

И. М. Новожилов¹, С. Е. Абрамкин¹,
П. А. Мальцев^{2✉}, А. В. Плотников²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ maltcev-pave@mail.ru

Аннотация. Цель статьи – разработка системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения масла в составе газоперекачивающего агрегата.

В ходе исследований были решены следующие задачи: проведен анализ объекта исследования; осуществлен литературный обзор существующих исследований, посвященных данной тематике; разработана математическая модель системы, дополненная начальными и граничными условиями; проведено исследование тепломассообменных процессов, протекающих в аппарате; синтезирована система управления технологическим процессом охлаждения масла. Приводятся результаты моделирования в виде различных графиков. В заключении приводятся результаты моделирования, показавшие адекватность разработанной системы.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения масла, математическая модель, тепломассообмен, система управления

Для цитирования: Разработка системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения масла в составе газоперекачивающего агрегата / Новожилов И. М., Абрамкин С. Е., Мальцев П. А., Плотников А. В. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 2. С. 31–43. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-31-43.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development of a Control System for an Air Oil Cooler as a Part of a Gas Pumping Unit

I. M. Novozhilov¹, S. E. Abramkin¹,
P. A. Maltsev^{2✉}, A. V. Plotnikov²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ maltcev-pave@mail.ru

Abstract. The purpose of the article is the development of an automatic control system for an air-based oil cooler as part of a gas-pumping unit.

In the course of the work, the following tasks were solved: the object of study was analyzed; a literary review of existing studies on this topic was carried out; a mathematical model of the system was developed, supplemented with initial and boundary conditions; a study of heat and mass transfer processes occurring in the air coolers was carried out; the synthesis of a control system for the technological process of oil cooling was carried out. The simulation results are presented in the form of various graphs. At the end of the work, the results of modeling are presented, which showed the adequacy of the developed system.

Keywords: air-based oil cooler, mathematical model, heat and mass transfer, control system

For citation: Development of a Control System for an Air Oil Cooler as a Part of a Gas Pumping Unit / Novozhilov I. M., Abramkin S. E., Maltsev P. A., Plotnikov A. V. // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 31–43. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-31-43.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В настоящее время невозможно представить жизнь человека без различных углеводородов, в частности газа. Природный газ – это одним из основных источников энергии в жизни человека и, применительно к Российской Федерации, газовая отрасль – одна из важнейших с точки зрения формирования экономики страны.

Площадь нашей страны очень велика и транспортировка газа в отдаленные районы и за рубеж требует постоянного совершенствования используемых технологий для повышения их эффективности и снижения затрат. Важное место среди таких технологий занимает разработка систем управления:

– технологическими объектами, которые используются при транспортировке газа на всех ее этапах;

– технологическими процессами, характерными для данных объектов.

Основной способ транспортировки газа в нашей стране – это магистральные газопроводы, оборудованные компрессорными станциями. Основным технологическим элементом компрессорных станций служит газоперекачивающий агрегат (ГПА), который состоит из системы «двигатель–нагнетатель». Главная задача, решаемая ГПА, – это компримирование природного газа для его дальнейшего закачки в магистральный газопровод. Нормальная эксплуатация газоперекачивающих агрегатов в большей степени зависит от работоспособности вспомогательных систем, в частности маслосистемы и системы охлаждения и подогрева масла [1].

Для обеспечения правильной работы подшипников требуется поддерживать необходимые физические свойства масла, а именно его вязкость и температуру. Это обусловлено тем, что при длительных остановках турбины масло значительно охлаждается и, следовательно, его вязкость увеличивается. Для повышения текучести, перед пусками его подогревают в маслобаках. Но при этом уже было отмечено, что масло не только смазывает детали, но и отводит избыток тепла в ходе технологических процессов. Это значит, что масло требуется охлаждать, так как выделение тепла от деталей может быть достаточно большим и приводить к нарушениям рабо-

ты всего агрегата либо к выходу из строя отдельных элементов.

В данной статье описан процесс разработки системы управления технологическим процессом охлаждения масла, характерным для аппаратов воздушного охлаждения (АВО). Проведено исследование разработанной математической модели АВО масла (АВОМ), на основании которой разрабатывалась система управления.

Существующие исследования. Разработка аппаратов воздушного охлаждения масла актуальна для всей нефтегазовой отрасли, так как они повсеместно используются на многих объектах нефтяной и газовой промышленности. Разработка систем управления аппаратами не проста, мало изучена и требует проведения более детальных исследований.

Существующие исследования описывают в первую очередь маслоохладители как технологические объекты, а также их структурный состав, приводя некоторые рекомендации выбора составных элементов. В [2] приводится обзор литературных источников, направленных на повышение эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла. Авторы утверждают, что, несмотря на большое количество научных публикаций по данной тематике, многие эксплуатационные вопросы изучены недостаточно, что делает актуальными их дальнейшие исследования.

В [3] рассматривается проблема эффективного использования АВО в промышленности. При этом описывается влияние материала и видов ребер теплообменных трубок на функционирование аппарата. Приводятся результаты исследования при так называемом сухом и воздушно-водоиспарительном охлаждении. В выводах авторы заключают, что использование АВО в промышленности экономически эффективно, а также отмечают, что при эксплуатации охладителей в условиях жарких климатических зон необходимо прибегать к воздушно-водоиспарительному способу охлаждения.

Исследование [4] отличается от вышеописанного тем, что авторы оценивают энергоэффективность различных типов АВО, приводят результаты расчетов. В заключение они делают вывод, что выбор метода управления вентиляторами зависит от их количества.

В [5] описан процесс численного моделирования теплообменных процессов в АВОМ. Авторы при использовании экспериментальных данных предложили метод сокращения времени численного моделирования, а также привели ряд рекомендаций по повышению эффективности функционирования аппарата.

В [6] приводится описание исследования, направленного на изучение способов уменьшения вибраций на аппарат воздушного охлаждения. Авторы иллюстрируют результаты динамического испытания модифицированного аппарата, в котором реализовано внедрение балочных и оболочечных элементов базовой конструкции.

В [7] приводятся результаты численного и экспериментального исследований АВОМ газотурбинной установки. Экспериментальное исследование проводилось на технологическом объекте магистрального газопровода. Авторы утверждают, что результаты численного моделирования достаточно точно совпадают с экспериментальными данными. По результатам моделирования были выявлены недостатки аппарата и с помощью внедрения направляющего устройства предложена модернизация АВОМ, что значительно повысило эффективность работы системы охлаждения.

Значительная часть исследований посвящена системам управления технологическим процессом охлаждения масла, характерным для АВОМ, данные системы базируются на применении методов теории автоматического управления.

В [8] приводится подробное описание процесса моделирования аппарата воздушного охлаждения и разработки системы автоматического управления для технологического процесса. Отличительной особенностью данной модели служит применение компенсирующего контура.

Разрабатываются различные комбинированные системы управления [9], направленные на определение эффективного способа управления определенным типом АВОМ. Адаптивная система, предложенная в [10], должна обеспечивать перерасчет коэффициентов регулятора в связи с изменением условий эксплуатации аппарата.

Несмотря на то, что существует значительное количество предложенных систем управления аппаратами воздушного охлаждения масла, в данный момент оптимальной системы, решающей все проблемы эффективной эксплуатации данного технологического объекта, не было выявлено, с чем согласны и авторы статьи [11].

Постановка задачи. На основании вышеприведенного анализа существующих исследований в рамках данной статьи была заявлена необходимость:

- исследовать разработанную математическую модель АВОМ;
- синтезировать систему управления характерным технологическим процессом;
- проанализировать качество разработанной системы.

Анализ объекта исследования. Как уже отмечалось, правильное функционирование газоперекачивающих агрегатов (ГПА) во многом зависит от работоспособности вспомогательных систем. Особое внимание стоит уделить именно маслосистеме ГПА, которая выполняет следующие основные функции:

- уплотнение подшипников нагнетателя;
- охлаждение элементов, омываемых маслом.

Маслосистема газоперекачивающего агрегата функционирует следующим образом [12]: включается основной насос в маслобаке, который обеспечивает подачу теплоносителя в нагнетательные линии маслосистемы. По нагнетательным линиям масло поступает в блок охладителей, где аппараты воздушного охлаждения масла (АВОМ) обеспечивают регулирование температуры. С блока охладителей масло поступает на фильтры, обеспечивающие очистку от механических примесей; с фильтров оно поступает на соединительные элементы и подшипники ГПА, откуда сливается обратно в бак. При этом, если масло контактировало с газом, то оно дополнительно проходит через блок газоотделителей, прежде чем попасть обратно в маслобак. Таким образом осуществляется замкнутый цикл работы системы маслоснабжения ГПА.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что температура масла – это основной параметр маслосистемы ГПА, а значит, исследование процессов теплообмена в АВОМ особенно актуально. Для этого необходимо более подробно рассмотреть объект исследования, которым является аппарат воздушного охлаждения масла.

Рассмотрим схематическое изображение АВОМ, представленное на рис. 1: цифрами обозначены: 1 – трубопровод, входной и выходной; 2 – нагревательный элемент; 3 – опорные конструкции аппарата; 4 – теплообменные секции; 5 – диффузоры вентиляторов охлаждения; 6 – осевые вентиляторы охлаждения; 7 – жалюзийные механизмы.

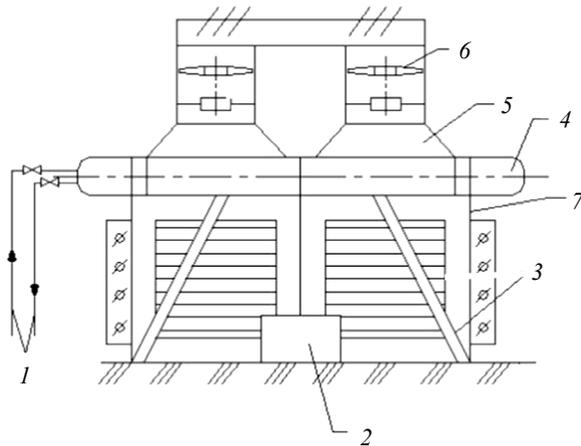


Рис. 1. Внешний вид АВОМ
 Fig. 1. Appearance air-cooler

Если анализировать работу АВОМ, то можно прийти к выводу, что в основе функционирования данного технологического объекта лежат теплообменные процессы, протекающие в теплообменных секциях аппарата, при этом излишнее тепло передается от масла к окружающей среде. В ходе данного процесса последовательно осуществляются две операции теплообмена. Первая возникает между теплоносителем и стенками трубок теплообменной секции – излишнее тепло передается трубкам. А трубки в свою очередь охлаждаются потоками холодного воздуха, нагнетаемого вентиляторами охлаждения – так протекает вторая операция теплообмена. Для исследования теплообменных процессов, характерных для данного аппарата, требуется разработать математическую модель объекта исследования.

Разработка математической модели. ММ отражает некоторые существенные свойства объекта исследования – в нашем случае это теплообменный процесс, который протекает в АВОМ. При этом в реальном процессе могут присутствовать определенные факторы, учесть которые не представляется возможным, либо их учет значительно усложнит математическую модель (и процесс моделирования в целом). Поэтому в практике моделирования широко используется принятие определенных допущений, которые позволяют определить некоторые свойства системы в начале разработки математической модели.

В ходе разработки математической модели (ММ) АВОМ были приняты следующие допущения [13]:

1. Масло несжимаемо, т. е. плотность теплоносителя не изменяется.
2. Значение температуры не влияет на теплофизические свойства масла и материала трубок, т. е. не изменяются их теплофизические коэффициенты.

3. Внутренний источник тепла в потоке масла отсутствует.

4. Поток теплоносителя имеет ламинарный характер, т. е. перемешивание потока пренебрежимо мало.

5. Скорость движения теплоносителя по трубкам теплообменной секции – величина постоянная.

6. Температура масла и стенок трубок не зависит от полярного угла, т. е. наблюдается осевая симметрия в системе.

7. Поток тепла, возникающий вследствие конвекции при движении масла вдоль оси x , много больше, чем поток тепла вдоль трубы, обусловленный теплопроводностью масла.

8. Различие температур в сечении трубки незначительно влияет на технологический процесс охлаждения масла.

В основе теплообменных процессов, протекающих в аппаратах воздушного охлаждения масла, лежит физическое явление теплопередачи, причем для АВОМ характерен способ теплопроводности, при котором тепловая энергия передается от более нагретого участка тела к менее нагретому вследствие хаотичного движения частиц тела. Поэтому в основе ММ маслоохладителя рассматривается уравнение теплопроводности, в классическом виде для декартовой системы координат (с 3 пространственными координатами) – его можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где α – коэффициент температуропроводности.

Исходя из рассмотренного описания АВОМ, мы знаем, что теплообменные секции аппарата выполнены из большого количества оребренных трубок внутренним и внешним радиусами r_1 и r_2 . На основании этого факта разрабатывать математическую модель целесообразно в цилиндрической системе координат. Для стенок характерен процесс теплообмена с окружающим воздухом, описываемый также уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат.

Таким образом, запишем ММ теплообменного процесса в АВОМ в следующем виде [1]:

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

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

где $\theta_{ст}$, θ_m – температуры масла и стенки; $\alpha_m = \lambda_m / (c_m \gamma_m)$ и $\alpha_{ст} = \lambda_{ст} / (c_{ст} \gamma_{ст})$ – коэффициенты температуропроводности масла и материала трубки (λ_m , $\lambda_{ст}$ – теплопроводности масла и материала трубки теплообменной секции; c_m , $c_{ст}$ – удельные теплоемкости масла и материала трубки теплообменной секции); γ_m , $\gamma_{ст}$ – плотности масла и материала трубки теплообменной секции; r – радиус трубки теплообменной секции; v – скорость движения потока теплоносителя.

Уравнение (1) характерно для теплообменных процессов между маслом и внутренними стенками трубок и применимо при $0 < r < r_1$, $x > 0$, а уравнение (2) – для теплообменных процессов между внешними стенками трубок и окружающим воздухом при $r_1 < r < r_2$, $x > 0$.

Для данной системы примем, что температура поверхности трубок теплообменных секций в каждый момент времени равна температуре воздуха окружающей среды. Таким образом для трубок характерно граничное условие 1-го рода следующего вида:

$$\theta_{ст}(x, r_2, t) = \theta_B, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad t \geq 0,$$

где x – координата по оси x ; L_x – длина теплообменной трубки; t – координата времени; θ_B – температура окружающего воздуха.

Согласно теплофизическим свойствам различных материалов, можно сделать вывод, что коэффициент теплопроводности материала трубки теплообменных секций АВОМ много больше коэффициента теплопроводности масла [14], протекающего по этим трубкам, поэтому материал трубки может рассматриваться как идеальный охладитель, температура поверхности которого будет равна температуре окружающей среды в каждый момент времени. Данный факт позволяет нам не учитывать в ММ уравнение (2).

Принимая во внимание допущение 7 для разрабатываемой ММ, которое позволяет из (1) исключить вторую производную по переменной x – составляющую передачи внутренней энергии методом теплопроводности, а также допущение 5 вместо (1) получим следующий вид уравнения теплообмена в АВОМ:

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

Для (3) справедливы следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \theta_m(x, r_1, t) &= \theta_B, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad t \geq 0; \\ \frac{\partial \theta_m(x, 0, t)}{\partial r} &= 0, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad t \geq 0; \\ \theta_m(0, r, t) &= \theta_{вх}, \quad 0 \leq x \leq L_r, \quad t \geq 0, \end{aligned}$$

где $\theta_{вх}$ – температура масла на входе в АВОМ; L_r – радиус трубки теплообменной секции.

Начальные условия (при $t = 0$) для ММ:

$$\theta_m(x, r, 0) = \theta_{вх}.$$

Для осуществления компьютерного моделирования представим ММ теплообменного процесса в АВОМ в дискретно-непрерывном виде. Решая (3) методом конечных разностей, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{Mi,j,k} - \theta_{Mi,j,k-1}}{\Delta t} &= \alpha_m \times \\ &\times \left(\frac{\theta_{Mi,j-1,k-1} - 2\theta_{Mi,j,k-1} + \theta_{Mi,j+1,k-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta r j} \frac{\theta_{Mi,j,k-1} - \theta_{Mi,j-1,k-1}}{\Delta r} \right) - \\ &- v \frac{\theta_{Mi,j,k-1} - \theta_{Mi-1,j,k-1}}{\Delta x}, \end{aligned}$$

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

Выразим температуру в текущей точке в текущий момент времени:

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

Представим граничные условия для ММ в конечно-разностном виде:

$$\begin{aligned} \theta_m(i, N_r - 1, k) &= \theta_B, \quad 0 < i < N_x, \quad k > 0; \\ \theta_m(i, 0, k) &= \theta_m(i, 1, k), \quad 0 < i < N_x, \quad k > 0; \\ \theta_m(0, j, k) &= \theta_{вх}, \quad 0 < j < N_r, \quad k > 0. \end{aligned}$$

Конечно-разностное уравнение теплообмена, протекающего в АВОМ, вместе с начальными и граничными условиями будем реализовывать на ЭВМ по алгоритму, представленному на рис. 2.

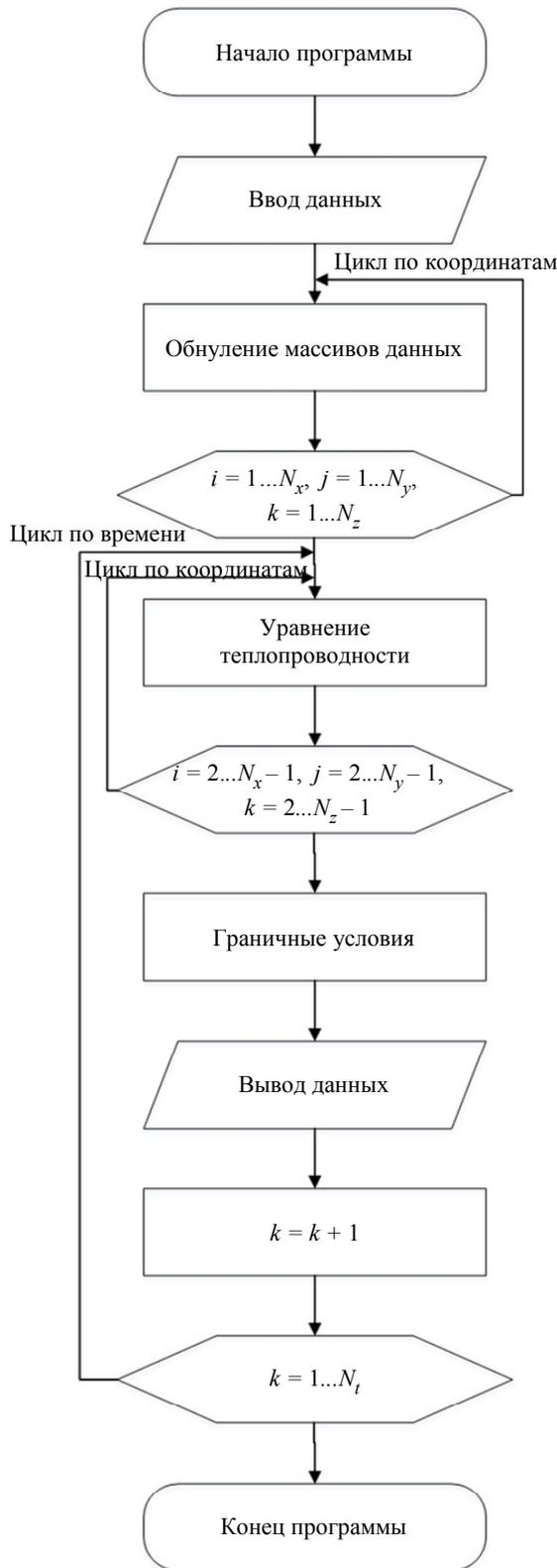


Рис. 2. Схема алгоритма реализации уравнения на ЭВМ

Fig. 2. Scheme of the algorithm for implementing the equation on a computer

Для реализации моделирования теплообменных процессов была написана программа на ЭВМ в среде программирования Rad Studio: C++ Builder. Ниже представлен фрагмент кода, реализующий подсчет температуры в точке выхода из АВОМ и построение графика переходного процесса.

```

//расчеты
//-----
for (int k=0; k < t_end; k++) { //k - time; i - по
x; j - по y; p-по z
    for (int i = 1; i < Nx; i++) {
        for (int j = 1; j < (Nr-1); j++) {
            dT[i][j]=dt*(a*((T[i][j-1]-
2*T[i][j]+T[i][j+1))/(dr*dr)+1/(dr*j)*
((T[i][j]-T[i][j-1])/dr))-v*((T[i][j]-T[i-
1][j])/dx));
        }
    }
    time = k * dt;
    for (int i = 1; i < Nx; i++) {
        for (int j = 1; j < (Nr-1); j++) {
            // подсчет текущего значения
            T[i][j] = T[i][j] + dT[i][j];
            // учет грани с теплоизоляцией
            T[i][0] = T[i][1]; // нулевой радиус трубки
        }
    }
//-----
//построение графика переходного процесса
//-----
    Series1->AddXY(time, T[9][0]); // график
на выходе из АВОМ
}
    
```

Исследование теплообменных процессов АВОМ. В технологическом процессе охлаждения масла, протекающем в аппарате воздушного охлаждения, можно выделить следующие параметры, воздействующие на систему [1]:

- изменение количества охлаждающего агента, которое нагнетается вентиляторами охлаждения в теплообменную секцию АВОМ, в случае изменения частоты вращения электропривода вентилятора;
- температура воздуха окружающей среды;
- изменение температуры масла, которое поступает в трубки теплообменных секций маслоохладителя.

Указанные воздействия в разной степени влияют на функционирование всей системы, в част-

ности на теплообменный процесс, протекающий в теплообменных секциях АВОМ. В данной публикации рассматривается влияние на систему температуры окружающей среды и масла на входе в АВОМ. Исходя из этого определяем, что объект исследования многомерный и имеет два входных и один выходной параметр. При этом определим следующее:

- возмущающим воздействием для системы будет температура окружающей среды;
- управляющим воздействием станет температура масла на входе в АВОМ.

Для изучения свойств системы необходимо поочередно фиксировать значения на одном из каналов и изменять значение на другом, исследуя динамику переходных процессов.

Ниже представлены графики переходных процессов системы по каналу управления (рис. 3) и возмущения (рис. 4).

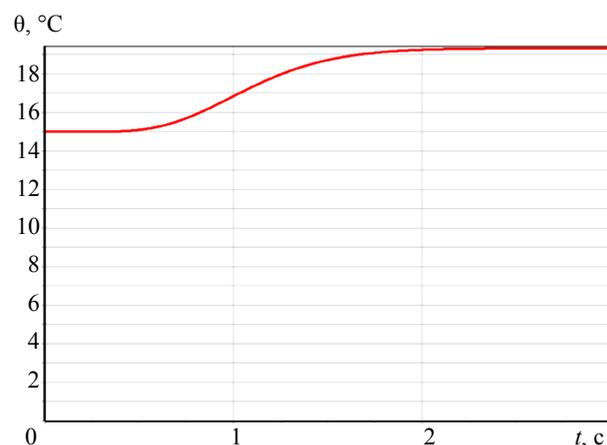


Рис. 3. График переходного процесса при температурах масла 60 °С и окружающей среды 15 °С

Fig. 3. Graph of the transient process at an oil temperature of 60 °C, an ambient temperature of 15 °C

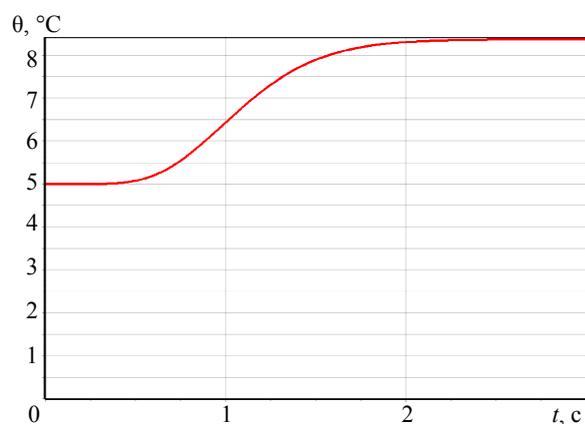


Рис. 4. График переходного процесса при температурах окружающей среды 5 °С и масла 40 °С

Fig. 4. Graph of the transient process at an ambient temperature of 5 °C, an oil temperature of 40 °C

При анализе графиков по обоим каналам получились схожие результаты – графики носят монотонно-возрастающий характер. Время установления переходных процессов находится в диапазоне 1.5...2 с. Также по графикам видно, что при подаче возмущающего (либо управляющего) воздействия система не обеспечивает требуемое значение температуры масла на выходе из АВОМ, а устанавливается в новом значении. На основании этого можно сделать вывод о необходимости разработки системы автоматического регулирования, которая будет обеспечивать заданное значение температуры масла на выходе из АВОМ.

Для осуществления синтеза системы управления технологическим процессом охлаждения масла в АВОМ необходимо получить передаточную функцию (ПФ) объекта управления, для этого определим ПФ по обоим каналам системы.

Анализ переходных процессов разомкнутой системы показывает, что в данном случае ПФ объекта управления по каналу возмущения и по каналу управления может быть представлена апериодическим звеном 1-го порядка с запаздыванием, которое можно представить в виде

$$W(s) = \frac{a}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

где a – коэффициент усиления объекта; T – постоянная времени объекта; τ – время запаздывания объекта; s – оператор Лапласа.

Основываясь на методе графической аппроксимации передаточных функций, определим численные значения постоянной времени объекта T и времени запаздывания объекта τ по переходному процессу на рис. 5.

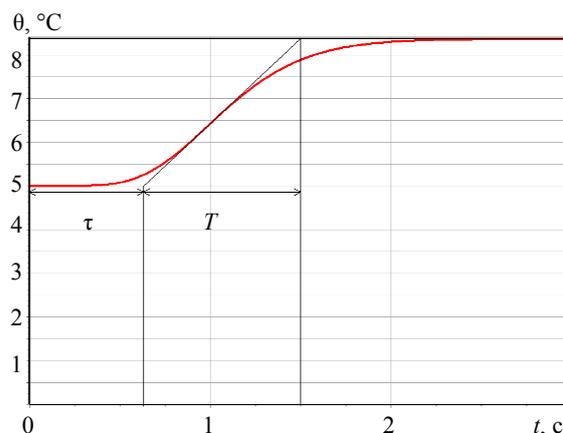


Рис. 5. Аппроксимация коэффициентов передаточной функции объекта управления по каналу возмущения

Fig. 5. Approximation of the coefficients of the transfer function of the control object by the perturbation channel

В ходе аппроксимации данных коэффициентов было установлено, что для обоих каналов они будут иметь одинаковые значения. При этом коэффициент усиления определялся как отношение приращений установившегося (выходного) значения исследуемой величины к ее входному значению [15], [16].

Получены следующие значения коэффициентов: $T = 0.85$ и $\tau = 0.65$.

ПФ по каналу возмущения:

$$W(s) = \frac{0.9}{0.85s + 1} e^{-0.65s}.$$

ПФ по каналу управления:

$$W(s) = \frac{0.096}{0.85s + 1} e^{-0.65s}.$$

ПФ объекта исследования состоит из последовательного соединения ПФ по каналу управления и каналу возмущения, т. е. она примет вид двух последовательно соединенных апериодических звена 1-го порядка с запаздыванием:

$$W(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1} e^{-\tau_1s} \frac{k_2}{T_2s + 1} e^{-\tau_2s}, \quad (4)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты усиления объекта по каналам возмущения и управления; T_1, T_2 – постоянные времени объекта по каналам возмущения и управления; τ_1, τ_2 – времена запаздывания по каналам возмущения и управления.

Так как при расчетах коэффициентов ПФ по каналам управления и возмущения мы определили, что коэффициенты постоянной времени и времени запаздывания по каналам равны, т. е. $T_1 = T_2, \tau_1 = \tau_2$, то (4) примет следующий вид:

$$W(s) = \frac{k_1 k_2}{(Ts + 1)^2} e^{-2\tau s}. \quad (5)$$

Раскрывая скобки и подставляя вычисленные и аппроксимированные значения коэффициентов в (5), получим конечный вид ПФ аппарата воздушного охлаждения масла:

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{0.9 \cdot 0.096}{0.85^2 s^2 + 2 \cdot 0.85s + 1} e^{-2 \cdot 0.65s} = \\ &= \frac{0.0864}{0.7225s^2 + 1.7s + 1} e^{-1.3s}. \end{aligned}$$

Добавим в систему отрицательную обратную связь, таким образом перейдя к замкнутой системе, для которой будут синтезированы регуляторы [17]. Структурная схема системы управления представлена на рис. 6, где Р – регулятор; $u(t)$ – управляющее воздействие; $\varepsilon(t)$ – ошибка рассогласования; $\theta_{\text{зад}}$ – требуемая температура на выходе из АВОМ; $\theta_{\text{вых}}$ – текущая температура выхода из АВОМ.

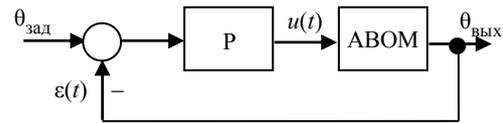


Рис. 6. Структурная схема системы управления

Fig. 6. Structural diagram of the control system

Синтез регулятора осуществлялся частотным методом, известным по курсу теории автоматического управления (ТАУ).

Из курса ТАУ мы знаем, что ПФ ПИ- и ПИД-регуляторов имеют следующий вид [18]:

$$W_{\text{ПИ}}(s) = k_{\text{рег(ПИ)}} + \frac{1}{T_{\text{и(ПИ)}}s};$$

$$W(s)_{\text{ПИД}} = k_{\text{рег(ПИД)}} + \frac{1}{T_{\text{и(ПИД)}}s} + T_{\text{д}}s.$$

По частотным характеристикам системы была определена частота среза, которая использовалась для нахождения коэффициентов регулятора. В результате были получены следующие значения:

$$k_{\text{об(ПИД)}} = 0.0519;$$

$$k_{\text{об(ПИ)}} = 0.0792.$$

Далее определим коэффициент усиления регулятора по формуле

$$k_{\text{рег}} = \frac{1}{k_{\text{об}}}.$$

Для ПИД-регулятора получим

$$k_{\text{рег(ПИД)}} = \frac{1}{k_{\text{об(ПИД)}}} = \frac{1}{0.0519} = 19.268;$$

для ПИ-регулятора –

$$k_{\text{рег(ПИ)}} = \frac{1}{k_{\text{об(ПИ)}}} = \frac{1}{0.0792} = 12.626.$$

Следующим шагом необходимо рассчитать постоянные времени для интегрирующей и дифференцирующей составляющих по формулам

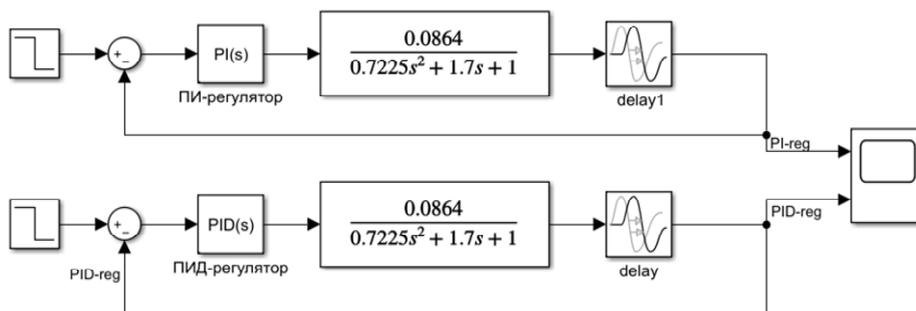


Рис. 7. Структурная схема замкнутой системы в Simulink

Fig. 7. Closed-loop system block diagram in Simulink

$$T_{и} = \frac{1}{k_{рег} \omega_{ср}};$$

$$T_{д} = \frac{k_{рег}}{\omega_{ср}}.$$

Для ПИ-регулятора необходима только постоянная времени для интегрирующей составляющей. Вычисляя ее значение, получим

$$T_{и(ПИ)} = \frac{1}{k_{рег(ПИ)} \omega_{ср(ПИ)}} = \frac{1}{12.626 \cdot 0.355} = 0.22.$$

В свою очередь, для ПИД-регулятора необходимо рассчитать обе постоянные. В результате получим

$$T_{и(ПИД)} = \frac{1}{k_{рег(ПИД)} \omega_{ср(ПИД)}} =$$

$$= \frac{1}{19.268 \cdot 0.96} = 0.05;$$

$$T_{д} = \frac{k_{рег(ПИД)}}{\omega_{ср(ПИД)}} = \frac{19.268}{0.96} = 20.07.$$

Подставляя значения коэффициентов (рассчитанные по классическим формулам из курса ТАУ) в уравнения ПФ регуляторов получим их представление:

$$W_{ПИ}(s) = 12.626 + \frac{1}{0.22s};$$

$$W(s)_{ПИД} = 19.268 + \frac{1}{0.05s} + 20.07s. \quad (6)$$

Реализуем моделирование замкнутой системы в пакете MatLab Simulink [16]. Соберем схему замкнутой системы, представленную на рис. 7.

На вход системы подается ступенчатое воздействие, реализующее процесс изменения заданной температуры.

В блоки регуляторов подставим значения, рассчитанные в (6), и получим графики переходных процессов, представленные на рис. 8:

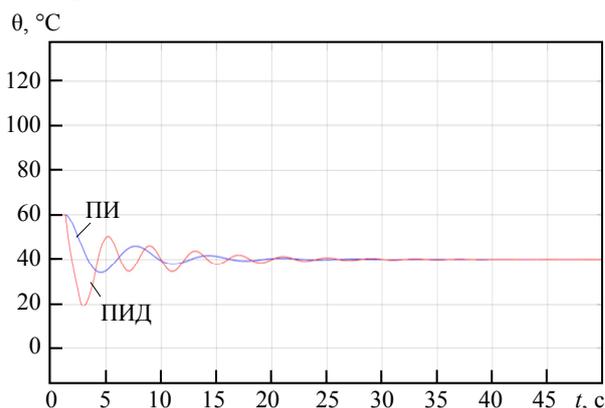


Рис. 8. Графики переходных процессов замкнутой системы

Fig. 8. Closed-loop transient plots

Проанализировав графики можно определить время установления переходного процесса ПИ-регулятора порядка 15.4 с, ПИД-регулятор порядка 21.4 с.

Определим перерегулирование переходных процессов по формуле [19]

$$\sigma = \frac{|y_{\max 1} - y(\infty)|}{y(\infty)} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где $y_{\max 1}$ – первое максимальное отклонение управляемой переменной; $y(\infty)$ – установившееся значение управляемой переменной.

Вследствие того, что графики переходных процессов исследуемой системы начинаются не с нулевого, а с некоторого установленного значения, то параметры $y_{\max 1}$, $y(\infty)$ будут определяться следующим образом:

$$y_{\max 1} = (y_0 - y_{m1});$$

$$y(\infty) = (y_0 - y_{уст}), \quad (8)$$

где y_0 – начальное значение управляемой величины; y_{m1} – первое максимальное отклонение управляемой величины; $y_{уст}$ – установившееся значение управляемой величины.

• Перерегулирование для ПИ-регулятора. Определим начальные данные для расчета перерегулирования: $y_0 = 60$; $y_{m1} = 34,2$; $y_{уст} = 40$.

Подставляя выражения (8) в формулу (7) и используя начальные данные, получим значение перерегулирования:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{y_{\max 1} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 \% = \\ &= \frac{(y_0 - y_{m1}) - (y_0 - y_{уст})}{(y_0 - y_{уст})} \cdot 100 \% = \\ &= \frac{|(60 - 34,2) - (60 - 40)|}{60 - 40} \cdot 100 \% = 29 \%\end{aligned}$$

• Перерегулирование для ПИД-регулятора. Начальные данные для расчета перерегулирования: $y_0 = 60$; $y_{m1} = 20,7$; $y_{уст} = 40$.

По аналогии с ПИ-регулятором получим значение перерегулирования для ПИД-регулятора:

$$\sigma = \frac{|(60 - 20,7) - (60 - 40)|}{60 - 40} \cdot 100 \% = 96,5 \%$$

Анализируя качество переходных процессов, можно прийти к выводу, что рассчитанные значения коэффициентов регуляторов неоптимальны и данные регуляторы не обеспечивают требуемого качества переходных процессов. В связи с этим необходимо провести ручную донастройку регуляторов для получения приемлемой по качеству системы управления.

В результате настройки регуляторов были получены следующие ПФ регуляторов:

$$\begin{aligned}W_{\text{ПИ}}(s) &= 3.61 + 1/0.35s; \\ W(s)_{\text{ПИД}} &= 11.82 + 1/0.2s + 4.43s.\end{aligned}$$

Промоделировав замкнутую систему с новыми значениями коэффициентов для регуляторов имеем графики переходных процессов (рис. 9).

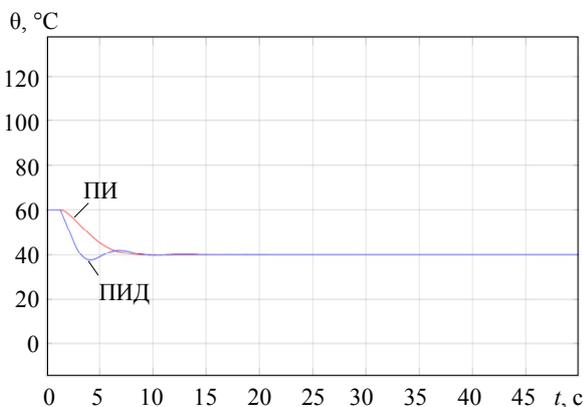


Рис. 9. Графики переходных процессов замкнутой системы

Fig. 9. Closed-loop transient plots

Проанализируем качество систем управления с уточненными коэффициентами регуляторов.

– время установления переходного процесса ПИ-регулятора – порядка 7.2 с, ПИД-регулятора – порядка 8.3 с;

– перерегулирование для ПИ-регулятора отсутствует.

Для ПИД-регулятора:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{y_{\max 1} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 \% = \\ &= \frac{|(60 - 37,7) - (60 - 40)|}{60 - 40} \cdot 100 \% = 11,5 \%\end{aligned}$$

Как мы видим, качество переходных процессов значительно улучшилось, что свидетельствует о правильности настройки значений регуляторов.

Обсуждение. В рамках данной статьи авторы продемонстрировали поэтапный процесс исследования аппарата воздушного охлаждения масла. Аналитическим способом была получена математическая модель объекта исследования, которая стала основой для разработки программы, написанной на ЭВМ, которая позволила провести компьютерное моделирование теплообменных процессов, характерных для АВОМ, с различными начальными условиями. В результате проведенного анализа была определена необходимость разработки системы автоматического регулирования по температуре масла на выходе из аппарата. При синтезе системы управления применялся частотный метод определения параметров регулятора, причем данные параметры уточнялись ручным способом, что позволило определить значения параметров регулятора, обеспечивающие качественные переходные процессы.

Проведя сравнение между синтезированными регуляторами (ПИ и ПИД) для исследуемой системы, можно сделать ряд заключений:

– время установления выходного значения переходного процесса можно считать приемлемым для каждого регулятора, при этом у ПИ-регулятора оно незначительно лучше (7.2 с у ПИ против 8.3 с у ПИД);

– ПИД-регулятор, в отличие от ПИ- (график переходного процесса имеет монотонно убывает), имеет перерегулирование.

Данные факты указывают на то, что для разработанной системы стоит сделать выбор в пользу ПИ-регулятора, который обеспечивает благоприятное качество переходного процесса замкнутой системы и его быстродействие.

Заключение. В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

– аналитическим способом была получена математическая модель аппарата воздушного охлаждения масла, которая стала основой для разработки системы управления. В дальнейших исследованиях планируется уточнение данной модели с помощью экспериментальных данных, полученных с реальных технологических объектов;

– разработана система управления технологическим процессом охлаждения масла в аппарате воздушного охлаждения, анализ качества переходных процессов данной системы показал ее адекватность.

В дальнейших исследованиях планируется разработка рабочего макета для проведения детальных исследований, направленных на получение адаптивного регулятора, способного корректно обрабатывать в различных условиях и режимах эксплуатации аппарата воздушного охлаждения масла.

Список литературы

1. Мальцев П. А., Шатилова Н. А., Абрамкин С. Е. Исследование процесса охлаждения масла в системе маслоснабжения газотурбинного двигателя // Сб. докл. Междунар. конф. «Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 33–36.
2. Аппараты воздушного охлаждения масла для компрессорных установок. Повышение эффективности / Р. Г. Кадыров, И. И. Хабибуллин, Р. М. Низамитдинов, Ю. А. Паранин // Компрессорная техника и пневматика. 2019. № 1. С. 35–42.
3. Эффективность использования аппаратов воздушного охлаждения / Х. И. Халисмаев, Ш. К. Агзамов, Т. Х. Наубеев, Ж. Ш. Агзамов, И. Я. Сапашов, Д. Х. Абдикамалов // Intern. Sci. and Pract. Conf. World Sci. 2016. Т. 1, № 3 (7). С. 47–52.
4. Крупников А. В., Ваняшов А. Д., Январев И. А. Определение энергоэффективности установок воздушного охлаждения на базе аппаратов с различным числом вентиляторов // Омский науч. вестн. 2010. № 3 (93). С. 173–176.
5. Хабибуллин И. И., Низамутдинов Р. М., Кадыров Р. Г. Численное моделирование процессов теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла // Газовая промышленность. 2019. № 2 (780). С. 84–90.
6. Ramakrishna K., Narsireddy K., Narasimhamurthy Y. V. L. Dynamic analysis of oil cooler structure for improved vibro-acoustic performance // 23rd Conf. and Exposition on Structural Dynamics 2005, IMAC-XXIII. Orlando, Florida, USA, 2005. P. 2502–2509. URL: <http://toc.proceedings.com/00101webtoc.pdf> (дата обращения 12.11.2022).
7. Неволин А. М., Плотников П. Н. Повышение эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла газоперекачивающих агрегатов на базе газотурбинной установки ГТН-16 // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Энергетика. 2014. № 4 (14). С. 11–17.
8. Данилушкин И. А., Россеев И. Н. Синтез системы автоматического управления температурным полем трубчатого теплообменника // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. 2006. № 40. С. 5–11.
9. Январев И. А. Комбинированный способ регулирования температурных режимов модульной установки воздушного охлаждения газа // Омский науч. вестн. 2014. № 2 (130). С. 161–165.
10. Артюхов И. И., Тарисов Р. Ш., Молот С. В. Адаптивная система стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестн. Саратовского гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (77) (4). С. 112–117.
11. Егоров М. А., Сулейманов И. Н. Расчет передаточных функций аппаратов воздушного охлаждения масла // Научный аспект. 2020. № 2 (17). С. 2254–2260.
12. Мальцев П. А. Разработка концептуальной модели аппарата воздушного охлаждения масла в составе газоперекачивающего агрегата. СПб.: ООО «Медиапапир», 2022. С. 179–182.
13. Математическая модель процесса теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла / В. А. Кузнецов, Л. А. Мигачева, А. В. Стариков, А. Р. Титов // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. 2012. № 1 (26). С. 166–174.
14. Бухмиров В. В., Ракутина Д. В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина. Иваново, 2017. 120 с.
15. Ильюшин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: дис. ... канд. техн. наук. Пятигорск, 2012. 170 с.
16. Моделирование релейно-импульсных распределенных систем / А. Б. Чернышев, В. Ф. Антонов, Ю. В. Ильюшин, В. Ф. Антонов, Ю. В. Ильюшин; Пятигорский гос. гуманитарно-технол. ун-т. Пятигорск, 2012. 247 с.
17. Afanaseva O., Ilyushin Yu. Analysis and synthesis of distributed icedrill heating control system of mountain reconnaissance drilling rig // 18th Intern. Multidisc. Sci. GeoConf. SGEM. Albena, Bulgaria: ООО «СТЕФ92 Технолоджи», 2018. P. 41–48.
18. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / С. Е. Душин., Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев, Н. Н. Кузьмин, В. Б. Яковлев; под ред. В. Б. Яковлева. М.: Высш. шк., 2003. 567 с.
19. Дядик В. Ф., Байдали С. А., Криницын Н. С. Теория автоматического управления. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. 196 с.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

Абрамкин Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: seabramkin@etu.ru

Мальцев Павел Александрович – студент Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, Васильевский остров, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: maltcev-pave@mail.ru

Плотников Артем Викторович – заведующий лабораторией системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета. 21-я линия, д. 2, Васильевский остров, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: arpvitarlaeda@gmail.com

References

1. Mal'cev P. A., Shatilova N. A., Abramkin S. E. Issledovanie processa ohlazhdenija masla v sisteme maslosnabzhenija gazoturbinnogo dvigatelja // Sb. dokl. Mezhdunar. konf. «Proektirovanie i obespechenie kachestva informacionnyh processov i system». SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LjETI», 2022. S. 33–36. (In Russ.).
2. Apparaty vozdušnogo ohlazhdenija masla dlja kompressornyh ustanovok. Povyshenie jeffektivnosti / R. G. Kadyrov, I. I. Habibullin, R. M. Nizamitdinov, Ju. A. Parandin // Kompjutorsnaja tehnika i pnevmatika. 2019. № 1. S. 35–42. (In Russ.).
3. Jeffektivnost' ispol'zovanija apparatov vozdušnogo ohlazhdenija / H. I. Halismatov, Sh. K. Agzamov, T. H. Naubeev, Zh. Sh. Agzamov, I. Ja. Sapashov, D. H. Abdikamalov // Intern. Sci. and Pract. Conf. World Sci. 2016. T. 1, № 3 (7). S. 47–52. (In Russ.).
4. Krupnikov A. V., Vanjashov A. D., Janvarev I. A. Opredelenie jenergojeffektivnosti ustanovok vozdušnogo ohlazhdenija na baze apparatov s razlichnym chislom ventiljatorov // Omskij nauch. vestn. 2010. № 3 (93). S. 173–176. (In Russ.).
5. Habibullin I. I., Nizamutdinov R. M., Kadyrov R. G. Chislennoe modelirovanie processov teploobmena v apparate vozdušnogo ohlazhdenija masla // Gazovaja promyshlennost'. 2019. № 2 (780). S. 84–90. (In Russ.).
6. Ramakrishna K., Narsireddy K., Narasimhamurthy Y. V. L. Dynamic analysis of oil cooler structure for improved vibro-acoustic performance // 23rd Conf. and Exposition on Structural Dynamics 2005, IMAC-XXIII. Orlando, Florida, USA, 2005. P. 2502–2509. URL: <http://toc.proceedings.com/00101webtoc.pdf> (data obrashheniya 12.11.2022).
7. Nevolin A. M., Plotnikov P. N. Povyshenie jeffektivnosti raboty apparatov vozdušnogo ohlazhdenija masla gazoperekachivajushhih agregatov na baze gazoturbinnnoj ustanovki GTN-16 // Vestn. Juzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Ser.: Jenergetika. 2014. № 4 (14). S. 11–17. (In Russ.).
8. Danilushkin I. A., Rosseev I. N. Sintez sistemy avtomaticheskogo upravlenija temperaturnym polem trubchatogo teploobmennika // Vestn. Samarskogo gos. tehn. un-ta. Ser.: Tehnicheskie nauki. 2006. № 40. S. 5–11. (In Russ.).
9. Janvarev I. A. Kombinirovannyj sposob regulirovanija temperaturnyh rezhimov modul'noj ustanovki vozdušnogo ohlazhdenija gaza // Omskij nauch. vestn. 2014. № 2 (130). S. 161–165. (In Russ.).
10. Artjuhov I. I., Tarisov R. Sh., Molot S. V. Adaptivnaja sistema stabilizacii temperatury gaza s chasotno-reguliruemym jelektroprivodom ventiljatorov // Vestn. Saratovskogo gos. tehn. un-ta. 2014. № 1 (77) (4). S. 112–117. (In Russ.).
11. Egorov M. A., Sulejmanov I. N. Raschjot peredatochnykh funkcij apparatov vozdušnogo ohlazhdenija masla // Nauchnyj aspekt. 2020. № 2 (17). S. 2254–2260. (In Russ.).
12. Mal'cev P. A. Razrabotka konceptual'noj mo-deli apparata vozdušnogo ohlazhdenija masla v sostave gazoperekachivajushhego agregata. SPb.: OOO «Media-papir», 2022. S. 179–182. (In Russ.).
13. Matematicheskaja model' processa teploobmena v apparate vozdušnogo ohlazhdenija masla / V. A. Kuznecov, L. A. Migacheva, A. V. Starikov, A. R. Titov // Vestn. Samarskogo gos. tehn. un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki. 2012. № 1 (26). S. 166–174. (In Russ.).
14. Buhmirov V. V., Rakutina D. V. Spravochnye materialy dlja reshenija zadach po kursu «Teplomassoobmen» / Ivanovskij gos. jenergeticheskij un-t im. V. I. Lenina. Ivanovo, 2017. 120 s. (In Russ.).
15. Il'jushin Ju. V. Metody impul'snogo upravlenija ob'ektami s raspredelennymi parametrami: special'nost' 05.13.01 «Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii (po otrasljam)»: dis. ... kand. tehn. nauk. Pjatigorsk, 2012. 170 s. (In Russ.).
16. Modelirovanie relejno-impul'snyh raspredelennykh sistem / A. B. Chernyshev, V. F. Antonov, Ju. V. Il'jushin, V. F. Antonov, Ju. V. Il'jushin: Pjatigorskij gos. gumanitarno-tehnol. un-t. Pjatigorsk, 2012. 247 s. (In Russ.).
17. Afanaseva O., Ilyushin Yu. Analysis and synthesis of distributed icedrill heating control system of moun-

tain reconnaissance drilling rig // 18th Intern. Multidisc. Sci. GeoConf. SGEM. Albena, Bulgaria: ООО «СТЕФ92 Технолоджи», 2018. P. 41–48.

18. Teorija avtomaticheskogo upravljenija: ucheb. dlja vuzov / S. E. Dushin., N. S. Zotov, D. H. Imaev, N. N. Kuz'min,

V. B. Jakovlev / Pod red. V. B. Jakovleva. M.: Vyssh. shk., 2003. 567 s. (In Russ.).

19. Djadik V. F., Bajdali S. A., Krinicyn N. S. Teorija avtomaticheskogo upravljenija. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2011. 196 s. (In Russ.).

Information about the authors

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: novozhilovim@list.ru

Sergey E. Abramkin – Cand. Sci. (Eng.) of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: seabramkin@etu.ru

Pavel A. Mal'tsev – student of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2.
E-mail: maltcev-pave@mail.ru

Artem V. Plotnikov – head of the Laboratory of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University. 21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia
E-mail: apvitarlaeda@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.12.2022; принята к публикации после рецензирования 29.12.2022; опубликована онлайн 28.02.2023.

Submitted 20.12.2022; accepted 29.12.2022; published online 28.02.2023.
