

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 621. 323

DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.21

**А. И. ДАНИЛУШКИН
И. А. ДАНИЛУШКИН
В. А. ДАНИЛУШКИН**

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ¹

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTROTECHNICAL
COMPLEX OF GAS COOLING ON THE BASIS OF MODERNIZATION
OF MANAGEMENT SYSTEM

Рассматривается комплексный подход к решению задачи достижения максимальной эффективности электротехнического комплекса охлаждения газа на компрессорных станциях магистральной трубопроводной системы. Показано, что используемый на практике способ дискретного регулирования режимов работы установки охлаждения с помощью включения или отключения определенного количества вентиляторов не всегда обеспечивает требуемые температурные режимы. Повысить эффективность и существенно снизить эксплуатационные расходы позволит использование каскадной системы регулирования. Задача создания двухуровневой системы управления решается на основе структурного моделирования процесса теплообмена как объекта с распределенными параметрами. С помощью декомпозиции объекта управления на «быструю» и «медленную» составляющие разработана структура двухуровневой системы управления для линеаризованной модели объекта. В результате применения предложенной системы достигается минимум расхода электроэнергии на охлаждение газа, увеличение срока службы электроприводных агрегатов и повышается точность стабилизации температуры газа при обработке внешних возмущений.

An integrated approach to solving the problem of achieving the maximum efficiency of the electrical gas cooling complex at the compressor stations of the main pipeline system is considered. It is shown that the method used in practice for discrete control of the operation modes of the cooling unit by switching on or off a certain number of fans does not always provide the required temperature conditions. The use of a cascade control system will improve efficiency and significantly reduce operating costs. The problem of creating a two-level control system is solved on the basis of structural modeling of the heat exchange process as an object with distributed parameters. With the help of decomposition of the control object into "fast" and "slow" components, the structure of a two-level control system for the linearized model of the object is developed. As a result of the application of the proposed system, a minimum of electricity consumption for gas cooling, an increase in the service life of electric drive units and an increase in the accuracy of gas temperature stabilization during the processing of external disturbances are achieved.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-08-001A2, № 18-08-00565

Ключевые слова: энергоэффективность, электро-технический комплекс, теплообмен, структурное моделирование, управление

Современная технология транспортировки газа по магистральным трубопроводам требует его охлаждения до определенной температуры. С этой целью на газотранспортных предприятиях – на установках комплексной подготовки газа, компрессорных станциях магистральных газопроводов, дожимных компрессорных станциях, станциях подземного хранения газа и т. д. широкое применение нашли аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. Необходимость охлаждения газа продиктована требованиями повышения пропускной способности магистральных трубопроводных систем, обеспечения качества подготовки товарной продукции, надежности и эффективности эксплуатации газопромыслового оборудования, снижения эксплуатационных расходов в системе транспортировки газа [1, 2]. Температура газа на линейном участке газопровода не должна превышать максимальную температуру, которую способно выдержать изоляционное покрытие трубопровода, а также должна быть выше температуры точки росы для транспортируемого газа во избежание образования гидратов [3, 4].

В реальных условиях эксплуатации экономичное функционирование установки охлаждения, содержащей до 24 электроприводных вентиляторов суммарной мощностью 1500 кВт, при наличии внешних возмущений, таких как изменение производительности, колебания температуры и влажности воздуха, увеличение термического сопротивления за счет загрязнения оребренных поверхностей теплообменника, колебания напряжения питающей сети и др., возможно только за счет применения эффективной системы управления процессом охлаждения [5–7].

Широкое распространение получил дискретный способ регулирования температуры газа путем изменения числа включенных вентиляторов. Однако ступенчатое регулирование не всегда позволяет получить требуемую точность стабилизации температуры. Существенным недостатком дискретного способа регулирования является необходимость частых пусков электродвигателей, что приводит к увеличению непроизводительных затрат электроэнергии и значительно снижает ресурс электродвигателей, не рассчитанных на повторно-кратковременный режим работы. К тому же при восстановлении технологического режима охлаждения газа после перерыва в электроснабжении одновременное включение нескольких вентиляторов

Keywords: energy efficiency, electrical complex, heat exchange, structural modeling, control

может привести к аварийному отключению источника питания, а последовательное включение групп вентиляторов увеличивает время выхода на установившийся режим охлаждения [8–10].

Проведенный авторами анализ нагрузочных характеристик электродвигателей, механических и аэродинамических характеристик вентиляторов показывает, что установленные на агрегатах исполнительные механизмы позволяют устранить имеющиеся недостатки дискретного способа регулирования за счет применения наряду с дискретным регулированием системы непрерывного регулирования частоты вращения вентиляторов. Это позволит улучшить технологические параметры транспортируемого газа и существенно снизить энергозатраты на охлаждение. Как показывают исследования, самой точной и надежной системой охлаждения газа является система непрерывного регулирования с помощью частотных преобразователей, которая имеет простую схему работы, надежна в эксплуатации и легко поддается автоматизации [10, 11].

Применение частотно-регулируемых электроприводов позволяет не только плавно изменять расход воздуха через аппарат, но и создавать специализированные системы управления всем технологическим процессом, проводить диагностику оборудования. Такой подход позволяет получить экономический эффект не только от снижения потребляемой мощности, но и значительно снизить эксплуатационные расходы за счет выбора оптимальной скорости двигателя, увеличения срока службы оборудования.

Для выполнения технологических требований по охлаждению газа до заданной температуры систему автоматического управления процессом охлаждения газа необходимо выполнять в виде системы, замкнутой по температуре газа на выходе установки охлаждения. Это обстоятельство определяет необходимость разработки математической модели, устанавливающей взаимосвязи между температурой газа на выходе из АВО, расходом воздуха, частотой вращения вентилятора и мощностью, потребляемой электродвигателями вентиляторов.

Температура газа на выходе АВО определяется многими факторами: температурой наружного воздуха, расходом газа через теплообменник, скоростью или расходом воздуха, создаваемыми вентилятором, характеристиками вентилятора, эффективностью теплообмен-

ных процессов в системе «воздух – труба – газ». Поведение температуры газа в процессе прохождения его через теплообменный аппарат в установившемся режиме может быть описано следующим уравнением [12]:

$$\alpha_B \cdot S_B \cdot (T_m - T_B) = \alpha_z \cdot S_z \cdot (T_z - T_m),$$

где T_z – температура потока газа на выходе из теплообменника; T_m – температура трубы; α_z – коэффициент теплообмена между внутренней стенкой трубы и газом; S_z, S_B – площади соприкосновения газа с внутренней стенкой трубы и воздуха с оребрением трубы соответственно; α_B – коэффициент теплообмена между оребрением трубы и воздухом; T_B – температура наружного воздуха.

Количество тепла, передаваемого в аппарате воздушного охлаждения от газа к воздуху, определяется из уравнения теплового баланса

$$c_B \cdot \gamma_B \cdot V_B (T_{B.out} - T_{B.in}) = c_z \cdot \gamma_z \cdot V_z (T_{z.in} - T_{z.out}),$$

откуда объемный расход V_B воздуха составляет:

$$V_B = \frac{c_z \cdot \gamma_z \cdot V_z (T_{z.in} - T_{z.out})}{c_B \cdot \gamma_B (T_{B.out} - T_{B.in})}.$$

На основании этой зависимости может быть определена мощность P_Ω электропривода аппарата воздушного охлаждения

$$P_\Omega = \frac{V_B \cdot H_\Pi}{\eta_B},$$

где $H_\Pi = H_{ст} + H_{дин}$, $H_{ст}$ – статический напор вентилятора; $H_{дин}$ – динамический напор вентилятора; η_B – коэффициент полезного действия вентилятора.

На потребление электрической энергии аппаратами воздушного охлаждения влияют следующие факторы:

- конструктивные и эксплуатационные характеристики теплообменных секций АВО;
- энергетические характеристики электродвигателей;
- энергетические характеристики питающей сети – кабельной линии и трансформатора;
- характеристики регулирующего органа;
- способ управления электродвигателями вентиляторов при изменении производительности и условий теплообмена.

Перечисленные выше факторы, определяющие потери электроэнергии, можно разделить на две группы: потери в элементах системы электроснабжения и потери в электродвигателе.

Для решения задач управления режимами работы установки охлаждения газа необходимо создание приемлемых по точности

аналитических моделей теплового режима теплообменного аппарата с учетом различных возмущающих факторов и разработки на их основе алгоритмов управления включением в работу тех или иных аппаратов в зависимости от расхода и температурного режима газа, от климатических условий, энергетической эффективности каждого аппарата и т. д.

При синтезе системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов нужно учесть, что температура в данной точке формируется при прохождении газа по трубкам теплообменника, т. е. для более точного описания объекта управления необходимо рассматривать распределение температурного поля по длине труб теплообменника.

В основе конструкции большинства аппаратов воздушного охлаждения газа лежит общий принцип – охлаждение газа путем обтекания пучков параллельных оребренных труб поперечным потоком воздуха. Это позволяет создать единую математическую модель процесса охлаждения газа, приняв ряд допущений [13, 14].

В качестве математической модели процесса охлаждения газа в динамике используется уравнение теплового баланса, согласно которому распределение температуры $T(x, t)$ по длине в зависимости от координаты точки x и времени t описывается уравнением

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \beta(t) \cdot (T_B - T(x, t)), \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq L, \quad t > 0$$

с краевыми и начальными условиями

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad T(0, t) = g(t),$$

где v – «скорость» потока, $v = F/S_{mp}$; F – расход газа; S_{mp} – площадь поперечного сечения трубки; $\beta(t) = \frac{2\alpha(t)}{c\gamma R}$ – приведенный коэффициент

теплообмена: $\alpha(t)$ – коэффициент теплообмена, в общем случае зависящий от расхода охлаждающего воздуха через теплообменник; γ – плотность газа; c – удельная теплоемкость газа; R – радиус трубки теплообменника; T_B – температура воздуха, которую благодаря высоким скоростям потоков охлаждающего воздуха и газа можно принять постоянной на всё время процесса; L – длина трубки теплообменника; $T_0(x)$ – начальное распределение температуры по координате x ; $g(t)$ – функция изменения температуры газа на входе теплообменника.

Структурная теория распределенных систем позволяет использовать для анализа уравнения (1) передаточную функцию объекта

управления с распределенными параметрами [15]:

$$W(x, \xi, p) = \mathbf{1}(x - \xi) \times \frac{1}{v} \times \exp\left[-\frac{1}{v} \times (p + \beta) \times (x - \xi)\right], \quad (2)$$

где $\mathbf{1}(x - \xi)$ – передаточная функция пространственно-интегрирующего блока,

$$\mathbf{1}(x - \xi) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < \xi \\ 1, & \text{при } x > \xi \end{cases}. \quad (3)$$

В уравнение (1) входит произведение двух функций $\beta(t)$ и $T(x, t)$, зависящих от времени. В общем случае такое уравнение не имеет точного решения, поэтому анализ температурного поля выполняется путём линеаризации уравнения (1) в отклонениях от некоторого установившегося режима ($\beta_c, T_c(x)$): $\beta(t) = \beta_c + \Delta\beta(t)$, $T(x, t) = T_c(x) + \Delta T(x, t)$. Линеаризованное уравнение теплового баланса (1) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \Delta T(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial \Delta T(x, t)}{\partial x} + \beta_c \Delta T(x, t) = \beta_c T_B + \Delta\beta(t) T_B - \beta_c T_c(x) - \Delta\beta(t) T_c(x) - v \frac{\partial T_c(x)}{\partial x}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) находится в результате выполнения операции интегрирования по пространственной области произведения двух функций: передаточной функции объекта с распределенными параметрами и стандартизирующей функции. Интегрирование ведётся по внутренним пространственным переменным в области их определения:

$$\begin{aligned} \bar{T}(x, p) &= W(x, \xi, p) \otimes \bar{\omega}(x, p) = \\ &= \int_D W(x, \eta, p) \cdot \bar{\omega}(\eta, p) \cdot d\eta, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\bar{\omega}(x, p)$ – изображение по Лапласу стандартизирующей функции, полученной из уравнения (4) для установившегося режима ($\Delta\beta(t) = 0$, $\Delta T(x, t) = 0$):

$$\bar{\omega}(x, p) = \bar{\Delta\beta}(p) \cdot \exp\left(-\frac{x}{v} \beta_c\right) \cdot T_B. \quad (6)$$

Рассматривая процесс в отклонениях, с нулевым начальным температурным распределением, передаточной функцией (4) и стандартизирующей функцией (6), решение интеграла (5) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{T}(x, p) &= T_B \cdot \bar{\Delta\beta}(p) \cdot \frac{1}{p} \times \\ &\times \left[\exp\left(-\frac{\beta_c}{v} \cdot x\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{p}{v} \cdot x\right)\right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Из выражения (7) при $x = L$ (что соответствует управлению температурой газа на выходе теплообменника) можно записать передаточные функции как для сосредоточенной системы. По каналу «изменение коэффициента теплообмена – температура газа» на выходе теплообменника она имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{\Delta\beta}(p) &= \frac{\bar{T}(p)}{\Delta\beta(p)} = \\ &= T_c \cdot \frac{1}{p} \cdot \left[\exp\left(-\frac{\beta_c}{v} \cdot L\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{p}{v} \cdot L\right)\right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 1 представлена структурная схема объекта управления «электропривод – вентилятор – поток газа», где в качестве управляющего воздействия выступает изменение величины коэффициента теплообмена $\Delta\beta(p)$, а температура охлаждающего потока воздуха $\bar{T}_B(p)$ и температура газа на входе теплообменника $\bar{T}_I(p)$ выступают в виде возмущающих воздействий. Статическая нелинейная характеристика f_1 описывает зависимость расхода воздуха от скорости вращения электропривода, а статическая нелинейная характеристика f_2 – зависимость приведённого коэффициента теплообмена $\beta(t)$ от расхода воздуха.

При разработке системы управления необходимо учитывать процессы теплообмена в магистральном газопроводе. В процессе транспортировки по магистральному газопроводу изменяются температура и давление газа. При этом оба параметра изменяются как во времени, так и по длине газопровода.

Температура $T_{TP}(x, t)$ и давление $P_{TP}(x, t)$ в каждой точке газопровода $x \in [0, L_{TP}]$ в общем случае описываются системой взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [16, 17].

Значительная протяжённость трубопровода позволяет принять, что все процессы, протекающие в установке охлаждения газа (УОГ), перед подачей газа в трубопровод имеют сосредоточенный характер и зависят только от времени. При этом динамика изменения температуры $T_{\text{УОГ}}(t)$ газа на выходе УОГ определяется:

- поведением температуры $T_{\text{УОГ}}(t)$ и давления $P_{\text{УОГ}}(t)$ на входе УОГ;
- температурой $T_{\text{ОС}}^{\text{УОГ}}(t)$ окружающей среды на УОГ;
- режимами работы аппаратов воздушного охлаждения, входящих в состав УОГ.

При рассмотрении связи «УОГ – магистральный газопровод» как объекта управления она может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 2).

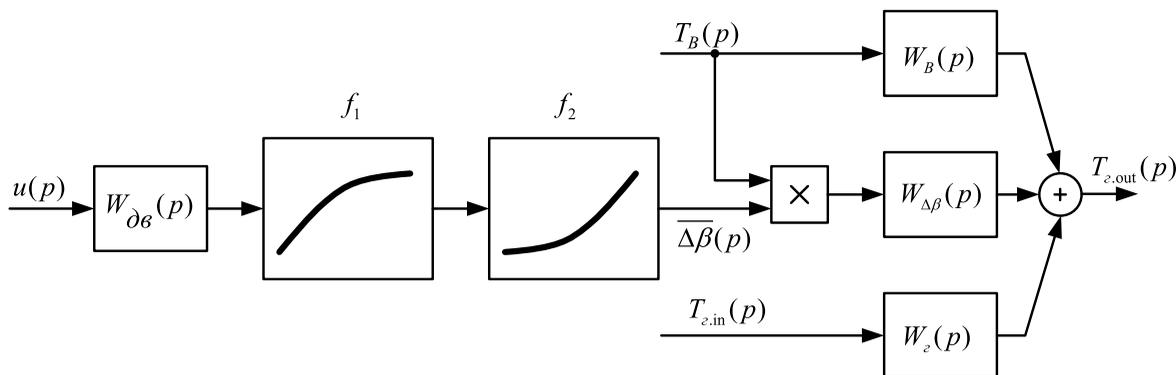


Рис. 1. Структурная схема объекта управления «электропривод– вентилятор – поток газа»

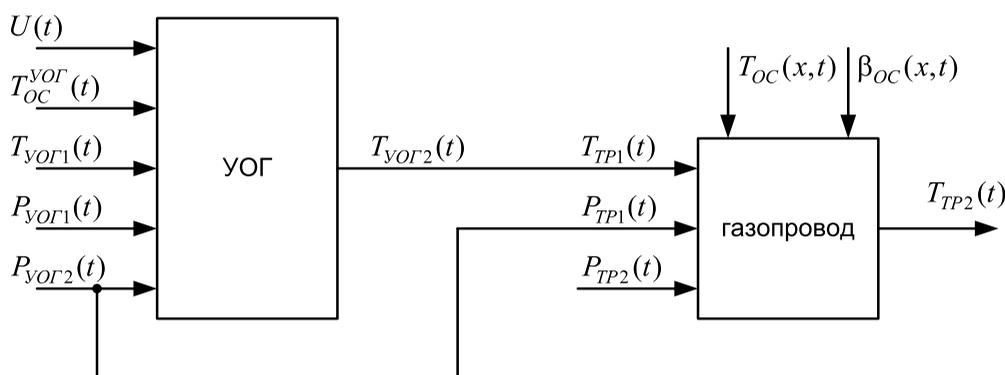


Рис. 2. Структурная схема объекта управления «установка охлаждения – магистральный газопровод»

На рис. 2 входные сигналы, поступающие на функциональные блоки слева, являются измеряемыми. Сигналы, поступающие сверху, рассматриваются как неизмеряемые и в общем случае являются неизвестным возмущением. В процессе эксплуатации объект «установка охлаждения – газопровод» может проявлять параметрическую нестабильность из-за изменения условий эксплуатации как установки охлаждения, так и газопровода.

Структура объекта управления, представленная на рис. 3, является базовой и может использоваться для моделирования нескольких последовательно соединённых участков «установка охлаждения – газопровод».

Рассматриваемая структура объекта управления позволяет сделать вывод, что объект управления состоит из двух частей: «быстрой» – установка охлаждения, и «медленной» – газопровод. Для повышения устойчивости подобных систем при построении систем автоматического управления используют структуры каскадного или подчинённого регулирования. Функциональная схема каскадной системы управления представлена на рис. 3.

Внутренний контур управления представляет собой регулятор для «быстрой» части системы, внешний контур управления – регулятор для «медленной» части. Требуемое значение температуры газа $T_{TP2}^*(t)$, которое должно поддерживаться на выходе участка магистрального газопровода, сравнивается с текущим значением температуры $T_{TP2}(t)$. Рассогласование сигналов поступает на вход регулятора газопровода (регулятор ГП). Управляющее воздействие с выхода регулятора ГП выступает заданием для системы управления установкой охлаждения газа.

Рассчитанное управляющее воздействие сравнивается с текущим значением температуры на выходе УОГ $T_{yog2}(t)$. Сигнал рассогласования поступает на вход регулятора внутреннего контура системы управления – на регулятор УОГ. Регулятор УОГ, в свою очередь, определяет режим работы установки таким образом, чтобы обеспечить заданную температуру на её выходе. Для повышения эффективности системы управления при отработке динамических режимов в процессе синтеза системы управления используется информация об основных

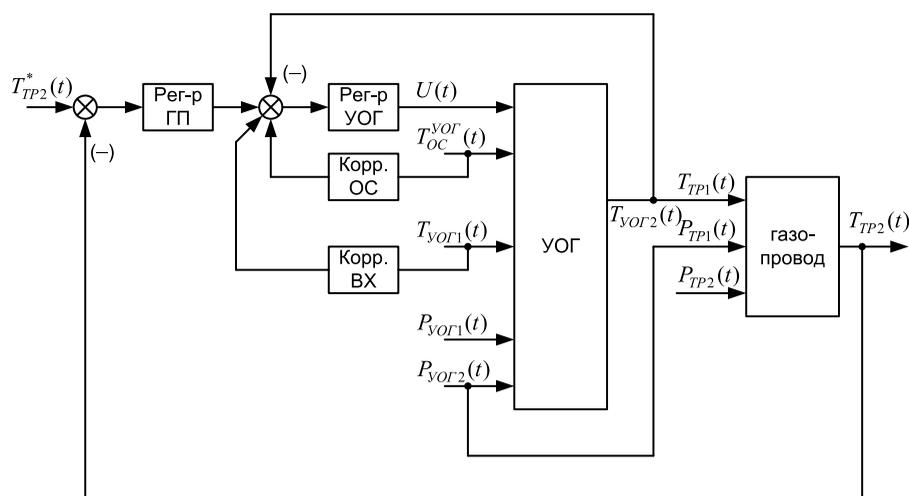


Рис. 3. Функциональная схема двухуровневой системы управления объектом «установка охлаждения – магистральный газопровод»

измеряемых возмущениях, присущих объекту управления. Сигнал по возмущению заводится на вход регулятора через реальное дифференцирующее звено с соответствующими коэффициентами. Наличие дифференциальной составляющей «отключает» корректирующее звено при постоянном значении возмущения. Температурные возмущения учитываются сигналами температуры газа на входе УОГ (Корр. ВХ) и температуры окружающей среды УОГ (Корр. ОС).

Качество работы системы управления определяется точностью математической модели объекта управления. Кроме того, качество зависит от чувствительности алгоритмов управления к изменению параметров объекта управления.

Выводы. Одним из направлений работ по снижению эксплуатационных издержек за счёт уменьшения энергетической составляющей является оптимизация режимов работы установки охлаждения газа. Существующий дискретный способ управления процессом охлаждения газа не всегда обеспечивает требуемые качественные показатели работы системы охлаждения газа.

Эффективность автоматического управления режимами работы установки охлаждения может быть обеспечена лишь при условии создания двухуровневой системы управления, которая обеспечивает минимизацию потребления электроэнергии, затрачиваемой на охлаждение газа. Двухуровневая система управления обеспечивает коррекцию режимов работы электроприводов вентиляторов компрессорной станции в зависимости от параметров перекачиваемого газа и от условий внешней среды сочетанием дискретного и непрерывного способов регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р.А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др. 2-е изд. М.: Недра, 1988. 368 с.
2. Кочергин В.И. Расчет процессов охлаждения в условиях газовой промышленности и газонефтепереработки. М.: МИНГ им. И.М. Губкина, 1988. 78 с.
3. Алимов С.В., Лифанов В.А., Миатов О.Л. Аппараты воздушного охлаждения газа: опыт эксплуатации и пути совершенствования // Газовая промышленность. 2006. № 6. С. 54–57.
4. Бахмат В.Г., Еремин Н.В., Степанов О.А. Аппарат воздушного охлаждения на компрессорных станциях. СПб.: Недра, 1994. 102 с.
5. Бикчентай Р. Н., Козаченко А.Н., Поршаков Б.П. Влияние температуры транспортируемого газа на топливно-энергетические затраты КС // Газовая промышленность. 1991. № 2. С. 19–21.
6. Данилушкин А.И., Крайнов В.Г., Мигачева Л.А. Оптимизация стационарного распределения нагрузки аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2011. Вып. № 3(31). С. 159–165.
7. Минаева В.А., Калехтан П.Х. Оптимизация температурного режима транспорта газа по газопроводу «Союз» // Научно-технические достижения и передовой опыт, рекомендуемые для внедрения в газовой промышленности. М.: ВНИИГазпром 1991. № 4. С.22–28.
8. Данилушкин А.И., Данилушкин И.А. Оптимизация электропотребления электротехнического комплекса установки охлаждения газа // Градостроительство и архитектура». 2018. Т.8, № 1. С.124–129.
9. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н. и др. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности. М.: Недра, 2002. 300 с.

10. Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А. Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». 2010. № 7. С. 113–117.

11. Данилушкин А.И., Давыдова Н.М., Животягин Д.А. Исследование вентиляционного аппарата как объекта управления и постановка задачи управления // VIII МНПК «Актуальные проблемы энергетики АПК» / Саратовский ГАУ. Саратов, 2017. С. 51–53.

12. Алимов С.В., Данилушкин И.А., Мосин В.Н. Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2010. Вып. № 2(26). С. 178–186.

13. Данилушкин А.И., Данилушкин И.А. Численно-аналитическая модель транспортировки газа по линейному участку газопровода // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 12. С. 96–103.

14. Базаров А.А., Данилушкин А.И. Моделирование процессов теплообмена между газопроводом и окружающей средой // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2015. Вып. № 2(46). С.66–76.

15. Рапорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.

16. Грабовец В.А., Данилушкин А.И., Данилушкин И.А. и др. Метод моделирования температуры газа при транспортировке по магистральному газопроводу // Газовая промышленность. 2016. № 9 (743). С. 26–30.

17. Базаров А.А., Данилушкин А.И. Моделирование тепловых и гидравлических процессов в магистральном газопроводе // Известия Томского политехнического университета. 2017. Т. 328. Вып. 6. С. 81–90.

REFERENCES

1. Aliev R.A., Belousov V.D., Nemudrov A.G. e.a. *Truboprovodnyj transport nefti i gaza* [Pipeline transport of oil and gas]. Moscow, Nedra, 1988. 368 p.

2. Kochergin V.I. *Raschet processov ohlazhdenija v uslovijah gazovoj promyshlennosti i gazoneftepererabotki* [Calculation of cooling processes in the gas industry and gas and oil refining]. Moscow, 1988. 78 p.

3. Alimov S.V., Lifanov V.A., Miatov O.L. Gas air coolers: operating experience and ways to improve. *Gazovaja promyshlennost'* [Gaz Industry], 2006, no. 6, pp. 54–57. (in Russian)

4. Bakhmat V.G., Eremin N.V., Stepanov O.A. *Apparat vozdušhnogo ohlazhdenija na kompressornyh stancijah* [Air cooler at compressor stations]. Saint Petersburg, Nedra, 1994. 102 p.

5. Bikhentay R.N., Kozachenko A.N., Porshakov B.P. The effect of the temperature of the transport-

ed gas on the fuel and energy costs of the compressor. *Gazovaja promyshlennost'* [Gaz Industry], 1991, no. 2, pp. 19–21. (in Russian)

6. Danilushkin A.I., Kraynov V.G., Igacheva L.A. Optimization of the stationary load distribution of gas air-cooling units. *Vestnik Samar. gos. tehn. un-ta. Ser. Tehniceskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Engineering], 2011, no. 3(31), pp. 159-165. (in Russian)

7. Minaeva V.A., Kalekhtan P.K. Optimization of the temperature regime of gas transport through the Soyuz gas pipeline. *Nauchno-tehniceskie dostizhenija i peredovoj opyt, rekomenduemye dlja vnedrenija v gazovoj promyshlennosti* [Scientific and Technological Achievements and Best Practices Recommended for Implementation in the Gas Industry]. Moscow, 1991, no. 4, pp. 22-28. (in Russian)

8. Danilushkin A.I., Danilushkin I.A. Optimization of electrotechnical power consumption of gas cooling system complex. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, V,8, no. 1, pp 124-129. (in Russian)

9. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Veliky S.N. e.a. *Novye tehnologii i sovremennoe oborudovanie v jelektroenergetike gazovoj promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in the electric power industry of the gas industry]. Moscow, Nedra, 2002. 300 p.

10. Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A. Analytical and experimental study of stationary operating modes of gas cooling units of compressor stations of gas mains. *Vestnik Samar. gos. tehn. un-ta. Ser. Tehniceskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Engineering], 2010, no. 7, pp. 113-117. (in Russian)

11. Danilushkin A.I., Davydova N.M., Zhivotyagin D.A. Study of the ventilation apparatus as a control object and statement of the control problem. *VIII MNPК «Aktual'nye problemy jenergetiki APK»* [VIII MNPК "Actual problems of the energy sector of the agro-industrial complex"]. Saratov, 2017, pp. 51–53. (in Russian)

12. Alimov S.V., Danilushkin I.A., Mosin V.N. Modeling of steady-state heat transfer processes in gas air-cooling units. *Vestnik Samar. gos. tehn. un-ta. Ser. Tehniceskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Engineering], 2010, no. 2(26), pp. 178–186. (in Russian)

13. Danilushkin A.I., Danilushkin I.A. Numerical-analytical model of gas transportation along a linear section of a gas pipeline. *Izvestija Tomskogo politehniceskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2015, Vol. 326, no.12, pp. 96–103. (in Russian)

14. Bazarov A.A., Danilushkin A.I. Simulation of heat transfer processes between a gas pipeline and the environment. *Vestnik Samar. gos. tehn. un-ta. Ser. Tehniceskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Engineering], 2015, no. 2(46), pp. 66–76. (in Russian)

15. Rapoport E.Ya. *Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami* [Optimal management of distributed parameter systems]. Moscow, High School, 2009. 677 p.

16. Grabovets V.A., Danilushkin A.I., Danilushkin I.A. e.a. Method for modeling gas temperature during transportation through a gas pipeline. *Gazovaja promyshlennost'* [Gaz Industry], 2016, no. 9 (743), pp. 26–30. (in Russian)

17. Bazarov A.A., Danilushkin A.I. Modeling of thermal and hydraulic processes in a gas main. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnical University], 2017, V. 328, no. 6, pp. 81–90. (in Russian)

Об авторах:

ДАНИЛУШКИН Александр Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

ДАНИЛУШКИН Иван Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах института автоматизации и информационных технологий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: idanilushkin@mail.ru

ДАНИЛУШКИН Василий Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

DANILUSHKIN Alexander I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (927) 201-47-36 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

DANILUSHKIN Ivan A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Automation and Control in Technical Systems Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (846)337-07-00 E-mail: idanilushkin@mail.ru

DANILUSHKIN Vasily A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (846) 242-36-90 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

Для цитирования: Данилушкин А.И., Данилушкин И.А., Данилушкин В.А. Повышение эффективности электротехнического комплекса установки охлаждения газа на основе модернизации системы управления // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 167–174. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.21.

For citation: Danilushkin A.I., Danilushkin I.A., Danilushkin V.A. Improving the Efficiency of Electrotechnical Complex of Gas Cooling on the Basis of Modernization of Management System// Urban Construction and Architecture. 2019. V.9, 3. Pp. 167–174. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.21.