

УДК 621.316.718.5

# СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА ПРИ ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ОХЛАЖДЕНИИ

## CONTROL METHOD OF VARIABLE FREQUENCY DRIVE OF AIR-COOLED HEAT EXCHANGER UNDER TWO-STAGE COOLING

В.В. Пашкин, О.Н. Ивашкин

ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой, Российская Федерация

#### В.А. Шабанов

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Vasiliy V. Pashkin, Oleg N. Ivashkin

Gazprom dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Russian Federation

Vitaliy A. Shabanov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

**Аннотация.** Добываемый на существующих добычных комплексах Крайнего Севера газ должен иметь строго определённые режимные параметры на различных участках технологической цепи: от газового промысла до единой системы газоснабжения. Одними из важнейших параметров в технологическом комплексе газового промысла являются температура газа, определяющая массовую производительность



газоперекачивающих агрегатов; эффективность осушки газа до требуемой точки росы в абсорберах установки комплексной подготовки газа; тепловое воздействие на грунты многолетней мерзлоты и изоляцию трубопровода межпромыслового коллектора; льдо-гидратообразование в линейных и теплообменных частях технических устройств при внутрипромысловых технологических операциях.

Для приведения газа к необходимой температуре в настоящее время получил способ воздушного охлаждения газа в аппаратах воздушного охлаждения (АВО). Установки охлаждения газа, представляющие собой многодвигательную систему электроприводов АВО газа, являются основными потребителями электроэнергии газопромысловых объектов. Установленная мощность АВО газа достигает 70 % от общей установленной мощности. В связи с этим внедрение энергосберегающих мероприятий при регулировании температуры газа в данном электротехническом комплексе имеет высокую актуальность.

B рассматриваются технологические особенности статье регулирования температуры газа В двухступенчатой конструкции охлаждающей секции в установках воздушного охлаждения газа, выводится уравнение теплового коэффициента полезного действия, предлагаются способ управления частотно-регулируемым приводом, алгоритм вычисления оптимальной точки методика И c зрения энергосбережения электроприводов ABO частоты вращения реализованные программной среде Mathcad. Использование В разработанного способа управления электроприводами двухступенчатой секции АВО газа с оптимальным распределением тепловой нагрузки между ступенями охлаждения позволяет достичь экономии электроэнергии и устранить неблагоприятные зоны интенсивного отбора тепла снизить риск льдо-гидратообразований в теплообменной части.



**Abstract.** Gas produced in the existing mining complexes of the Far North must have strictly defined regime parameters in various parts of the technological chain: from gas production to a gas supply system. One of the most important parameters in the technological complex of the gas field is the gas temperature, which determines the mass productivity of gas compressor units, the efficiency of gas dehydration to the required dew point in the absorbers of the comprehensive gas treatment unit, the thermal impact on permafrost soil and insulation of the collector pipeline, ice-hydrate formation in linear and heat exchange parts of technical devices of technological operations.

For cooling the gas to the required temperature, the method of air cooling of the gas has become the most widespread. Gas cooling installations, which are a multi-engine system of electric drives for air-cooled heat exchangers, are the main consumers of electricity from gas production facilities. The installed air-cooled heat exchangers of a gas capacity reach up 70 % of the total installed capacity. Therefore, the introduction of energy-saving measures in the regulation of gas temperature in this electrical complex has a high relevance

The article discusses the technological features of gas temperature control in a two-stage design of the cooling section in gas air-cooling installations, derives the equation of thermal efficiency ratio, proposes a method for controlling the variable frequency drive, a method and algorithm for calculating the optimum rotational speed of electric drives of air-cooled heat exchangers of a gas in terms of energy saving. The algorithm is implemented in the Mathcad software.

Using the proposed method of controlling electric drives of a two-stage cooling gas section with an optimal distribution of heat load between the cooling stages allows to achieve energy savings and eliminate unfavorable zones of intensive heat removal to reduce the risk of ice-hydrate formations in the heat exchange part.

**Ключевые слова**: частотно-регулируемый электропривод, энергосбережение, ресурсосбережение, асинхронный двигатель, аппарат воздушного охлаждения газа, тепловой коэффициент полезного действия



**Key words**: variable frequency drive, energy saving, resource saving, asynchronous engine, air-cooled heat exchanger, thermal efficiency ratio

Добываемый на добычных комплексах Крайнего Севера газ должен иметь строго определённые режимные параметры на всех участках технологической цепи: от газового промысла до единой системы газоснабжения. Одним важнейших ИЗ режимных параметров технологическом комплексе газового промысла является температура газа, в значительной степени влияющая на другие технологические параметры. Для приведения газа к необходимой температуре в настоящее время получил распространение способ воздушного охлаждения газа в аппаратах воздушного охлаждения (АВО). Установленная мощность АВО газа достигает 70 % от общей установленной мощности. Поэтому внедрение оптимальных систем управления АВО газа, направленных на снижение расхода электроэнергии, является актуальной задачей.

Основным параметром, характеризующим эффективность охлаждения газа в установках воздушного охлаждения, является тепловой коэффициент полезного действия (КПД) ABO [1], определяемый выражением:

$$\eta = \frac{(T_{\text{BX.}} - T_{\text{BbIX.}})}{(T_{\text{BX.}} - T_0)},\tag{1}$$

где  $T_{\text{вх.}}$  – температура газа на входе в ABO, °C;

 $T_{\text{вых.}}$  – температура газа на выходе из ABO, °C;

 $T_0$  – температура охлаждающего воздуха, °С.

Теплообменная способность ABO газа характеризуется паспортной тепловой характеристикой, представляющей зависимость разности температур газа на входе и выходе ABO от разницы температуры газа на входе и температуры охлаждающего воздуха.



На рисунке 1 представлен график паспортной тепловой характеристики ABO типа 2ABГ-75С, состоящий из семейства лучей, зависящих от расхода газа G через теплообменный пучок. Штриховой линией обозначены линии тепловой производительности, определяющие количество теплоты Q, отбираемое у газа в определённой рабочей точке. Тепловой КПД на графике тепловых характеристик представляет собой тангенс угла наклона луча тепловой характеристики при заданном массовом расходе газа.

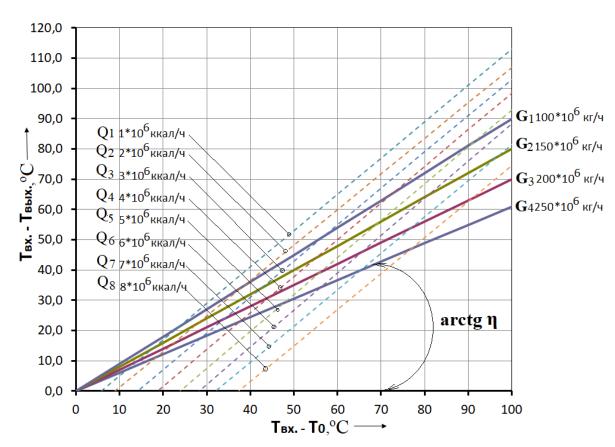
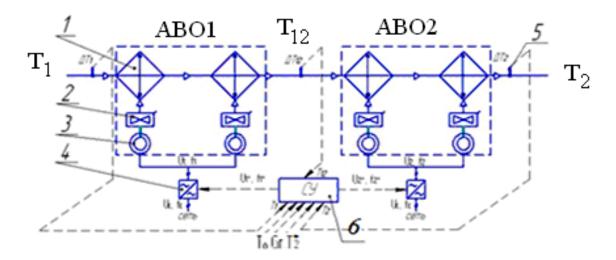


Рисунок 1. Паспортная тепловая характеристика аппарата 2АВГ-75С

Конструктивно установки охлаждения «сырого» газа с температурой выше 40 °C на объектах добычи газа в соответствии с СТО Газпром 2-2.3-377-2009 «Регламент эксплуатации серийных АВО северных месторождений при температуре окружающего воздуха до минус 50 °C» выполняются по двухступенчатой схеме охлаждения, представленной на рисунке 2.





- 1 теплообменная секция АВО; 2 осевой вентилятор; 3 электродвигатель;
- 4 преобразователь частоты; 5 датчик температуры; 6 система управления

**Рисунок 2.** Технологическая схема секции ABO газа с двухступенчатым охлаждением

Анализ существующих способов регулирования температуры газа на установках ABO, приведённых в [2–5], показывает, что в данных способах не учитываются свойства и технологические особенности двухступенчатых секций ABO газа. Двухступенчатые системы охлаждения с точки зрения регулирования температуры газа на выходе имеют существенные отличия, т.к. выходная температура газа первого ABO (ABO1 на рисунке 2) одновременно является входной для второго (ABO2 на рисунке 2).

В целях уменьшения взаимного аэродинамического взаимовлияния работающих ABO обоих вентиляторов одного электродвигатели вентиляторов каждого АВО должны вращаться с одной определённой частотой. Заводом-изготовителем ABO характеристика тепловая рассчитывается при двух работающих на номинальных параметрах вентиляторах без частотно-регулируемого электропривода (ЧРП). При этом, в случае работы только одного из двух АВО, необходимо учитывать охлаждение участков теплообменников, находящихся над отключенным



вентилятором. При использовании ЧРП в работе будут оба АВО двухступенчатой схемы охлаждения. В результате при использовании ЧРП и работе всех электродвигателей секции отсутствует необходимость в дополнительных расчётах конвекционного охлаждения участков теплообменников отключенного АВО. При этом достигаются повышение точности регулирования температуры на выходе из АВО и повышение КПД. эквивалентного теплового При использовании ЧРП подключить все электродвигатели обоих АВО к одному преобразователю частоты, либо подключить электродвигатели каждого из АВО к своему преобразователю. Bo втором случае появляются дополнительные достоинства. Работа АВО1 и АВО2 с разными частотами позволяет регулированию секции с точки зрения энергетической эффективности, т.к. при допустимой по технологическому режиму температуре газа на выходе из секции температура газа между двумя АВО может варьироваться в зависимости от частоты вращения вентиляторов.

Рассмотрим влияние частоты вращения электроприводов ABO1 и ABO2 на тепловой КПД и расход электроэнергии при поддержании требуемой температуры газа на выходе из секции с двухступенчатым охлаждением. Исходными данными для такого анализа являются заданные значения температуры газа на входе и выходе секции, массового расхода газа, температуры охлаждающего воздуха.

В соответствии с (1) тепловой КПД АВО1:

$$\eta_1 = \frac{(T_1 - T_{12})}{(T_1 - T_0)},\tag{2}$$

где  $T_1$  – температура газа на входе в ABO1 (входе в секцию);  ${}^{\rm o}{\rm C};$ 

 $T_{12}$  – температура газа на выходе ABO1 (температура газа между ABO1 и ABO2),  $^{\rm o}$ C.

Тепловой КПД АВО2:



$$\eta_2 = \frac{(T_{12} - T_2)}{(T_{12} - T_0)},\tag{3}$$

где  $T_2$  – температура газа на выходе из ABO2 (выходе из секции), °С.

Из выражений (2) и (3) следует, что

$$T_{12} = T_1 - \eta_1 \cdot (T_1 - T_0), \qquad (4)$$

$$T_{12} = \frac{(T_2 - \eta_2 \cdot T_0)}{(1 - \eta_2)}.$$
 (5)

Приравняем (4) и (5):

$$T_1 - \eta_1 \cdot (T_1 - T_0) = \frac{(T_2 - \eta_2 \cdot T_0)}{(1 - \eta_2)}.$$
 (6)

Решим (6) относительно  $\eta_1$  и преобразуем полученное уравнение с учетом (3). Получим:

$$\eta_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{(1 - \eta_2) \cdot (T_1 - T_0)} - \eta_2 = \frac{\eta_c}{1 - \eta_2} - \eta_2.$$
 (7)

Откуда общий тепловой КПД секции из двух АВО равен

$$\eta_c = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2. \tag{8}$$

Из выведенного выражения видно, что тепловой КПД секции больше, чем тепловой КПД каждого из ABO в отдельности, определяемых по тепловой характеристике.

Задача повышения энергетической эффективности состоит в уменьшении потребляемой мощности частотно-регулируемыми электроприводами одной секции двухступенчатого охлаждения.

Суммарная потребляемая мощность ЧРП секции охлаждения с учётом кубической зависимости потребляемой мощности от частоты питания электродвигателя [6] равна:

$$N_{\Sigma} = \sum_{1}^{n} N_{i} = \sum_{1}^{n} \left( N_{\text{\tiny HOM.}} \cdot \left( \frac{f_{i}}{f_{\text{\tiny c.}}} \right)^{3} \right), \tag{9}$$



где  $N_{\text{ном.}}$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

 $f_{i.}$  – частота i-го ЧРП, Гц;

 $f_{c.}$  – номинальная частота сети,  $\Gamma$ ц.

При питании электродвигателей ABO1 частотой  $f_1$ , электродвигателей ABO2 частотой  $f_2$  выражение (9) приводится к виду:

$$N_{\Sigma} = 2 \cdot N_{\text{HOM.}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_c}\right)^3 + 2 \cdot N_{\text{HOM.}} \left(\frac{f_2}{f_c}\right)^3. \tag{10}$$

Для повышения энергетической эффективности необходимо оптимизировать частоту вращения каждого из ABO, путем выбора частоты питания электроприводов каждой из групп на основе следующей функции оптимизации:

$$N_{\Sigma} = 2 \cdot N_{\text{HOM.}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_c}\right)^3 + 2 \cdot N_{\text{HOM.}} \left(\frac{f_2}{f_c}\right)^3. \tag{10}$$

Критерием оптимизации является

$$N_{\Sigma} \to min.$$
 (11)

Тепловой КПД зависит от скорости вращения вентиляторов ABO, а следовательно, и от частоты питания электродвигателей, в степени 0,8 [7]:

$$\left(\frac{\eta}{\eta_{\text{HOM.}}}\right) = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{HOM.}}}\right)^{0.8} = \left(\frac{f}{f_{c.}}\right)^{0.8},\tag{12}$$

$$\left(\frac{f}{f_c}\right) = \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{HOM}}}\right)^{1,25}.\tag{13}$$

Подставляя из (13) в (10), получим

$$N_{\Sigma} = 2 \cdot N_{\text{HOM.}} \cdot \left( \left( \frac{\eta_1}{\eta_{\text{HOM.}}} \right)^{3,75} + \left( \frac{\eta_2}{\eta_{\text{HOM.}}} \right)^{3,75} \right) \rightarrow min. \tag{14}$$

При постоянстве  $N_{\text{ном.}}$  и  $\eta_{\text{ном.}}$  при принятых условиях в выражении (13) решение поиска оптимальных тепловых КПД сводится к нахождению минимума следующей целевой функции, которую обозначим как  $\psi$ :



$$\psi = \eta_1^{3,75} + \eta_2^{3,75}. \tag{15}$$

Преобразуем выражение (15) к функции одной переменой. С учетом выражения (8) для теплового КПД секции выражение (15) принимает вид:

$$\psi = \eta_1^{3,75} + \left(\frac{\eta_{c.} - \eta_1}{1 - \eta_1}\right)^{3,75}.$$
 (16)

Для нахождения оптимальной частоты необходимо отыскать экстремум функции  $\psi$  (15). При заданных значениях температуры на входе и выходе секции теплового КПД секции  $\eta_c$  будет величиной постоянной. Приравнивая производную  $\psi$  по  $\eta_1$  нулю, получаем:

$$\eta_1^{2,75} - \left(\frac{\eta_{c.} - \eta_1}{1 - \eta_1}\right)^{0,579} \cdot (1 - \eta_{c.}) = 0. \tag{17}$$

Решением уравнения (17) является оптимальный тепловой КПД ABO1. Оптимальный тепловой КПД ABO2 определяется по (8). Оптимальные частоты питания электродвигателей вычисляются по выражениям:

$$\begin{cases} \frac{f_1}{f_{c.}} = \left(\frac{\eta_1}{\eta_{\text{HOM.}}}\right)^{1,25} \\ \frac{f_2}{f_{c.}} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_{\text{HOM.}}}\right)^{1,25} \end{cases} = \gg \begin{cases} f_1 = f_{c.} \cdot \left(\frac{\eta_1}{\eta_{\text{HOM.}}}\right)^{1,25} \\ f_2 = f_{c.} \cdot \left(\frac{\eta_2}{\eta_{\text{HOM.}}}\right)^{1,25} \end{cases} . \tag{18}$$

На основе приведённой методики вычисления оптимальных частот вращения электроприводов ABO газа в двухступенчатой авторами предложен алгоритм, реализованный в программной среде Mathcad и зарегистрированный как программа для ЭВМ [8]. Исходными данными для расчёта являются: технические характеристики аппарата воздушного охлаждения газа, температура охлаждающей среды, и технологические параметры газопровода: температура газа на входе и выходе из аппарата воздушного охлаждения газа, расход охлаждаемого газа, физические параметры перекачиваемого газа. Структурная схема алгоритма приведена на рисунке 3.





Рисунок 3. Структурная схема алгоритма

Эффективность использования оптимальных частот вращения вентиляторов ABO газа рассмотрим на примере ABO газа дожимной компрессорной станции для температур газа и воздуха:  $T_1 = 88,8$  °C,  $T_2 = 20,8$  °C,  $T_0 = -5,0$  °C. Результаты расчёта представлены в таблице 1. Расчёты выполнены для температуры  $T_2$  на выходе из ABO в пределах допустимых по технологическому регламенту эксплуатации от 20 °C до 25 °C с шагом в один градус [9–12].

Результаты расчётов в таблице 1 показывают, что потребление электроэнергии на охлаждение газа увеличивается с уменьшением поддерживаемой температуры газа на выходе из секции ABO.



Tr ~	1	D		••		
Гарпина	) I	Pest	ипьтаты	nacueta	оптимальных	частот
т аолица		1 00	yJIDIGIDI	pacicia	OHITHMANDHDIA	Idelei

Температура на выходе секции T <sub>2</sub> , °C	f <sub>1,</sub> Гц	f <sub>2,</sub> Гц	Суммарная потребляемая мощность ΣР, кВт
25	26,56	14,92	13,08
24	26,61	16,16	13,66
23	26,62	17,45	14,31
22	26,60	18,79	15,06
21	26,54	20,19	15,94
20	26,46	21,63	16,96

В таблице 2 приведено сравнение результатов вычисления суммарной потребляемой мощности при оптимальных частотах вращения в случае использования ЧРП со способом дискретных переключений при одинаковых заданных значениях температуры на выходе секции.

Таблица 2. Результаты расчёта потребляемой мощности

Способ управления	Количество электродвигателей в работе	Температура на выходе секции Т <sub>2</sub> , °C	Тепловой $K\Pi \mathcal{A}$ секции $\eta_{\text{c.}}$	Суммарная потребляемая мощность ΣР, кВт
Дискретные переключения	1	20,8	0,73	37,00
Частотный	4	20	0,73	16,96

Как видно из таблицы 2, при одинаковых значениях температуры на выходе секции эквивалентные тепловые КПД также получаются одинаковыми. Однако потребляемая АВО мощность при оптимальном управлении ЧРП более чем в 2 раза меньше, чем при способе дискретных переключений, когда в работе один вентилятор, работающий с номинальной мощностью.



## Выводы

- 1. Получено уравнение теплового КПД секции двухступенчатого охлаждения газа. Показано, что тепловой КПД секции больше, чем тепловой КПД каждого из АВО в отдельности, определяемых по тепловой характеристике.
- 2. Предложены методика и целевая функция оптимального управления ЧРП АВО газа для заданных технологических параметров газопровода по критерию минимума потребляемой мощности. На основе приведённой методики вычисления оптимальной частоты вращения электроприводов АВО газа при двухступенчатом охлаждении авторами предложен алгоритм, реализованный в зарегистрированной программе для ЭВМ.
- 3. Показано, что разработанный способ управления электроприводами двухступенчатой секции ABO газа с оптимальным распределением тепловой нагрузки между ступенями охлаждения позволяет достичь экономии электроэнергии до 50 % по отношению к регулированию дискретными переключениями.
- 4. Использование предлагаемого способа позволяет распределить тепловую нагрузку вдоль всей секции ABO газа и тем самым устранить неблагоприятные зоны интенсивного отбора тепла и снизить риск льдогидратообразований в теплообменной части.

### Список используемых источников

- 1. Устинов Е.В. Расчет теплового КПД аппаратов воздушного охлаждения газа с инверторным приводом // Научный журнал Российского газового общества. 2014. № 4. С. 93-97.
- 2. Пат. 2458256 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/00. Способ автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа / А.М. Абакумов, С.В. Алимов, Л.А. Мигачёва, В.Н. Мосин, Д.В. Плешаков. 2010112551/06, Заявлено 31.03.2010; Опубл. 10.08.2012. Бюл. 22.



- 3. З. Пат. 91605 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/00. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Л.А. Мигачёва, В.Н. Мосин, Д.В. Плешаков. 2009136833/22, Заявлено 05.10.2009; Опубл. 20.02.2010. Бюл. 5.
- 4. 4. Пат. 106310 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/02. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа / О.В. Крюков. 2011111667/07, Заявлено 28.03.2011; Опубл. 10.07.2011. Бюл. 19.
- 5. 5. Пат. 91606 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/02. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, П.А. Захаров, Д.А. Аникин, Д.С. Дадонов. Заявлено 20.02.2010; Опубл. 10.07.2011 Бюл. 19.
- 6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
- 7. Прибытков И.А. Теоретические основы теплотехники. М.: Академия, 2004. 464 с.
- 8. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615234 «Программа расчёта оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа» / В.В. Пашкин, О.Н. Ивашкин, В.А. Шабанов М.: Роспатент, 2015.
- 9. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Алгоритм выбора оптимальных частот вращения вентиляторов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа с частотным приводом // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. С. 62-66.
- 10. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Схема управления секцией АВО газа с частотным электроприводом // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. С. 72-77.



- 11. Пашкин В.В. Эпюры распределения температуры вдоль секции АВО газа при дискретном и частотном регулировании электроприводов // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 271-276.
- 12. Пашкин В.В. Тепловые и аэродинамические характеристики АВО газа при различных способах управления // Современные проблемы разработки и внедрения АСУ ТП в нефтегазовом комплексе: матер. региональн. науч.-техн. семинара. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. С. 16-19.

#### References

- 1. Ustinov E.V. Raschet teplovogo KPD apparatov vozdushnogo okhlazhdeniya gaza s invertornym privodom [Calculation of Thermal Efficiency of Air-Cooled Gas Devices with Inverter Drive]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo gazovogo obshchestva Scientific Journal of the Russian Gas Society*, 2014, No. 4, pp. 93-97. [in Russian].
- 2. Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A., Mosin V.N., Pleshakov D.V. *Sposob avtomaticheskogo upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Method of Automatic Control of Gas Air Cooling Devices]. Patent RF, No. 2458256, 2010. [in Russian].
- 3. Kiyanov N.V., Kryukov O.V., Migacheva L.A., Mosin V.N., Pleshakov D.V. *Sistema upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Control System of Gas Air Cooling Devices]. Patent RF, No. 91605, 2010. [in Russian].
- 4. Kryukov O.V. *Sistema upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Control System of Gas Air Cooling Devices]. Patent RF, No. 106310, 2011. [in Russian].
- 5. Kiyanov N.V., Kryukov O.V., Zakharov P.A., Anikin D.A., Dadonov D.S. *Sistema upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Control System of Gas Air Cooling Devices]. Patent RF, No. 91606, 2011. [in Russian].



- 6. Firago B.I., Pavlyachik L.B. *Teoriya elektroprivoda* [Electric Drive Theory]. Minsk, Theperspective Publ., 2007. 585 p. [in Russian].
- 7. Pribytkov I.A. *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki* [Theoretical Foundations of Heat Engineering]. Moscow, Academy Publ., 2004. 464 p. [in Russian].
- 8. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlya EVM № 2015615234 «Programma rascheta optimal'nykh chastot vrashcheniya elektroprivodov AVO gaza v dvukhstupenchatoi skheme okhlazhdeniya gaza» [Certificate of Official Registration of Computer Program No. 2015615234 "Program for Calculating the Optimal Rotational Speeds of Electric ABO Gas Drives in a Two-Stage Gas Cooling Scheme]. M.: Rospatent Publ., 2015. [in Russian].
- 9. Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Algoritm vybora optimal'nykh chastot vrashcheniya ventilyatorov AVO gaza v dvukhstupenchatoi skheme okhlazhdeniya gaza s chastotnym privodom [The Algorithm for Choosing the Optimal Frequency of Rotation of the Fans AVO Gas in a Two-Stage Scheme Gas Cooling with Variable Speed Drive]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Ufa, USPTU Publ., 2015. pp. 62-66. [in Russian].
- 10. Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Skhema upravleniya sektsiei AVO gaza s chastotnym elektroprivodom [The Control Circuit Section AVO Gas, Frequency Electric]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Ufa, USPTU Publ., 2014. pp. 72-77. [in Russian].



- 11. Pashkin V.V. Epyury raspredeleniya temperatury vdol' sektsii AVO gaza pri diskretnom i chastotnom regulirovanii elektroprivodov [Diagrams of Temperature Distribution along the AVO Gas Section at Discrete and Frequency Control of Electric Drives]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Electrical Complexes and Systems»]. Ufa, USPTU Publ., 2012. pp. 271-276. [in Russian].
- 12. Pashkin V.V. Teplovye i aerodinamicheskie kharakteristiki AVO gaza pri razlichnykh sposobakh upravleniya [Thermal and Aerodynamic Characteristics of AVO Gas at Different Control Methods]. *Materialy regional'nogo nauchno-tekhnicheskogo seminara «Sovremennye problemy razrabotki i vnedreniya ASU TP v neftegazovom komplekse»* [Materials of the Regional Scientific and Technical Seminar «Modern Problems of Development and Implementation of APCS in the Oil and Gas Industry»]. Ufa, USPTU Publ., 2011. pp. 16-19. [in Russian].

### Сведения об авторах

#### **About the authors**

Пашкин Василий Валериевич, инженер-энергетик I категории ООО «Газпром добыча Ямбург», Газопромысловое управление, г. Новый Уренгой, Российская Федерация

Vasily V. Pashkin, First Category Power Engineer, Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Gas Production Directorate, Novy Urengoy, Russian Federation e-mail: V-Pashkin@mail.ru



Ивашкин Олег Николаевич, электромонтёр по ремонту и обслуживанию электрооборудования V разряда, ООО «Газпром добыча Ямбург», Газопромысловое управление, Россия, г. Новый Уренгой

Oleg N. Ivashkin, Electrician for Repair and Maintenance of Electrical Equipment of the V Category, Gazprom dobycha Yamburg LLC, Gas Production Directorate, Novy Urengoy, Russian Federation

Шабанов Виталий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Vitaliy A. Shabanov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru