

УДК 622.691.4.052.012

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SIMULATION  
OF THE DESIGN CHARACTERISTICS OF AIR COOLED GAS  
TO THE GAS MAINS**

**Иванов Э.С., Китаев С.В., Гадельшина А.Р.**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический  
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

**E.S. Ivanov, S.V. Kitaev, A.R. Gadelshina**

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,  
Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: Svkitayev@mail.ru**

**Аннотация.** Одной из приоритетных научно-технических проблем ОАО «Газпром» на 2011-2020 гг. является совершенствование технологий магистрального транспорта газа.

При транспортировке газа по магистральным газопроводам производится его компримирование на компрессорных станциях. Компримирование газа приводит к повышению его температуры на выходе компрессорной станции. Численное значение этой температуры определяется ее начальным значением на входе компрессорной станции и степенью сжатия газа. Повышенная температура газа на выходе станции приводит к разрушению изоляционного покрытия газопровода, а также к снижению подачи технологического газа и увеличению энергозатрат на компримирование из-за увеличения объемного расхода газа.

Для сохранения качества изоляции магистральных газопроводов и снижения затрат топливного газа на перекачку осуществляется его охлаждение в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа, при этом эффективность охлаждения газа зависит от технического состояния аппаратов и режима их работы.

В статье отмечено, что при отключенных вентиляторах АВО газа значительное влияние на расчеты оказывает погрешность измерения температур, при этом рассчитанная тепловая эффективность отличается от результатов с включенными вентиляторами на величину до 35%. При включенных вентиляторах (одном и двух) взаимное отклонение результатов по секциям не превышает 6%.

Предложен способ моделирования лучевых характеристик АВО газа, с применением функции Кобба-Дугласа, получены аналитические зависимости для расчета теплового потока для трех типов АВО газа Хадсон-Италия, Крезолуар, Нуово-Пиньоне при трех режимах работы аппаратов: вентиляторы выключены, работают 50% вентиляторов, работают 100% вентиляторов. Аналитические зависимости, полученные предлагаемым способом, могут использоваться в расчетных оптимизационных комплексах режимов работы компрессорных станций.

**Abstract.** One of the priorities of scientific and technical problems LLC «Gazprom» for 2011-2020 years is to improve technology of gas trunk line.

When transporting gas pipelines made being compressed at compressor stations. Compression of gas leads to an increase in its temperature at the outlet of the compressor station. The numerical values of the temperature are determined by its initial value at the inlet of the compressor station, and compression ratio. Increased gas temperature at the outlet station causes degradation of the insulating coating of the pipeline as well as reducing process gas and increasing the energy consumption for compressing the gas extraction flow rate.

To preserve the quality of the insulation of gas mains and cost reduction of the fuel gas pumping carried out its cooling air coolers with the cooling efficiency of gas depends on the technical condition of vehicles to operate them.

Article received that the fan is switched off a significant impact of air cooled gas on the calculation of the temperature measurement has an error while the thermal efficiency is designed different from the results of the fan is turned by up to 35 percent with fans on one or two sections does not exceed 6 percent.

A method for simulation of beam characteristics of air cooled gas using Cobb-Douglas function analytical dependences for calculation of heat flow for the three types of air cooled gas Hudson-Italia, Krezo-Luar, Nouva-Pinyon for the three modes of the device: fans are turned off, works 50 percent of the fans, works 100 percent of the fans.

Analytical according the inventive method can be used in computational optimization complexes modes of compressor stations.

**Ключевые слова:** компримирование газа, аппарат воздушного охлаждения газа, эффективность, моделирование лучевых характеристик.

**Key words:** gas compression, air cooling gas, effectiveness, modeling ray characteristics.

Для осуществления магистрального транспорта газа производится его компримирование на компрессорных станциях (КС). Компримирование газа приводит к повышению его температуры на выходе КС. Численное значение этой температуры определяется ее начальным значением на входе КС и степенью сжатия газа. Излишне высокая температура на выходе станции приводит к разрушению изоляционного покрытия газопровода, а также к снижению подачи технологического газа и увеличению энергозатрат на компримирование из-за увеличения объемного расхода газа.

Для охлаждения газа после компримирования устанавливаются аппараты воздушного охлаждения (АВО) на выходе КС. Параметры работы АВО газа определяются в соответствии с [1].

В процессе эксплуатации из-за наружного загрязнения трубных пучков снижается тепловая эффективность АВО газа.

Тепловая эффективность АВО газа есть отношение фактического теплового потока, отводимого от газа в АВО, к паспортному, определенному по характеристикам АВО при тех же условиях работы.

Для оценки эффективности работы АВО газа и определения тепловых потерь через поверхность радиаторов АВО необходимо проведение экспериментальных исследований по определению количества теплоты, отбираемой у компримированного газа в аппаратах воздушного охлаждения, в зависимости от разности температур газа и воздуха на входе в аппараты.

Расход охлаждаемого газа через единичный АВО определялся расчётным путём из соотношения числа параллельно работающих АВО и полного транспорта газа через КС. Расход газа по газопроводу определяется по стационарному расчетному комплексу, плотность – по данным лаборатории. Температура газа до и после АВО измеряется штатными ртутными термометрами, установленными в карманах, заполненных маслом.

Тепловая эффективность работы АВО устанавливается на основе сравнения фактического теплового потока, отводимого от газа в АВО, с паспортным, определенным для тех же условий работы аппарата по лучевым характеристикам АВО. Тепловая эффективность позволяет установить наличие сверхнормативного расхода электроэнергии на привод вентиляторов [2].

В таблице 1 представлен перечень параметров, одновременное измерение которых позволяет определить фактическую тепловую эффективность АВО.

Таблица 1. Измеряемые параметры

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Тип прибора
1	Дата и время измерения			
2	Температура наружного воздуха	$t_x$	°С	Штатный, термометр или термоанемометр
3	Расход транспортируемого газа	$G_r^u$	млн $\text{нм}^3/\text{ч}$	По ПК «Астра»
4	Плотность газа	$\rho_r$	$\text{кг}/\text{нм}^3$	По данным лаборатории
5	Температура газа до АВО	$t_{r1}$	°С	Штатный термометр
6	Температура газа после АВО	$t_{r2}$	°С	Штатный термометр
7	Давление газа до АВО	$P_{r1}$	$\text{кг}/\text{см}^2$	Штатный манометр

Измерения всех параметров, представленных в таблице 1, производятся для каждого АВО на трех режимах:

- 1) включены 2 вентилятора АВО;
- 2) включен 1 вентилятор АВО;
- 3) оба вентилятора АВО отключены.

Расчет погрешностей производится в соответствии с [3]. Погрешность измерений тепловой эффективности определяется погрешностью измерения теплового потока, отводимого в АВО:

$$Q = G_2 \cdot (t_{21} - t_{22}) \cdot \rho_2 \cdot c_{pm2}, \quad (1)$$

$$\Delta_\delta = \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta G_2}{G_2} + \frac{\Delta t_{21} + \Delta t_{22}}{t_{21} - t_{22}} + \frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} + \frac{\Delta c_{pm2}}{c_{pm2}}. \quad (2)$$

Таким образом, определение эффективности работы АВО газа возможно с погрешностью не менее 10%.

Тепловая эффективность АВО есть отношение фактического теплового потока, отводимого от газа в АВО, к паспортному.

Расчёт тепловой эффективности производится в следующей последовательности:

- 1 Определяется абсолютное давление газа до АВО, МПа.

$$P = 0,1 + P_{z1} \cdot 0,098. \quad (3)$$

2 Определяется средняя температура газа в АВО, К.

$$T = \frac{T_{z1} + T_{z2}}{2}. \quad (4)$$

3 Определяется средняя изобарная теплоёмкость охлаждаемого газа ( $c_{pmg}$ ) [4], кДж/(кг·К):

$$c_{pmg} = 6,3137 + 0,4312P - 0,031652T + 0,001306P^2 + 0,000058915T^2 - 0,00119542PT.$$

4 Определяется фактический тепловой поток, отводимый в АВО от газа к воздуху ( $Q_{\phi}$ ), кВт:

$$Q_{\phi} = \frac{G_z \cdot (t_{z1} - t_{z2}) \cdot \rho_z \cdot c_{pmz}}{0,0036}. \quad (5)$$

5 По паспортной лучевой характеристике АВО определяется тепловой поток, который может быть отведён новым незагрязнённым АВО ( $Q_n$ ), кВт.

6 Рассчитывается тепловая эффективность работы АВО при включенном одном ( $\delta_1$ ), включенных 2 ( $\delta_2$ ) и отключенных вентиляторах ( $\delta_0$ ). Этот параметр показывает степень загрязнения теплообменных поверхностей аппарата:

$$\delta = Q_{\phi} / Q_n, \quad (6)$$

где  $Q_{\phi}$  и  $Q_n$  – фактический и паспортный тепловой поток, переданный в АВО при соответствующем режиме, кВт.

7 Полученные расчётные данные наносятся на график в координатах  $Q - (t_{r1} - t_x)$ .

8 Устанавливается необходимость проведения очистки АВО. Для новых аппаратов  $\delta = 1$ . На эксплуатирующихся аппаратах воздушного охлаждения, которые содержатся в хорошем состоянии, коэффициент  $\delta > 0,9$ . Если  $\delta < 0,9$ , то АВО нуждается в промывке. На рисунке 1 приведено распределение тепловой эффективности АВО газа.

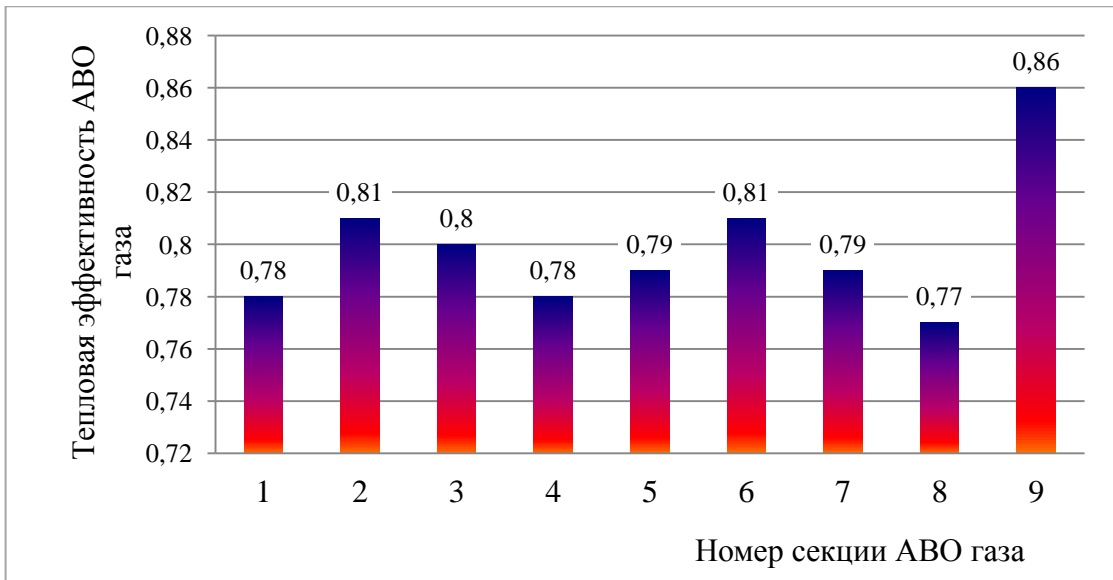


Рисунок 1. Распределение тепловой эффективности АВО газа

На рисунке 2 приведено распределение тепловой эффективности АВО газа при различном количестве включенных вентиляторов.

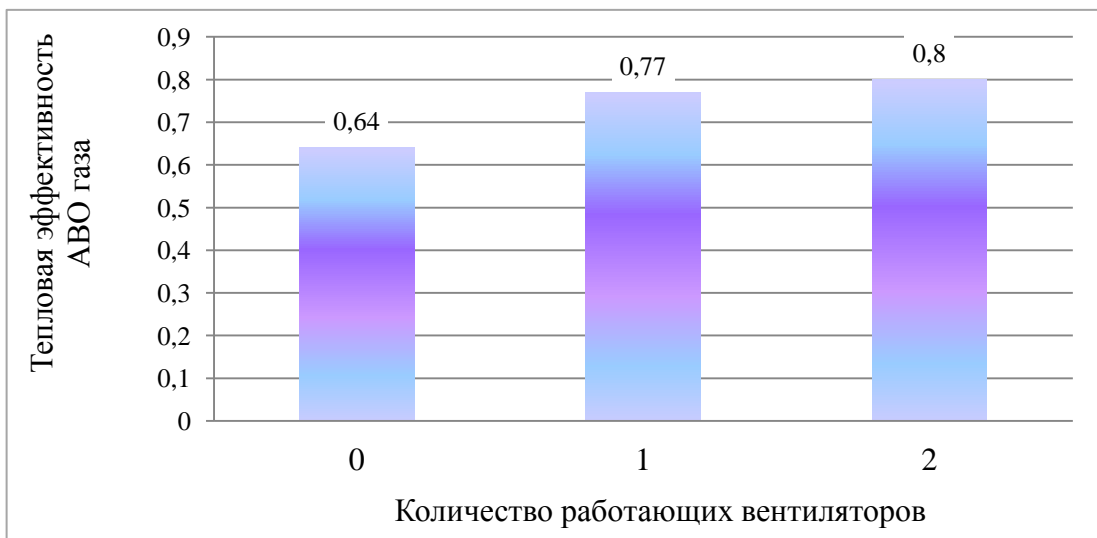


Рисунок 2. Усредненное по всем АВО значение тепловой эффективности

Из представленных рисунков 1, 2 следует, что при отключенных вентиляторах значительное влияние на расчеты оказывает погрешность измерения температур. При этом рассчитанная тепловая эффективность отличается от результатов с включенными вентиляторами на величину до 35%. При включенных вентиляторах (одном и двух) взаимное отклонение результатов по секциям не превышает 6%, поэтому эти результаты и будем использовать для дальнейшего анализа.

Потенциал повышения эффективности АВО газа можно выразить в процентах:

$$П = 100 - Э, \quad (7)$$

где Э – относительная эффективность работы АВО.

На рисунке 3 представлен потенциал повышения эффективности АВО газа по КС. Из рисунка 3 следует, что потенциал повышения эффективности варьируется в пределах от 14% до 23% в зависимости от секции АВО газа. Средний потенциал по КС составляет – 20%.

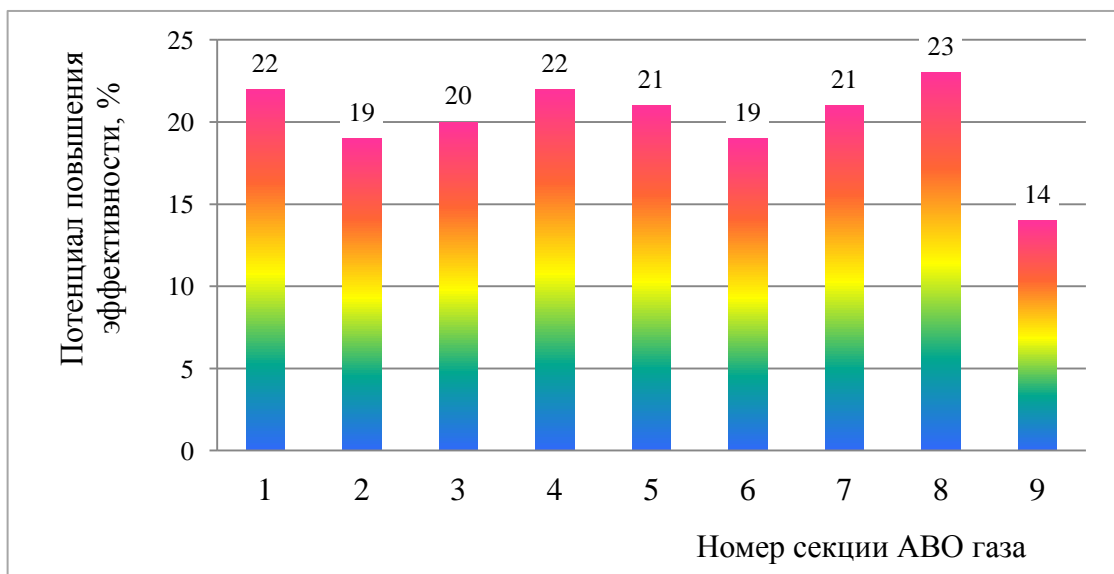


Рисунок 3. Потенциал повышения эффективности АВО газа

Таким образом, при отключенных вентиляторах значительное влияние на расчеты оказывает погрешность измерения температур, при этом тепловая эффективность отличается от результатов с включенными вентиляторами на величину до 35%. При включенных вентиляторах (одном и двух) взаимное отклонение результатов по секциям не превышает 6%. Таким образом, для оценки тепловой эффективности АВО газа необходимо использовать экспериментальные данные, полученные при включенных вентиляторах.

Проведенные исследования показали, что отклонение лучевых характеристик от паспортных достигает 20% при сроке эксплуатации АВО



газа 25-30 лет. В связи с этим, для повышения точности расчета режимов аппаратов необходимо использовать фактические расчетные характеристики АВО газа, что при реализации энергосберегающих технологий позволит получить существенный экономический эффект [5, 6, 7].

При расчете режимов работы АВО газа используются зависимости вида  $z = f(x, y)$ , которые представляются в графическом виде. В настоящее время в газотранспортных предприятиях для расчета режимов работы газотранспортных систем используются программные комплексы, для которых необходимы характеристики в аналитическом виде.

Для получения аналитических зависимостей применим метод Кобба-Дугласа, суть которого заключается в следующем [8, 9]. Функция Кобба-Дугласа является нелинейной по параметрам регрессионной моделью и в частном случае имеет вид:

$$f(x, y) = z = Ax^\alpha y^\beta, \quad (8)$$

где  $A, \alpha, \beta$  – коэффициенты аппроксимации;

$z, x, y$  – зависимая и независимые переменные в трехмерной системе координат.

В более общем виде, функции Кобба-Дугласа являются моделями сложных степенных регрессий:

$$y_i = f(x_1 \dots x_i) = \beta_0 \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot x_i^{\beta_i} \cdot \varepsilon_i. \quad (9)$$

Использование функций степенных регрессий имеет ряд удобных особенностей для моделирования криволинейных плоскостных характеристик газоперекачивающего оборудования. Геометрически область определения функции представляет собой конечную или бесконечную часть плоскости (линейной или криволинейной поверхности), ограниченную линиями, представляющими предельное состояние модели или системы.

Лучевая характеристика одного АВО газа «Хадсон-Италия» при 100% включенных вентиляторах приведена на рисунке 4.

Аналогичный вид имеют лучевые характеристики АВО газа других типов при различном числе работающих вентиляторов. Применяя метод Кобба-Дугласа сложную характеристику АВО газа можно аппроксимировать в виде регрессионной статистической модели:

$$t_2 = A_{ABO} \cdot G_{ABO}^{\alpha_{ABO}} \cdot t_1^{\beta_{ABO}} \cdot t_A^{\gamma_{ABO}}, \quad (10)$$

$$Q_{ABO} = G_{ABO} \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (11)$$

$$Q_{ABO} = G_{ABO} \cdot c_p \cdot (A_{ABO} \cdot G_{ABO}^{\alpha_{ABO}} \cdot t_1^{\beta_{ABO}} \cdot t_A^{\gamma_{ABO}} - t_1). \quad (12)$$

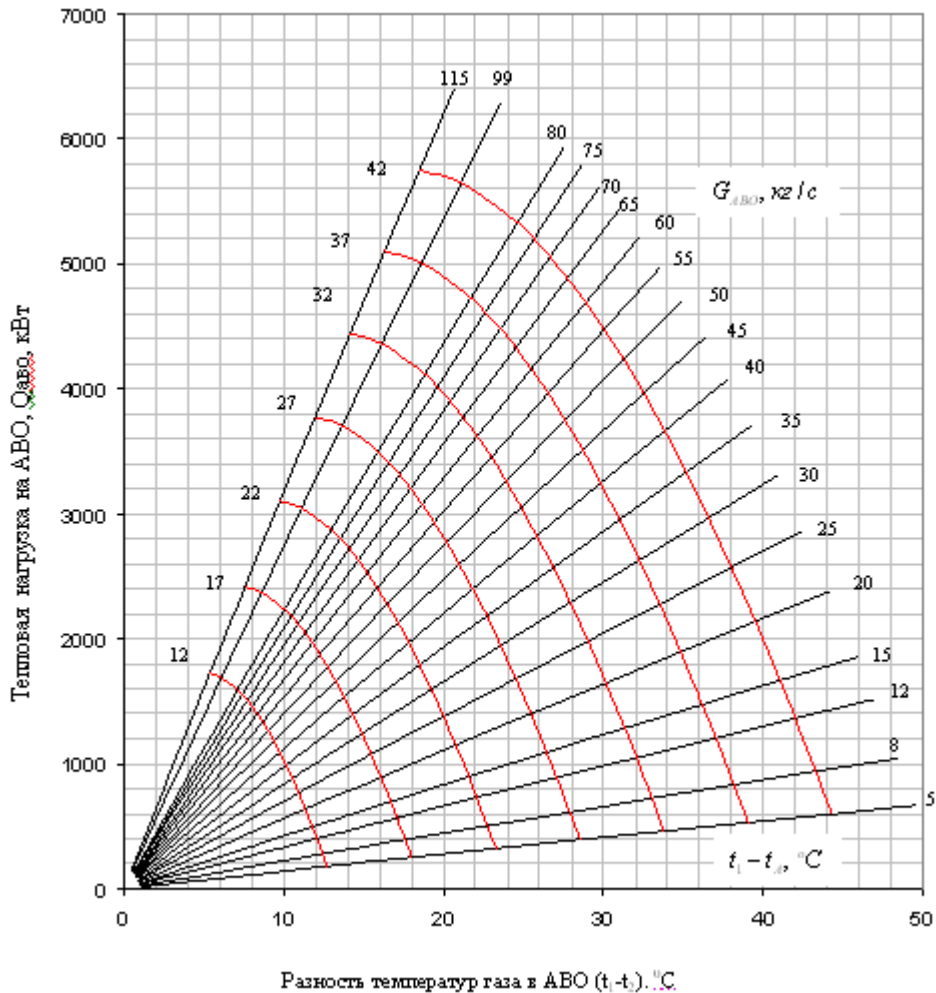


Рисунок 4. Лучевая характеристика одного АВО газа «Хадсон-Италия» при 100% включенных вентиляторах

Коэффициенты аппроксимации индивидуальные для каждого типа АВО газа (в том числе коэффициенты различны для АВО одного типа в зависимости от количества включенных вентиляторов) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты построения моделей АВО газа на основе обработки лучевых характеристик

Тип АВО газа	Количество вентиляторов в работе	Модель и коэффициенты аппроксимации			
		$A_{ABOi}$	$\alpha_{ABOi}$	$\beta_{ABOi}$	$\gamma_{ABOi}$
Хадсон-Италия	0	0,0624	-0,000267	0,618	0,875
	1 (50%)	1,456	-0,0000695	0,161	0,772
	2 (100%)	0,00946	-0,0000125	0,0289	1,802
Крезо-Луар	0	0,0562	-0,000286	0,661	0,852
	1 (50%)	0,827	-0,0000795	0,184	0,849
	2 (100%)	0,376	-0,0000377	0,0874	1,086
Нуово-Пиньоне	0	1,061	-0,0127	1,0205	-0,0253
	1 (50%)	0,0811	-0,0000618	0,143	1,305
	2 (100%)	0,323	-0,0000195	0,0451	1,156

Поведенные исследования показали, что относительная погрешность предлагаемой модели не превышает 1,5%.

## Выводы

1 Установлено, что при отключенных вентиляторах значительное влияние на расчеты оказывает погрешность измерения температур, при этом рассчитанная тепловая эффективность отличается от результатов с включенными вентиляторами на величину до 35%. При включенных вентиляторах (одном и двух) взаимное отклонение результатов по секциям не превышает 6%. Для оценки тепловой эффективности АВО газа необходимо использовать экспериментальные данные, полученные при включенных вентиляторах.

2 Предложен способ моделирования лучевых характеристик АВО газа. Получены аналитические зависимости для расчета теплового потока для трех типов АВО газа Хадсон-Италия, Крезолуар, Нуово-Пиньоне при трех режимах работы аппаратов: вентиляторы выключены, работают 50% вентиляторов, работают 100% вентиляторов. Аналитические зависимости, полученные предлагаемым способом, могут использоваться в расчетных оптимизационных комплексах режимов работы КС.

### **Список используемых источников**

1 Методика расчёта аппаратов воздушного охлаждения газа. М.: ВНИИГАЗ, 1982. 31 с.

2 Справочник по электроснабжению промышленных предприятий /Под ред. Федорова А.А., Сербиновского Г.В. в 2 кн. М.: Энергия, 1973. 528 с.

3 ГОСТ Р 50.1.025-2000. Методы оценки точности и воспроизводимости результатов испытаний по оценке показателей энергетической эффективности. М.: ВНИИНМАШ, 2000. 22 с.

4 СТО «Газпром» 2-1.20-114-2007. Методика энергоаудита газотранспортной системы. М.: ВНИИГАЗ, 2007. 54 с.

5 Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Методы повышения энергетической эффективности трубопроводного транспорта природного газа. СПб.: Недра, 2008. 439 с.

6 Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Перспективы энергоресурсосбережения в условиях длительно эксплуатируемой газотранспортной системы // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. № 4. С. 9-13.

7 Байков И.Р. Кузнецова М.И., Китаев С.В. Определение показателей энергоэффективности в магистральном транспорте газа // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2013. № 3. С. 46-49.

8 Интрилигатор М. Математические методы и экономическая теория. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1975. 607 с.

9 Иванов Э.С. Моделирование режимов работы циклонных пылеуловителей на компрессорных станциях магистрального транспорта газа с использованием функций Кобба-Дугласа // Нефтегазовое дело. 2012. Т.10. № 1. С. 47-49.

## References

1 Metodika raschyota apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya gaza. М.: VNIIGAZ, 1982. 31 s. [in Russian].

2 Spravochnik po ehlektrosnabzheniyu promyshlennyh predpriyatij / Pod red. A.A. Fedorova, G.V. Serbinovskogo. Kn. 1 i 2. М.: Energiya, 1973. 528 s. [in Russian].

3 GOST R 50.1.025-2000. Metody ocenki tochnosti i vosproizvodimosti rezul'tatov ispytaniy po ocenke pokazatelej ehnergeticheskoy ehffektivnosti.- М.: VNIINMASH, 2000. 22 s. [in Russian].

4 STO «Gazprom» 2-1.20-114-2007. Metodika ehnergoaudita gazotransportnoj sistemy. М.: VNIIGAZ, 2007. 54 s. [in Russian].

5 Bajkov I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. Metody povysheniya ehnergeticheskoy ehffektivnosti truboprovodnogo transporta prirodnogo gaza. - SPb.: Nedra, 2008. 439 s. [in Russian].

6 Bajkov I.R., Kitaev S.V., SHammazov I.A. Perspektivy ehnergoresursosberezheniya v usloviyah dlitel'no ehkspluatiruemoj gazotransportnoj sistemy// Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya, 2012. № 4. S. 9-13. [in Russian].

7 Bajkov I.R. Kuznecova M.I., Kitaev S.V. Opredelenie pokazatelej ehnergoehffektivnosti v magistral'nom transporte gaza. // Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya, 2013. № 3. s. 46-49. [in Russian].

8 Intriligator M. Matematicheskie metody i ehkonomicheskaya teoriya. Per. s angl. М.: Progress, 1975. 607 s. [in Russian].

9 Ivanov E.S. Modelirovanie rezhimov raboty ciklonnyh pyleulovitelej na kompressornyh stanciyah magistral'nogo transporta gaza s ispol'zovaniem funkcij Kobba-Duglasy// Neftegazovoe delo, 2012. T. 10. № 1. S. 47-49. [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Иванов Э.С., заместитель начальника ПДС ООО «Газпром Трансгаз Уфа», г. Уфа, Российская Федерация

E.S. Ivanov, Deputy Head of the Production and Dispatch Service LLC “Gazprom Transgaz Ufa”, Ufa, the Russian Federation

Китаев С.В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

S.V. Kitaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Transport and Storage of Oil and Gas”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: Svkitayev@mail.ru

Гадельшина А.Р., аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.R. Gadelshina, Post-graduate Student of the Chair “Transport and Storage of Oil and Gas”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation