

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

*А.И. Данилушкин<sup>1</sup>, В.Г. Крайнов<sup>2</sup>, Л.А. Мигачева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус

<sup>2</sup> ООО «Газпром трансгаз Югорск»

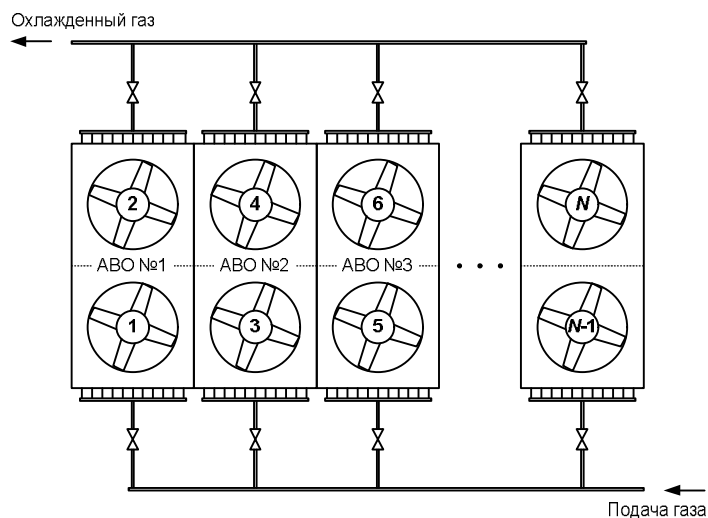
628260, Тюменская обл., Ханты-Мансийский автономный округ, г. Югорск, ул. Мира, 15

*В статье сформулирована задача оптимизации стационарного распределения нагрузки между аппаратами установки охлаждения газа. Модель процесса теплообмена в аппарате воздушного охлаждения учитывает пространственное распределение температуры потока по длине теплообменного аппарата. Предложена математическая модель установки охлаждения газа, учитывающая взаимное влияние вентиляторов соседних АВО на эффективность охлаждения.*

**Ключевые слова:** оптимизация распределения нагрузки, установка охлаждения газа, пространственное распределение температуры, математическая модель, задача математического программирования.

### Введение

Применение аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа при его транспортировке является неотъемлемой частью технологического процесса. Типовое решение по охлаждению газа после компримирования представляет собой установку из группы параллельно включенных аппаратов (см. рисунок).



$N$  – количество вентиляторов установки охлаждения газа

Типовая схема включения АВО газа

*Александр Иванович Данилушкин – д.т.н., профессор.*

*Валерий Геннадьевич Крайнов – соискатель научной степени к.т.н.*

*Людмила Алексеевна Мигачева – к.т.н., доцент*

Каждый аппарат представляет собой теплообменник с перекрестным направлением потоков [1]. Поток охлаждающего воздуха сквозь несколько слоев оребренных труб, по которым прокачивается охлаждаемый газ, обеспечивается либо за счет естественной вентиляции при достаточно низкой температуре охлаждающего воздуха, либо за счет включения вентиляторов АВО. В состав каждого АВО чаще всего входят два вентилятора. Существуют конструктивные решения и с тремя вентиляторами в составе АВО. Каждый вентилятор АВО включается независимо.

Возможность управления отдельными вентиляторами установки охлаждения позволяет говорить о необходимости поиска такой конфигурации включаемых аппаратов, чтобы необходимый отбор тепла обеспечивался с минимальным расходом электроэнергии. Эту задачу можно сформулировать в терминах теории математического программирования как задачу оптимального распределения взаимозаменяемых ресурсов. Для ее корректной постановки необходимо определить зависимость количества тепла, отбираемого каждым блоком АВО, от режимов работы установки.

### Математическая модель процесса охлаждения газа

Процесс теплообмена в отдельном блоке АВО в установившемся режиме, с учетом ряда допущений о характере потоков [2], может быть описан уравнением теплового баланса [3]

$$v \frac{d\theta(x)}{dx} = \frac{2\alpha}{c\gamma R} \cdot (\theta_{mp}(x) - \theta(x)), \quad 0 < x < L, \quad \theta(0) = g, \quad (1)$$

где  $\theta(x)$  – распределение температуры потока газа по длине трубы,  $\theta_{mp}(x)$  – распределение температуры трубы по длине,  $v$  – скорость потока газа,  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена между внутренней стенкой трубы и газом,  $c$  – теплоемкость газа,  $\gamma$  – плотность газа,  $R$  – внутренний радиус трубы теплообменника,  $L$  – длина оребренных труб блока АВО,  $g$  – температура газа на входе блока. Введя коэффициент увеличения поверхности теплообмена аппарата  $\psi$ ,

$$\frac{S_B}{S} = \psi, \quad (2)$$

где  $S$ ,  $S_B$  – площади соприкосновения газа с внутренней стенкой трубы и воздуха с оребрением трубы соответственно, из (1) можно исключить температуру трубы [3]

$$v \frac{d\theta(x)}{dx} = \beta \cdot (T - \theta(x)). \quad (3)$$

Здесь  $\beta = \frac{2 \cdot \alpha}{c \cdot \gamma \cdot R} \cdot \frac{\alpha_B \cdot \psi}{\alpha + \alpha_B \cdot \psi}$  – приведенный коэффициент конвективного теплообмена, учитывающий геометрию поверхностей теплообмена между потоками воздуха и газа,  $\alpha_B$  – коэффициент конвективного теплообмена между оребрением трубы и воздухом,  $T$  – температура воздуха. В более общем случае коэффициент  $\beta$  будет зависеть также от термического сопротивления загрязнений на внешних и внутренних поверхностях теплообменного аппарата [4].

Решение уравнения (3) определяется выражением

$$\theta(x) = g \cdot \exp[-\beta x/v] + T \cdot (1 - \exp[-\beta x/v]). \quad (4)$$

Подставив в (4)  $x = L$ , получим температуру газа на выходе блока АВО.

## Постановка задачи оптимального распределения нагрузки

Предлагается сформулировать задачу оптимального распределения нагрузки между блоками установки за счет включения минимального количества вентиляторов исходя из учета индивидуальных характеристик каждого блока АВО установки.

Эффективность стационарного режима работы аппаратов воздушного охлаждения зависит от целого ряда факторов:

- температуры газа на входе блока АВО;
- расхода газа через АВО;
- температуры охлаждающего воздуха;
- степени загрязненности рубашки оребрения труб теплообменного аппарата;
- степени загрязненности внутренних поверхностей труб аппарата;
- режима работы вентилятора блока АВО (включен/выключен);
- взаимного расположения блоков АВО всей установки;
- режима работы вентиляторов соседних блоков аппаратов.

Все перечисленные факторы можно разделить на три класса:

- общие для всех АВО установки характеристики режима работы;
- характеристики конкретного блока;
- влияние режимов работы соседних вентиляторов.

Температура воздуха и расход газа входят в выражение (4) в явном виде и могут быть учтены с помощью параметров  $T$  и  $\nu$  соответственно. Примем, что их значения однозначно определяются внешними факторами и не зависят от количества работающих вентиляторов, поскольку охлаждаемый газ протекает по всем блокам установки независимо от того, включен вентилятор или нет.

Температура газа на входе блока АВО (параметр  $g$  в (4)) зависит от того, в каком ряду находится блок. Если блок АВО находится в первом ряду установки (нечетный номер, рис. 1), то температура газа на входе блока АВО равна температуре газа на входе установки. Для блока во втором ряду температура газа на входе определяется уже режимом работы предыдущего блока.

Отложения загрязнений на внешних и внутренних поверхностях теплообмена АВО влияют на значение коэффициента  $\beta$  и должны быть определены для каждого блока установки индивидуально. Кроме того, на значение коэффициента  $\beta$  влияют режим работы вентилятора блока (включен/выключен) и режимы работы вентиляторов соседних с ним блоков. Разряжение, создаваемое ими, может привести к возникновению рециркуляции теплого воздуха через теплообменный аппарат и уменьшению коэффициента  $\beta$ . Поскольку каждый из вентиляторов может находиться лишь в одном из двух состояний: включен или выключен, коэффициент  $\beta$  может рассматриваться как сумма коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов:

$$\beta_i = \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j . \quad (5)$$

Здесь  $\beta_i$  – приведенный коэффициент конвективного теплообмена для  $i$ -того блока установки;  $\beta_{i0}$  – значение коэффициента  $i$ -того блока при выключенном вентиляторе;  $N$  – количество блоков в установке;  $b_{ij}$  – коэффициенты, учитывающие влияние остальных блоков установки на коэффициент  $\beta_i$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $h_i$  – признак режима работы вентилятора  $i$ -того блока,  $h_i = \overline{0, 1}$ .

Подставив (5) в (4), для температуры на выходе  $i$ -того блока получим:

$$\theta_i = \theta_i(L) = g_i \cdot \exp \left[ - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] + T \cdot \left( 1 - \exp \left[ - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] \right). \quad (6)$$

С учетом попарного последовательного включения блоков АВО расчет температуры газа на выходе установки охлаждения будет осуществляться следующим образом:

$$\theta_i = g_{inp} \cdot \exp \left[ - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] + T \cdot \left( 1 - \exp \left[ - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] \right), \quad (7)$$

$$i \in \{1, 3, \dots, N-1\};$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} \cdot \exp \left[ - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] + T \cdot \left( 1 - \exp \left[ - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] \right), \quad (8)$$

$$i \in \{2, 4, \dots, N\};$$

$$\theta_{out} = \frac{1}{N/2} \sum_{k=1}^{N/2} \theta_{2 \cdot k} \quad (9)$$

Здесь  $g_{inp}$  – температура газа на входе установки охлаждения,  $\theta_{out}$  – температура газа на выходе установки охлаждения.

Подставив выражение (7) для температуры газа после первого ряда АВО в выражение (8) для температуры газа после второго ряда АВО, получим

$$\theta_i = g_{inp} \cdot \exp \left[ - \left( \beta_{i-1,0} + \sum_{j=1}^N b_{i-1,j} h_j \right) \frac{L}{v} - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] + T \cdot \left( 1 - \exp \left[ - \left( \beta_{i-1,0} + \sum_{j=1}^N b_{i-1,j} h_j \right) \frac{L}{v} - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right] \right), \quad i \in \{2, 4, \dots, N\}. \quad (10)$$

Тогда задача оптимального распределения нагрузки для модели (10), (9) может быть сформулирована следующим образом. Требуется минимизировать количество работающих вентиляторов секций установки охлаждения таким образом, чтобы температура газа на выходе  $\theta_{out}$  была не более заданной  $\theta_{given}$ :

$$\min \left( \sum_{j=1}^N h_j \mid \theta_{out} \leq \theta_{given}, \quad h_j = \{0, 1\}, \quad j \in \{1, 2, \dots, N\} \right). \quad (11)$$

С учетом нелинейных зависимостей в (10) задачу следует отнести к классу задач нелинейного программирования.

### Переход к задаче линейного программирования

Задача (10), (9) может быть линеаризована с помощью разложения экспоненты в ряд Тейлора. Ограничившись двумя первыми слагаемыми разложения для (10), получаем:

$$\theta_i \cong g_{inp} \cdot \left( 1 - \left( \beta_{i-1,0} + \sum_{j=1}^N b_{i-1,j} h_j \right) \frac{L}{v} - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right) +$$

$$+ T \cdot \left( 1 - \left( 1 - \left( \beta_{i-1,0} + \sum_{j=1}^N b_{i-1,j} h_j \right) \frac{L}{v} - \left( \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N b_{ij} h_j \right) \frac{L}{v} \right) \right), \quad i \in \{2, 4, \dots, N\}.$$

Раскрыв скобки и сгруппировав коэффициенты при  $h_j$ , можем записать

$$\theta_i \cong g_{inp} + (T - g_{inp}) \cdot \frac{L}{v} \cdot \left( (\beta_{i-1,0} + \beta_{i0}) + \sum_{j=1}^N (b_{i-1,j} + b_{ij}) h_j \right), \quad i \in \{2, 4, \dots, N\}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в (9), можно записать для температуры газа на выходе

$$\theta_{out} = g_{inp} + (T - g_{inp}) \cdot \frac{L}{v} \cdot \frac{1}{N/2} \cdot \left( \sum_{k=1}^{N/2} (\beta_{2k-1,0} + \beta_{2k,0}) + \sum_{j=1}^N h_j \sum_{k=1}^{N/2} (b_{2k-1,j} + b_{2k,j}) \right) =$$

$$= g_{inp} + (T - g_{inp}) \cdot \frac{L}{v} \cdot \frac{1}{N/2} \cdot \left( \sum_{i=1}^N \beta_{i0} + \sum_{j=1}^N h_j \sum_{i=1}^N b_{ij} \right). \quad (14)$$

Выражение (14) может использоваться как функция условия при решении задачи бинарного целочисленного линейного программирования [5], в которой варьируемые переменные принимают только два значения: 0 и 1.

$$\min \left( \sum_{j=1}^N h_j \mid \mathbf{A}\mathbf{h} \leq \mathbf{C} \right. \\ \left. h_j = \{0, 1\}, \quad j \in \{1, 2, \dots, N\} \right), \quad (15)$$

где

$$\mathbf{A} = (T - g_{inp}) \cdot \frac{L}{v} \cdot \frac{1}{N/2} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N b_{i1} \quad \sum_{i=1}^N b_{i2} \quad \sum_{i=1}^N b_{i3} \quad \dots \quad \sum_{i=1}^N b_{iN} \right]_{1 \times N}, \quad (16)$$

$$\mathbf{h} = [h_j]_{N \times 1}, \quad (17)$$

$$\mathbf{C} = \left[ \theta_{given} - g_{inp} - (T - g_{inp}) \cdot \frac{L}{v} \cdot \frac{1}{N/2} \cdot \sum_{i=1}^N \beta_{i0} \right]_{1 \times 1}. \quad (18)$$

В постановке (15)-(18) задача может быть решена известными методами решения задач целочисленного программирования [5-7].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коршак А.А., Шаммазов А.М.* Основы нефтегазового дела. Учебник для вузов. – Уфа.: ДизайнПолиграфСервис, 2001. – 544 с.
2. *Девятков Б.Н., Демиденко Н.Д.* Теория и методы анализа управляемых распределенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 272 с.
3. *Алимов С.В., Данилушкин И.А., Мосин В.Н.* Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. Вып. №2(26), 2010. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 178-186.
4. *Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т.1 /Пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 549 с.*

5. *Финкельштейн Ю.Ю.* Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. – М.: Наука, 1976. – 265 с.
6. *Ковалев М.М.* Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). – Минск: Изд-во БГУ, 1977. – 192 с.
7. *Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В.* Курс методов оптимизации: Учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 368 с.

*Статья поступила в редакцию 7 июня 2011 г.*

## **OPTIMIZATION OF STATIONARY DISTRIBUTION OF LOAD OF AIR COOLERS OF GAS**

***A.I. Danilushkin<sup>1</sup>, V.G. Kraynov<sup>2</sup>, L.A. Migacheva<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

<sup>2</sup> «Gazprom transgaz Yugorsk» Ltd  
15, Mira st., Yugorsk, Tyumen Reg, 628260

*The paper stated the problem of optimizing the stationary distribution of load for set of air-coolers of gas. The model of heat transfer process in the air cooler of gas takes into account the spatial distribution of temperature along the length of heat exchanger. The mathematical model of the set of air coolers of gas that takes into account the mutual influence of neighbor-fan air coolers on their cooling efficiency is proposed.*

***Keywords:*** optimization of load distribution, gas cooler, the spatial distribution of temperature, the mathematical model, a mathematical programming problem.

---

*Alexander I. Danilushkin - Doctor of Technical Sciences, Professor.*

*Valeriy G. Kraynov - PhD Candidate.*

*Lyudmila A. Migacheva - Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*