

УДК 681.5.015

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА*

И.А. Данилушкин, А.А. Желандинова, С.А. Колпациков, В.К. Тянь

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Статья посвящена разработке и сравнению статических моделей установки охлаждения газа. В качестве исходных данных использовались мгновенные значения технологических параметров работы установки, фиксировавшиеся в течение шести лет с двухчасовым интервалом. Выполнен предварительный отбор данных, соответствующих рабочему режиму. Реализованы модели, базирующиеся на регрессионном анализе, решении уравнения теплопередачи, алгоритме ближайшего соседа. Проведена оценка погрешности полученных моделей.

Ключевые слова: установка охлаждения газа, статический режим, регрессионный анализ, аналитическая модель, прецедентная модель, метод ближайшего соседа.

Транспортировка газа по магистральным трубопроводам осуществляется с помощью компрессорных станций, которые повышают давление газа. Вместе с давлением растет и температура газа, поэтому после компрессорного цеха газ поступает в установку охлаждения газа (УОГ), состоящую из нескольких параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1]. Для интенсификации отвода тепла АВО газа оснащены вентиляторами с электроприводами.

Задача повышения эффективности транспортировки газа может быть решена за счет перераспределения энергозатрат между несколькими смежными компрессорными станциями, что приведет к суммарному снижению потребления энерго-ресурсов. Для решения задачи в такой постановке необходима комплексная модель процесса транспортировки газа, описывающая все основные технологические процессы: компримирование, охлаждение, транспортировку по линейному участку. Эта статья посвящена вопросам моделирования установки охлаждения газа.

Функционирование УОГ определяется множеством факторов, часть из которых представляет собой неизменяемые значения параметров окружающей среды, а часть определяется состоянием технологического оборудования.

В статье обсуждаются результаты создания различных моделей УОГ по данным эксплуатации технологического объекта. В качестве исходных данных выступают:

– объемный расход газа через УОГ;

**Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-08-03053-а.*

Иван Александрович Данилушкин (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управления в технических системах».

Александра Андреевна Желандинова, аспирант.

Сергей Александрович Колпациков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управления в технических системах».

Владимир Константинович Тянь (д.т.н.), заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт».

- давление газа перед УОГ;
- температура газа на входе УОГ;
- температура газа на выходе УОГ;
- температура воздуха;
- количество включенных вентиляторов.

Данные получены по результатам шести лет эксплуатации установки, мгновенные значения параметров регистрировались с двухчасовым интервалом. Длительность переходных процессов при смене режима работы УОГ не превышает пяти минут, поэтому принимается, что имеющиеся данные соответствуют стационарным состояниям.

В процессе предварительного анализа данных были исключены ситуации, когда отсутствовал расход газа через установку, а также ситуации, при которых вентиляторы должны быть выключены:

- температура воздуха выше температуры газа на входе;
- температура газа на выходе выше температуры газа на входе.

Цель создания модели – определение числа включенных вентиляторов для достижения заданных параметров функционирования УОГ или максимально возможного приближения к ним. В дальнейшем полученная модель будет использоваться для решения задач повышения энергоэффективности процесса транспортировки газа.

Таким образом, в качестве выхода модели выступает количество включенных вентиляторов, которое определяется по параметрам газа на входе УОГ (расход, давление, температура), температуре газа на выходе УОГ и температуре воздуха.

Проведен сравнительный анализ нескольких моделей.

1. Регрессионная модель [2] предполагает линейную зависимость выхода модели от всех входов. Коэффициенты зависимости рассчитаны согласно выражению

$$\mathbf{k} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B}, \quad (1)$$

где $\mathbf{B} = [N_{ABO_i}]_{n \times 1}$ – вектор, содержащий сведения о количестве включенных вентиляторов АВО в i -той ситуации, $i = \overline{1, n}$, n – количество ситуаций, \mathbf{A} – матрица, составленная из векторов входных параметров модели:

$$\mathbf{A} = [1 \quad F_i \quad P_i \quad \theta_{in_i} \quad \theta_{out_i} \quad T_{air_i}]_{n \times 6}, \quad (2)$$

где для каждой i -той ситуации известны: F_i – объемный расход газа через УОГ, P_i – давление газа на входе УОГ, θ_{in_i} , θ_{out_i} – температура газа на входе и выходе установки, T_{air_i} – температура воздуха.

Полученные коэффициенты $\mathbf{k} = [k_i]_{6 \times 1}$ используются для расчета количества включенных вентиляторов при заданных условиях работы УОГ и, в частности, для оценки погрешности модели по имеющимся данным:

$$\mathbf{B}^* = \mathbf{A} \cdot \mathbf{k}, \quad (3)$$

$$Err = \sum_{i=1}^n h(|\text{round}(b_i^*) - N_{ABO_i}|), \quad (4)$$

где $\text{round}(x)$ – функция округления до ближайшего целого числа, $h(x)$ – функция Хевисайда. Для более эффективного анализа рассчитывается еще один критерий: количество существенных ошибок модели, когда рассчитанное количество включенных вентиляторов отличается от количества, соответствующего реальной ситуации, более чем на один:

$$ErrS = \sum_{i=1}^n h\left(\left|\text{round}(b_i^*) - N_{ABO_i}\right| - 1\right). \quad (5)$$

После анализа результатов предпринята попытка повысить точность модели путем введения квадратичной зависимости:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & F_i & P_i & \theta_{in_i} & \theta_{out_i} & T_{air_i} & F_i^2 & P_i^2 & \theta_{in_i}^2 & \theta_{out_i}^2 & T_{air_i}^2 & F_i P_i & \dots \\ F_i \theta_{in_i} & F_i \theta_{out_i} & F_i T_{air_i} & P_i \theta_{in_i} & P_i \theta_{out_i} & P_i T_{air_i} & \theta_{in_i} \theta_{out_i} & \theta_{in_i} T_{air_i} & \theta_{out_i} T_{air_i} \end{bmatrix}_{n \times 21}. \quad (6)$$

2. Аналитическая модель. При рассмотрении процесса охлаждения газа как процесса с распределенными параметрами температура на выходе АВО может быть описана уравнением [3]

$$\theta_{out} = \theta_{in} \cdot \exp[-\beta L/v] + T_{air} \cdot (1 - \exp[-\beta L/v]), \quad (7)$$

где L – длина трубок теплообменных аппаратов, v – скорость потока, β – коэффициент, зависящий от физических параметров газа и воздуха, конструктивных параметров теплообменника (диаметр трубки, тип оребрения и проч.), а также от количества включенных вентиляторов. Исходя из (7) для каждой i -той ситуации может быть рассчитано значение коэффициента β_i :

$$\beta_i = -\frac{L}{v_i} \ln\left(\frac{\theta_{out_i} - T_{air_i}}{\theta_{in_i} - T_{air_i}}\right), \quad i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где скорость потока для i -той ситуации рассчитывается через объемный расход газа и давление:

$$v_i = \frac{F_i P_{ny}}{\theta_{ny}} \frac{(\theta_{in_i} + 273,15)}{P_i} \frac{1}{S_{mp} N_{mp} N_{yOG}}, \quad (9)$$

P_{ny} – давление при нормальных условиях, $1,033227237 \text{ кг/см}^2$, θ_{ny} – температура газа при нормальных условиях, $293,15 \text{ К}$, S_{mp} – площадь сечения трубки аппарата воздушного охлаждения (АВО) газа, N_{mp} – количество трубок в аппарате АВО, N_{yOG} – количество аппаратов в установке охлаждения газа.

По результатам активного эксперимента известно, что зависимость коэффициента β для всей установки охлаждения газа от числа включенных вентиляторов N_{ABO} при прочих неизменных параметрах близка к линейной:

$$\beta(N_{ABO}) = h_0 + h_1 N_{ABO}. \quad (10)$$

Выражая N_{ABO} из (10) через значение β , рассчитанное по выражению (8), получим

$$N_{ABO_i} = \frac{1}{h_1} \left(-\frac{L}{v_i} \ln\left(\frac{\theta_{out_i} - T_{air_i}}{\theta_{in_i} - T_{air_i}}\right) - h_0 \right). \quad (11)$$

Значения коэффициентов h_0, h_1 можно получить с помощью регрессионного анализа (1), составив матрицы

$$\mathbf{k}_4 = \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & N_{ABO_i} \end{bmatrix}_{n \times 2}, \mathbf{B}_4 = [\beta_i]_{n \times 1}. \quad (12)$$

Коэффициент β зависит не только от количества включенных вентиляторов, но и физических параметров газа и воздуха, которые тоже могут быть включены в регрессионную модель (12) в качестве параметров за счет введения квадратичной зависимости коэффициентов регрессии от температур:

$$h_j(\theta_{in}, \theta_{out}, T_{air}) = h_{j0} + h_{j1}\theta_{in} + h_{j2}\theta_{out} + h_{j3}T_{air} + h_{j4}\theta_{in}^2 + h_{j5}\theta_{out}^2 + h_{j6}T_{air}^2 + \\ + h_{j7}\theta_{in}\theta_{out} + h_{j8}\theta_{in}T_{air} + h_{j9}\theta_{out}T_{air}, \quad j = \overline{0, 1}. \quad (13)$$

3. Метод ближайшего соседа. Данные о функционировании установки в течение длительного времени могут использоваться для создания прецедентной модели с помощью метода ближайшего соседа [4–6]. Для предъявленной ситуации модель находит ближайшую аналогичную ситуацию, существующую в эталонной выборке, и в качестве выхода возвращает число включенных вентиляторов в найденном аналоге. Ближайшая ситуация определяется по расстоянию в пространстве входных параметров модели.

В качестве эталонной выборки используются данные из множества $M = \{(\mathbf{x}_i, N_{ABO_i})\}$, где $\mathbf{x}_i = [F_i \ P_i \ \theta_{in_i} \ \theta_{out_i} \ T_{air_i}]^T$ – вектор входных параметров соответствующий i -той ситуации.

Оценка точности прецедентной модели выполнялась по эталонной выборке с помощью следующего алгоритма. Из эталонной выборки M извлекалась пара $(\mathbf{x}_j, N_{ABO_j})$ и предъявлялась на вход прецедентной модели, которая в качестве эталонной выборки использовала выборку M^* :

$$M^* = M \setminus \{(\mathbf{x}_i, N_{ABO_i}) : \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_j\}. \quad (14)$$

Ближайший сосед определялся по минимальному расстоянию между предъявленным вектором \mathbf{u} и вектором эталонной выборки \mathbf{x} , которое рассчитывалось как

$$\rho(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = \sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x})^T \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{x})}. \quad (15)$$

Повышение точности модели, реализованной с помощью метода ближайшего соседа, выполнено с помощью подбора коэффициентов, определяющих вклад каждого входного параметра в расчет расстояния:

$$\rho_w(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sqrt{\sum_j w_j \cdot (u_j - x_j)^2}. \quad (16)$$

В табл. 1 приведены результаты оценки погрешности моделей на множестве отобранных ситуаций общим количеством 21099.

Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают, что наибольшей точностью обладают модели, построенные на базе метода ближайшего соседа. Регрессионная и аналитическая модели обладают практически одинаковой точностью.

Таблица 1

Оценка погрешности моделей, построенных на всех элементах множества ситуаций

№	Название модели	Количество ошибок			
		всего		существенных	
		ед.	%	ед.	%
1.1	Линейная регрессия, (2)	15584	73,86	9413	44,61
1.2	Нелинейная регрессия, (6)	13668	64,78	6416	30,41
2.1	Аналитическая модель, (10)	15814	74,95	12325	58,42
2.2	Аналитическая модель с температурной зависимостью коэффициентов, (13)	14650	69,43	8663	41,06
3.1	Метод ближайшего соседа	4418	20,94	1324	6,28
3.2	Метод ближайшего соседа с весовыми коэффициентами, (16)	4379	20,75	1308	6,20

Анализ исходных данных показал, что в ряде ситуаций УОГ выходит на ограничение по мощности, – например, при высокой температуре воздуха все включенные вентиляторы не обеспечивают достижения заданной температуры газа на выходе установки. Аналогичные ситуации возникают в зимний период, когда даже при всех выключенных вентиляторах температура на выходе УОГ опускается ниже заданной. Исключение таких ситуаций из расчета модели может улучшить точность модели, поскольку ограничение по мощности как нелинейная составляющая может быть легко учтено после расчета линейной модели. После исключения 2558 ситуаций были проведены повторные расчеты коэффициентов моделей на эталонной выборке из 18541 ситуаций. Точность моделей, как и в первый раз, оценивалась на всех элементах множества (табл. 2).

Таблица 2

Оценка погрешности моделей, построенных по эталонной выборке

№	Название модели	Количество ошибок			
		всего		существенных	
		ед.	%	ед.	%
1.1	Линейная регрессия, (2)	15445	73,20	8840	41,90
1.2	Нелинейная регрессия, (6)	12228	57,96	5184	24,57
2.1	Аналитическая модель, (10)	14797	70,13	8699	41,23
2.2	Аналитическая модель с температурной зависимостью коэффициентов, (13)	14776	70,03	8529	40,42
3.1	Метод ближайшего соседа	1760	8,34	851	4,03
3.2	Метод ближайшего соседа с весовыми коэффициентами, (16)	1724	8,17	840	3,98

В результате погрешность регрессионной и аналитической моделей практически не изменилась, а погрешность модели, построенной по методу ближайшего соседа, снизилась более чем в два раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев Р.А. Сооружение и ремонт газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз. – М.: Недра, 1987. – 271 с.
2. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия = Applied Regression Analysis. – 3-е изд. – М.: Диалектика, 2007. – С. 912.
3. Алимов С.В., Данилушкин И.А., Мосин В.Н. Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – Вып. 2(26). – С. 178–186.
4. Распознавание. Метод ближайших соседей [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Метод_ближайшего_соседа, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
5. Данилушкин И.А., Данилушкин А.И., Шабанов К.Ю. Создание экспертной системы управления установкой охлаждения газа по данным технологических архивов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): материалы Девятой междунар. конф., 3–5 окт. 2016 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 2: Секции 5–13. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 423–426.
6. Данилушкин И.А., Данилушкин А.И., Шабанов К.Ю. Экспертная система управления установкой охлаждения газа // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): труды Девятой междунар. конф., 03–05 окт. 2016 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 274–279.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2017 г.

MODELING OF FUNCTIONING STEADY-STATE MODES OF GAS COOLING SYSTEM

I.A. Danilushkin, A.A. Zhelandinova, S.A. Kolpaschikov, V.K. Tyan

Samara State Technical University
244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The article is devoted to the development and comparison of static models of the gas cooling system. As initial data, instantaneous values of plant operation technological parameters were used, fixed for six years with a two-hour period. In this article, we made preliminary selection of data corresponding to the operating mode. We also show implementation results of models based on: regression analysis, solving of heat transfer equation, the nearest neighbor algorithm. The error of the obtained models is estimated.

Keywords: gas cooling system, static mode, regression analysis, analytical model, case model, nearest neighbor algorithm

*Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexandra A. Zhelandinova, Postgraduate Student.
Sergey A. Kolpaschikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vladimir K. Tyan (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*