

# ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ В РАМКАХ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «НАГНЕТАТЕЛЬ» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

*К. И. Дикарев, С. В. Фотин, С. Ф. Перетрухин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

При обеспечении контрактных обязательств по поставке природного газа потребителям ОАО «Газпром» расходует только на транспортирование газа свыше 15 % от всего добываемого его количества. Поэтому задача оптимальной транспортировки газа через компрессорные цеха (КЦ) и компрессорные станции (КС) является крайне важной и актуальной.

В НПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» осуществляется разработка и реализация диалоговых программных средств оптимизации работы типовой КС в стационарном режиме, которая выполняется совместно со специалистами ННГУ им. Лобачевского. Это программное обеспечение (ПО) носит название «Нагнетатель».

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) используются на КС/КЦ для охлаждения нагревающегося при компримировании (сжатии) транспортируемого газа, что обеспечивает прочность и устойчивость подземных трубных ниток, сохранность окружающей среды, облегчает перекачку газа и интенсифицирует работу трубопроводной системы.

В настоящее время в рамках ПО «Нагнетатель» используется существенно упрощенная модель работы установок АВО газа. С другой стороны, при моделировании режимов работы КС необходимо адекватно определять параметры охлаждаемого газа, так как температурный режим оказывает существенное влияние на оптимальные газодинамические режимы работы КС.

Кроме того, при достаточно низких температурах окружающей атмосферы допускается эксплуатация АВО в режимах свободной конвекции, то есть при отключенных воздушных вентиляторах, при условии обеспечения требуемой температуры на выходе КС. Таким образом, возникает задача, по своей важности не уступающая проблеме оптимизации расхода энергоресурсов на транспортирование газа. Это задача оптимизации числа работающих вентиляторов АВО по критерию наименьших затрат электроэнергии, с условием сохранения заданного температурного режима станции.

Ввиду вышеизложенного актуальной становится задача выбора подходящей модели работы установок АВО для решения вышеуказанных задач.

В научно-технической литературе [1-4] опубликовано достаточно много методик и алгоритмов расчета режимов АВО. Однако большинство из них не адаптировано для реализации в рамках разрабатываемого программного обеспечения. В частности среди существенных недостатков данных методик можно отметить непригодность их для расчета режимов свободной конвекции с трубной поверхности АВО.

Целью выполненной работы являлось осуществление выбора из нескольких методик расчета АВО наиболее подходящей в качестве базовой, для моделирования их режима работы, адаптировать и интегрировать методику в разрабатываемое ПО «Нагнетатель».

В работе рассмотрены три методики моделирования режимов работы АВО, проанализированы их преимущества и недостатки. Представлены решения по алгоритмической реализации этих методик с целью практического применения, а также по расширению их возможностей. Для всех методик выполнено сравнение расчетных температур потока газа на выходе АВО.

По результатам выполненных исследований выявлено, что наиболее подходящей для дальнейшей практической реализации является методика моделирования АВО, основанная на уравнении Шухова.

Авторы выражают благодарность следующим сотрудникам кафедры ИАНИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского: М. Х. Прилуцкому, Н. В. Старостину, Л. Г. Афраимовичу, А. В. Филимонову.

## Принцип работы АВО

По принципу работы АВО представляют собой рекуперативные теплообменники, состоящие из 2-х основных частей: поверхности охлаждения и системы подачи воздуха, включая приводы вентиляторов. Охлаждаемым теплоносителем является сжатый до высокого давления природный газ, движущийся внутри трубок малого диаметра. Данные трубки имеют внешнее оребрение с целью интенсификации теплообмена и обтекаются охлаждающим теплоносителем, в качестве которого выступает нагнетаемый

вентиляторами атмосферный воздух. Оребренные трубки аппарата обычно разделены на несколько групп, называемых секциями.

Каждый АВО, в зависимости от типа, может иметь от 1-го до 6-ти вентиляторов.

На КС аппараты воздушного охлаждения обычно объединяются в станции, в рамках которых несколько соединенных параллельно аппаратов АВО образуют блок.

## Постановка задачи и математическая модель АВО

Задача определения теплового режима АВО формулируется следующим образом: при известных газодинамических параметрах и температуре природного газа на входе АВО, а также заданных управляющих воздействиях, определить температуру природного газа на выходе из АВО.

При рассмотрении подобной задачи следует иметь в виду, что тепловой режим АВО тесно связан с его газодинамическим режимом. Это обуславливает зависимость расхода газа через каждый АВО от средней температуры внутри аппарата, которая, в свою очередь, зависит от расхода. Таким образом, задача становится нелинейной.

В основе математической модели АВО лежит уравнение теплового баланса [5]

$$\begin{aligned} Q\rho_c C_p (T_{in} - T_{охл})\eta &= \\ = Q_{air}\rho_c^{air} C_p^{air} (t_{air}^{out} - t_{air}^{in}) &= \\ = K(\alpha_1, \alpha_2, S, \delta/\lambda) S \varepsilon_{\Delta T} \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\ln(\Theta_1/\Theta_2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q$  – объемный расход природного газа при стандартных условиях, ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $Q_{air}$  – объемный расход воздуха при стандартных условиях, определяемый режимом вентиляторов, ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $\rho_c$  – плотность природного газа при стандартных условиях, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $\rho_c^{air}$  – плотность воздуха при стандартных условиях, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $C_p = C_p(T)$  – изобарная теплоемкость природного газа, ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ );  $C_p^{air} = C_p^{air}(t_{air})$  – изобарная теплоемкость атмосферного воздуха, ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ );  $T_{in}$ ,  $T_{охл}$  – температуры природного газа на входе и выходе АВО, (К);  $t_{air}^{in}$ ,  $t_{air}^{out}$  – температуры воздуха на входе и выходе АВО, (К);  $\eta$  – коэффициент тепловых потерь, принимается  $\eta \approx 0,98 \dots 0,99$ ;  $K$  – коэффициент теплопередачи АВО, ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ );  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны природного газа и воздуха соответственно, ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ );  $\delta/\lambda$  – эквивалентное термическое сопротивление трубок,

( $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ );  $S$  – поверхность теплопередачи, ( $\text{м}^2$ );  $\varepsilon_{\Delta T}$  – поправочный коэффициент, учитывающий перекрестных ход теплоносителей;  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – температурные напоры на входе и выходе АВО, (К).

Для вычисления коэффициента теплоотдачи от газа к внутренним стенкам трубок обычно используется следующая зависимость:

$$\alpha_1 = 0,023 \frac{\lambda_g}{d_{вн}} Re_g^{0,8} Pr_g^{0,4}, \quad (2)$$

где  $\lambda_g$  – теплопроводность газа, ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $d_{вн}$  – внутренний диаметр трубок, м;  $Re_g$  – критерий Рейнольдса движения газа внутри трубок АВО;  $Pr_g$  – критерий Прандтля движения газа внутри трубок АВО.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи от оребренной поверхности трубок к воздуху используется множество различных зависимостей [5-8]. Одной из наиболее характерных и удобных для программной реализации является следующая:

$$\alpha_2 = 0,223ku^{0,33}h^{0,14}d_n^{-0,54} \left( \frac{W_{air}\rho_{air}}{\mu_{air}} \right)^{0,65}, \quad (3)$$

где  $k$  – поправка на оребрение;  $h$  – высота ребер на трубках АВО, (м);  $u$  – шаг между ребрами, (м);  $W_{air}$  – скорость охлаждающего воздушного потока, (м/с);  $d_n$  – наружный диаметр трубок у основания ребер, м;  $\mu_{air}$  – динамическая вязкость воздуха, (Па·с).

Видно, что зависимость (3) может быть использована только при работающих вентиляторах ( $W_{air} \neq 0$ ). Зануление скорости воздушного потока от вентилятора, которое предлагается, например, в [5], приведет к равенству нулю коэффициента теплоотдачи, что противоречит законам теплообмена.

При режиме свободной конвекции для вычисления коэффициента теплоотдачи в научнотехнической литературе зависимости практически отсутствуют. Использовалась следующая зависимость [8], справедливая для горизонтальной одиночной оребренной трубки:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 20,5 \frac{\lambda_{air}}{d_n} \left( \frac{\beta g d_n^3}{\nu_{air}^2} (\bar{t} - t_{air}) 10^{-6} \right)^{0,384} \times \\ &\times \left( \frac{u}{d_n} \right)^{0,384} \left( \frac{h}{d_n} \right)^{-0,194}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\lambda_{air}$  – теплопроводность воздуха, ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха, ( $1/\text{К}$ );  $t_{air}$  – средняя температура окружающего воздуха, (К);  $\bar{t}$  – средняя температура поверхности оребренной трубы, (К);  $\nu_{air}$  – кинематическая вязкость воздуха, ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

## Анализ модели по методике ВНИИГАЗ

Данная методика расчета теплового режима АВО, предложенная ВНИИГАЗ [3], основывается на анализе нелинейного уравнения теплового баланса посредством уточняющих итераций для выходной температуры газа, заданной вначале приближенно. В ее рамках выполняется проверочный анализ соответствия требуемой расчетной мощности одного вентилятора характеристикам реального вентилятора АВО. Для оценки расчетной мощности, требуемой от вентилятора, определяется значение создаваемого им статического давления.

Укрупненная блок-схема алгоритма анализа теплового режима АВО представлена на рис.1. Следует отметить следующие недостатки методики ВНИИГАЗ: отсутствие учета режима свободной конвекции, появление закливаний и делений на ноль при близких значениях температур газа на входе и атмосферного воздуха.

В рамках данной методики средняя температура воздуха в секции АВО вычисляется через ненулевой напор вентиляторов, поэтому использование зависимости (4) для режима свободной конвекции оказалось невозможным.

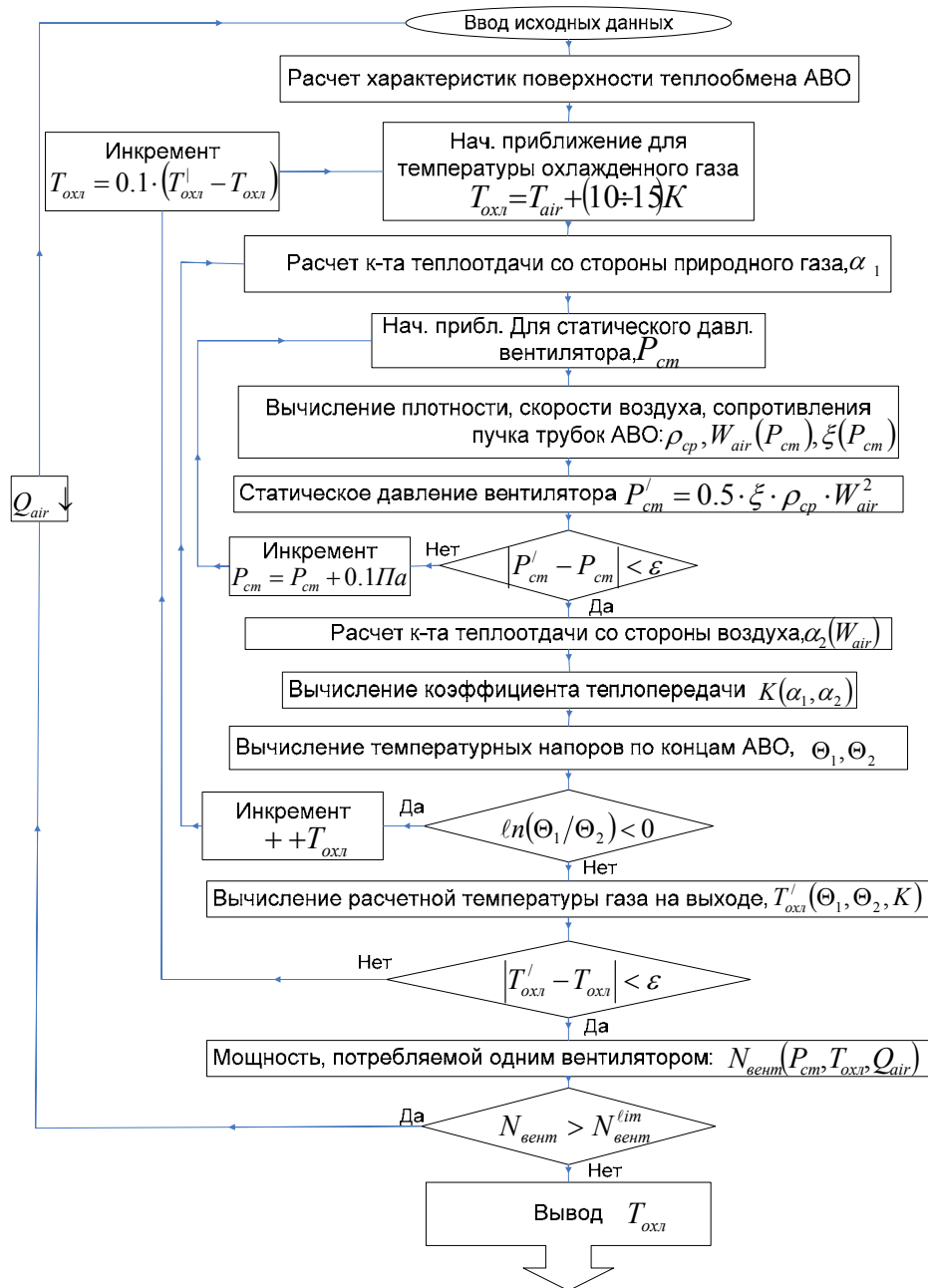


Рис. 1. Диаграмма алгоритма анализа теплового режима АВО на основе методики ВНИИГАЗ

В предлагаемый в рамках методики ВНИИГАЗ подход к оценке статического давления вентилятора был скорректирован в процессе программной реализации. Коррекция касалась выбора начального приближения для статического давления. Взамен «ручного» выбора приемлемого начального значения для статического давления данного типа вентиляторов и последующего выполнения одной или двух корректирующих итераций (до удовлетворительной точности) предложено полагать начальное приближение равным  $10Pa$  и выполнять необходимое число корректировок. Такой подход позволил полностью автоматизировать данный блок оценки статического давления вентилятора.

### Анализ модели при помощи уравнения Шухова

Уравнение Шухова имеет широкое применение при определении тепловых режимов работы различного технологического оборудования в нефтегазовой отрасли. В частности оно может быть применено к для расчета температуры охлаждения природного газа в АВО [9, 10]. Уравнение Шухова используется для анализа режима работы АВО в следующем виде:

$$T_{\text{охл}} = t_{\text{air}} + (T_{\text{in}} - t_{\text{air}}) \exp\left(-\frac{\pi K(T_{\text{in}}, T_{\text{охл}}, t_{\text{air}}) S}{\rho_c Q C_p (T_{\text{in}}, T_{\text{охл}})}\right). \quad (5)$$

Следует отметить, что уравнение Шухова (5) является, по сути, уравнением теплового баланса (1) в условиях неизменности температуры окружающего воздуха  $t_{\text{air}}$ .

В рамках предлагаемого алгоритма анализа теплового режима АВО уравнение Шухова решается методом Ньютона, где производная по температуре заменена конечной разностью.

Алгоритм позволяет использовать для оценки температуры газа за АВО зависимости для коэффициента теплоотдачи, как при работающих вентиляторах, так и при свободной конвекции.

Для расчета теплового режима АВО в ПО «Нагнетатель» при отключенных вентиляторах потребовалось организовать итерационный процесс последовательных приближений, в котором вычисление средней температуры поверхности трубок, а также непосредственное решение уравнения (5) оформлены в виде отдельных подпрограмм. Укрупненная блок-схема алгоритма моделирования работы АВО в режиме свободной конвекции приведена на рис. 2.

Данный алгоритм достаточно прост в реализации, работает в широком диапазоне температур газа и воздуха. К недостаткам его следует отнести некоторое занижение выходной температуры охлаждаемого газа, так как предполагается, что охлаждающий поток воздуха имеет неизменную температуру, то есть является теплоемким.

Эта методика [11, 12] отличается тем, что при анализе теплового режима станции АВО каждый входящий в нее аппарат не рассматривается отдельно, а анализируется работа всех АВО в совокупности. При этом предполагается, что расход природного газа равномерно распределяется между всеми аппаратами, что является истиной только при совпадении их геометрических и физических особенностей и при одинаковом режиме их работы. При разных количествах работающих вентиляторов на каждом АВО изменение теплового режима ведет за собой изменение гидравлического режима и наоборот. Таким образом, данную особенность методики следует отнести к недостаткам.

Посредством введения эмпирических коэффициентов эффективности работы АВО в зависимости от числа включенных на нем вентиляторов авторы методики предлагают эффективный итерационный алгоритм, позволяющий определить температуру природного газа на выходе станции АВО. Недостатком такого подхода является также то, что данные коэффициенты могут отличаться в различных условиях работы АВО, отличающихся от тех, в которых они определялись экспериментально.

В оригинальном описании [11] данная методика использует постоянные значения [коэффициента теплопередачи аппарата и значения теплофизических свойств газов, тогда как в реальности они зависят от температур теплоносителей и других параметров. При программной реализации данной методики данный недостаток был устранен. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

### Расчет числа вентиляторов

Данная задача состоит в расчете минимального количества вентиляторов, которые должны быть включены, чтобы температура газа за АВО не превышала заданного значения  $T_{\text{уст}}$ . Эта задача может быть решена с привлечением расчетных процедур, рассмотренных выше [5].

Проводим расчет  $T_{\text{охл}}$  газа за станцией АВО при отключении всех вентиляторов аппаратов (приоритетный режим) и проверяем условие  $T_{\text{охл}} \leq T_{\text{уст}}$ . Если оно выполняется, то задача решена. Иначе, проводим расчет  $T_{\text{охл}}$  при включении одного вентилятора в каждом АВО и снова проверяем условие  $T_{\text{охл}} \leq T_{\text{уст}}$ . При его выполнении последовательно отключаем вентиляторы на АВО, выполняем для каждого варианта расчет  $T_{\text{охл}}$  и проверку условия  $T_{\text{охл}} \leq T_{\text{уст}}$  до нахождения критического числа вентиляторов. Если же по одному работающему вентилятору на каждом АВО оказывается недостаточно

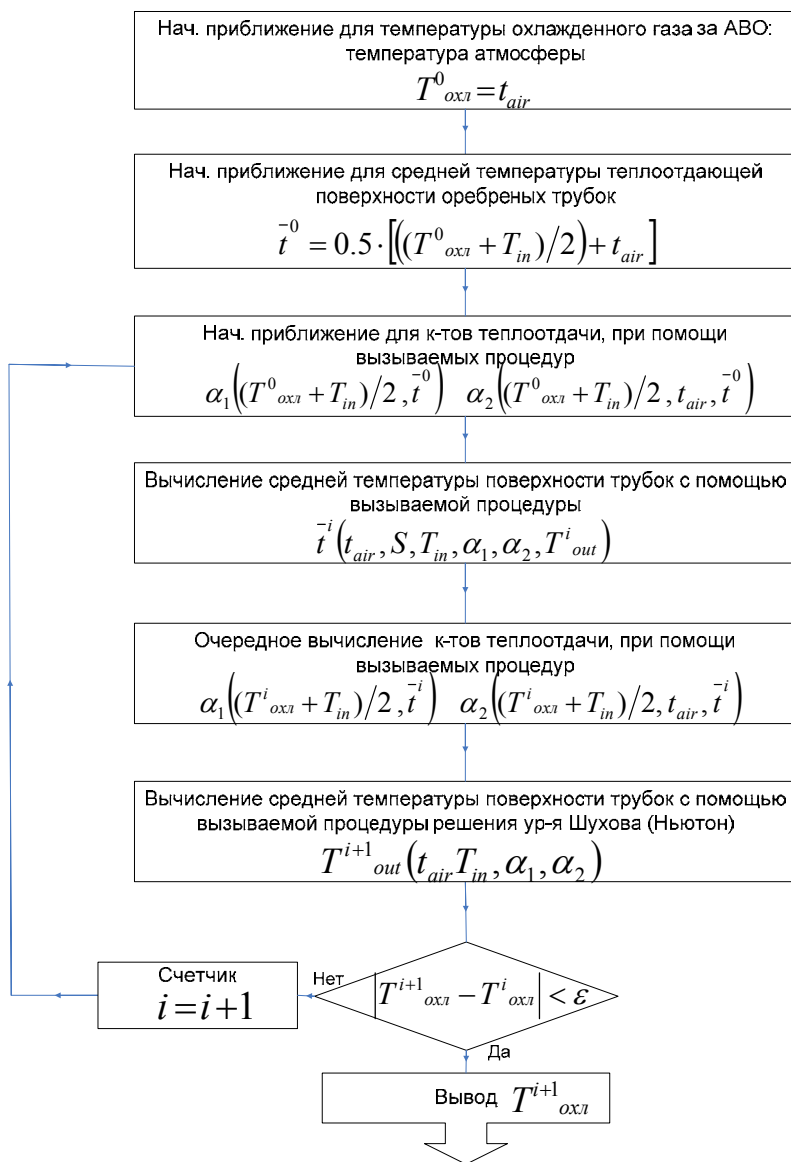


Рис. 2. Диаграмма алгоритма анализа АВО в режиме свободной конвекции на основе методики, использующей уравнение Шухова

для обеспечения  $T_{oxl} \leq T_{уст}$ , то включаем по два вентилятора в каждом аппарате и выполняем процедуру снова.

### Пример расчета

Приведем пример расчета с помощью представленных выше моделей режима работы конкретного АВО типа 2АВГ75 [3, 11]. Три приведенные методики моделирования режимов работы АВО были реализованы согласно описанным алгоритмам на языке высокого уровня С++ и в среде пакета MathCad.

Ниже, в табл. 1–3, приведены результаты расчета температуры природного газа за АВО с использованием представленных выше методик. При этом в

табл. 1 представлены результаты расчетов режима работы с двумя вентиляторами, в табл. 2 – с одним вентилятором, а в табл. 3 – в режиме свободной конвекции (отключение вентиляторов).

Из представленных результатов видно, что алгоритмы, основанные на всех трех методиках расчета, дают сходные результаты. Различия между ними не превышают 17% для всех режимов работы. Несколько заниженные результаты выходных температур газа, получаемые при помощи методики уравнения Шухова, связаны с допущением о неизменности температуры воздушного потока в процессе теплообмена внутри секций аппарата.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Приведенные выше алгоритмы численного моделирования работы АВО, основанные на методиках ВНИИГАЗа, ТюмГНГУ и уравнении Шухова могут быть применены для внедрения

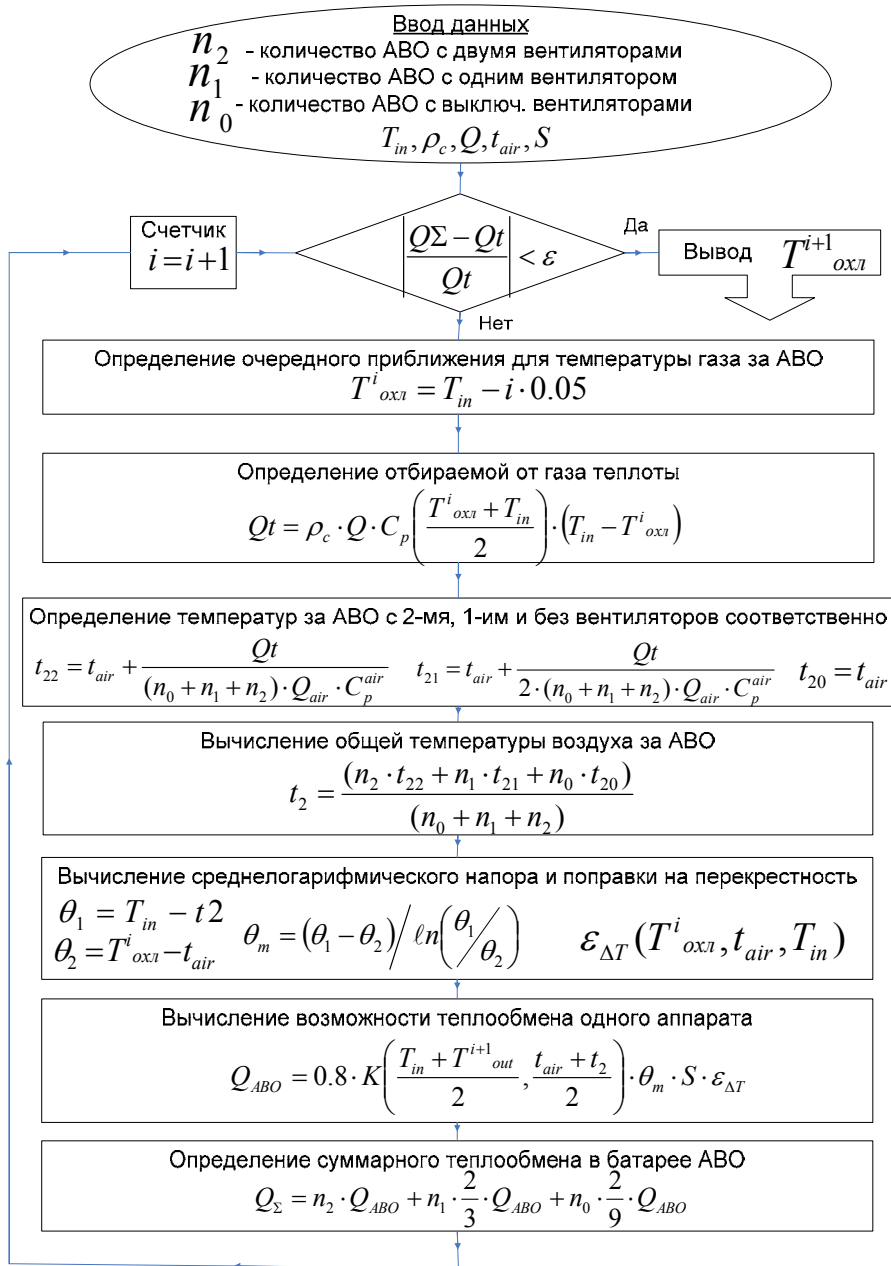


Рис. 3. Диаграмма алгоритма анализа теплового режима АВО на основе методики ТюмГНГУ

Таблица 1

Расчет теплового режима АВО при двух работающих вентиляторах

	Методика ВНИИГАЗ	Методика ТюмГНГУ	Методика Шухова
Температура газа на выходе АВО	26,8	28,1	25,3

Таблица 2

Расчет теплового режима АВО при одном работающем вентиляторе

	Методика ВНИИГАЗ	Методика ТюмГНГУ	Методика Шухова
Температура газа на выходе АВО	23,4	21,5	19,2

Таблица 3

Расчет теплового режима АВО при отключенных вентиляторах

	Методика ВНИИГАЗ	Методика ТюмГНГУ	Методика Шухова
Температура газа на выходе АВО	–	37,2	38,7

в рамках программного обеспечения оптимизации работы КЦ/КС. Алгоритм, основанный на анализе уравнения Шухова, видится наиболее подходящим для внедрения благодаря его относительной простоте, надежности, скорости, возможности индивидуального расчета каждого аппарата на станции АВО при всех режимах работы вентиляторов, включая свободную конвекцию.

## Литература

1. Крюков Н. П., Аппараты воздушного охлаждения. М.: Химия. 1983.
2. Бахмат Г. В., Еремин Н. В., Степанов О. А. Аппараты воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях. С-Пб.: Недра, 1994.
3. Машины и оборудование газонефтепроводов: Учебн. пособие для вузов / Ф. М. Мустафин, Н. И. Коновалов, Р. Ф. Гильметдинов и др. 2-е изд., перераб. и доп. Уфа: Монография, 2002.
4. Камалетдинов И. М., Абузова Ф. Ф. Коэффициенты теплопередачи аппаратов воздушного охла-

ждения (АВО) газовой промышленности // Проблемы энергетики № 3–4, 2002. С. 20–23.

5. Сарданашвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2005.

6. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.

7. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1982.

8. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш и др.; Под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. С-Пб.: Недра, 1996.

9. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / Под ред. В. Е. Селезнева. М.: МАКС Пресс, 2007.

10. Грачев В. В., Щербаков С. Г., Яковлев Е. И. Динамика трубопроводных систем. М.: Наука, 1987.

11. Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности: Учебное пособие / Под ред. Ю. Д. Земенкова. М.: «Инфра-Инженерия», 2008. Т. 1, 2.