

## Электротехника

УДК 621.3

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ

*А.М. Абакумов, В.Е. Антропов, А.С. Ведерников, О.А. Абакумов*

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

**Аннотация.** Актуальность задачи снижения энергетических затрат на охлаждение газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов определяется высокой энергоемкостью установок охлаждения. В статье рассмотрены энергетические показатели установок охлаждения газа при дискретном и непрерывном регулировании скорости вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения. Разработана методика оценки повышения энергетической эффективности при использовании непрерывного регулирования. Приведены оценки потребления электроэнергии в предположении о гармоническом законе изменения температуры наружного воздуха в течение суток. Полученные результаты расчетов позволяют оценить потенциал энергосбережения, а также могут использоваться для прогнозирования электропотребления.

**Ключевые слова:** установки охлаждения газа, регулирование температурного режима, частотно-регулируемый привод вентиляторов, потребление электроэнергии.

Процесс охлаждения природного газа после компримирования на компрессорных станциях магистральных газопроводов является необходимой технологической операцией, позволяющей:

- уменьшить температурный перепад по длине трубопровода, снижающий его продольную устойчивость;
- повысить пропускную способность трубопровода и обеспечить экономию топливного газа на работу газоперекачивающих агрегатов;
- снизить интенсивность процессов коррозии трубопровода;
- исключить негативные экологические и технические последствия растепления газопроводов, расположенных в северных районах страны в зоне многолетнемерзлых грунтов.

Установки охлаждения газа (УОГ) имеют достаточно высокую энергоемкость. Типовая УОГ содержит несколько параллельно включенных аппаратов

---

*Абакумов Александр Михайлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».*

*Антропов Владимир Евгеньевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».*

*Ведерников Александр Сергеевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электрические станции».*

*Абакумов Олег Александрович, магистрант.*

воздушного охлаждения (АВО). Наибольшее применение на отечественных компрессорных станциях получили АВО типа 2АВГ-75. Каждый такой аппарат оснащен двумя установленными под теплообменником вентиляторами, приводимыми в движение асинхронными двигателями мощностью по 37 кВт. Установленная мощность электроприводов типовых УОГ близка к 1 МВт, а на нужды охлаждения газа на компрессорных станциях с газотурбинным приводом расходуется более 60 % электроэнергии, потребляемой на транспорт газа. Указанные обстоятельства определяют существенный интерес к проблеме повышения энергетической эффективности режимов работы УОГ.

Установка охлаждения должна обеспечивать стабилизацию температуры охлажденного газа на заданном уровне в условиях изменения температуры газа после компримирования, температуры наружного воздуха, расхода газа и других менее значимых возмущений.

На большинстве действующих УОГ температура газа на выходе установки регулируется дискретно включением/отключением электродвигателей отдельных вентиляторов. Существенными недостатками такого способа являются низкая точность стабилизации регулируемой величины, обусловленная дискретностью регулирования, и большие длительные пусковые токи асинхронных короткозамкнутых двигателей вентиляторов, вызванные переходным процессом пуска механизма с большим моментом инерции. Вопросы совершенствования характеристик АВО и оптимизации алгоритмов дискретного управления рассмотрены в [1–8].

В последние годы появился опыт использования систем управления температурой на выходе УОГ за счет непрерывного (частотного) регулирования скорости вентиляторов с использованием частотно-регулируемого привода (ЧРП). Использование ЧРП создает возможности для построения замкнутых по температуре газа на выходе УОГ систем автоматического управления, обеспечивающих высокую точность стабилизации регулируемой температуры [9–17]. Кроме того, использование частотного регулирования обеспечивает существенное снижение расхода электроэнергии на нужды охлаждения.

В предлагаемой работе рассмотрены вопросы сравнительной оценки энергетической эффективности УОГ с дискретным и непрерывным регулированием скорости вентиляторов.

В соответствии с технологическими требованиями система управления УОГ должна обеспечивать поддержание температуры  $\theta_{out}$  охлажденного газа на уровне, не превышающем требуемого  $\theta_r$ :

$$\theta_{out} \leq \theta_r. \quad (1)$$

В установившемся режиме на УОГ создается температурный перепад

$$\Delta\theta = \theta_{inp} - \theta_{out}, \quad (2)$$

где  $\theta_{inp}$  и  $\theta_{out}$  – температура газа на входе (температура газа после компримирования) и выходе УОГ соответственно.

Для оценочных расчетов потребления электроэнергии на нужды охлаждения примем допущение о равномерном распределении потока компримированного газа через параллельно включенные АВО и идентичности их характеристик. С учетом этих допущений для определенных технологических и климатических условий каждый из АВО при включении двух вентиляторов на номинальную

скорость обеспечивает некоторый максимальный температурный перепад  $\Delta\theta_{max}$ , и температурный перепад на УОГ равен  $\Delta\theta_{max}$ .

Для выполнения технологических требований (1) необходимо, чтобы фактический температурный перепад на УОГ был не меньше требуемого  $\Delta\theta_r$ :

$$\Delta\theta \geq \Delta\theta_r. \quad (3)$$

Значение максимального температурного перепада  $\Delta\theta_{max}$  зависит от значений температуры  $\theta_{inr}$  газа на входе в АВО, температуры  $\theta_a$  наружного воздуха, расхода газа через УОГ и может быть определено по паспортным характеристикам АВО. Более надежные результаты могут быть получены на основе экспериментальных исследований, позволяющих учесть фактическое состояние отдельных АВО.

Для оценки эффективности работы АВО газа используется также показатель «глубина охлаждения газа» [7, 10], определяемый в виде

$$\mu = \frac{\theta_{inr} - \theta_{out}}{\theta_{inr} - \theta_a} = \frac{\Delta\theta_{max}}{\theta_{inr} - \theta_a}. \quad (4)$$

Значение показателя  $\mu$  для постоянного расхода газа через УОГ остается неизменным. С учетом выражения (4) величину максимального температурного перепада на УОГ можно записать в виде

$$\Delta\theta_{max} = \mu(\theta_{inr} - \theta_a). \quad (5)$$

Следовательно, в случае постоянной температуры на входе установки и неизменного расхода газа через УОГ максимальный температурный перепад  $\Delta\theta_{max}$  является функцией температуры  $\theta_a$  наружного воздуха.

При снижении температуры наружного воздуха значение максимального температурного перепада  $\Delta\theta_{max}$  увеличивается и может оказаться больше требуемого  $\Delta\theta_r$ . В этих условиях отключается часть двигателей вентиляторов (дискретное регулирование) или, при использовании системы автоматического управления на базе ЧРП, происходит снижение скорости вентиляторов.

Для расчетов энергопотребления при определенном графике изменения температуры  $\theta_a(t)$  наружного воздуха в течение суток можно построить соответствующий график  $\Delta\theta_{max}(t)$  максимального значения температурного перепада на УОГ, который достигается при включении всех вентиляторов на номинальную скорость  $n_n$ . Для упрощения расчетов энергетической эффективности реальные графики изменения температуры наружного воздуха и  $\Delta\theta_{max}(t)$  целесообразно заменить ступенчатыми с фиксированными значениями переменных на каждом временном интервале  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ .

В случае дискретного регулирования с учетом принятых выше допущений для  $i$ -го интервала включение  $d_i$  двигателей вентиляторов из общего числа  $N$  обеспечивает температурный перепад

$$\Delta\theta_{di} = \frac{\Delta\theta_{maxi}d_i}{N}. \quad (6)$$

Чтобы выполнить технологические требования (3), требуемое число включенных электродвигателей вентиляторов с учетом дискретности регулирования должно составлять

$$d_{ri} = \left[ d'_{ri} \right] \leq N,$$

где  $[d_{ri}]$  – наименьшее целое, большее или равное  $d'_{ri}$ , определяемого с учетом (6) из соотношения

$$d'_{ri} = \frac{\Delta\theta_{ri}}{\Delta\theta_{maxi}} N. \quad (7)$$

Для получения результатов исследования в обобщенном виде введем новую переменную – относительное значение требуемого температурного перепада:

$$\Delta\theta_{ri}^* = \frac{\Delta\theta_{ri}}{\Delta\theta_{maxi}}, 0 < \Delta\theta_{ri}^* \leq 1. \quad (8)$$

Тогда соотношение (7) можно записать в виде

$$d'_{ri} = \Delta\theta_{ri}^* N. \quad (9)$$

Требуемая мощность на валу двигателей вентиляторов при дискретном регулировании определяется числом включенных вентиляторов:

$$P_{di} = d_{ri} P_n, \quad (10)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность электродвигателя одного вентилятора.

В качестве примера на рис. 1 показана зависимость мощности включенных электродвигателей  $P_d$  от относительного требуемого температурного перепада. Результаты приведены для типовой УОГ, содержащей  $N=24$  вентилятора с приводными двигателями мощностью  $P_n=37$ кВт каждый (ступенчатый график). Количество электродвигателей вентиляторов УОГ обычно достаточно велико ( $N=24\dots48$ ). В этих условиях без существенных погрешностей для расчета электропотребления можно принять  $d_{ri} = d'_{ri}$  и аппроксимировать ступенчатый график мощности линейным (см. рис. 1).

Учитывая соотношения (9), (10), для требуемой мощности электродвигателей вентиляторов при дискретном регулировании можно записать следующее выражение:

$$P_{di} = d_{ri} P_n = \Delta\theta_{ri}^* N P_n.$$

Примем суммарную номинальную мощность электродвигателей вентиляторов УОГ  $P_\Sigma = N P_n$  за базовую величину и выразим  $P_{di}$  в относительных единицах (о.е.):

$$P_{di}^* = \Delta\theta_{ri}^*. \quad (11)$$

Для построения графика потребления электроэнергии в течение суток можно с использованием графика относительного требуемого температурного перепада  $\Delta\theta_{ri}^*(t)$  вычислить расход электроэнергии на каждом  $i$ -том интервале:

$$W_{di} = \frac{\Delta\theta_{ri}^* N P_n t_i}{\eta},$$

где  $\eta$  – КПД электродвигателей вентиляторов.

Для расчета потребления в относительных единицах примем за базовое значение потребление электроэнергии за сутки в случае, когда все электродвигатели вентиляторов включены 24 часа:

$$W_0 = \frac{24 N P_n}{\eta}.$$

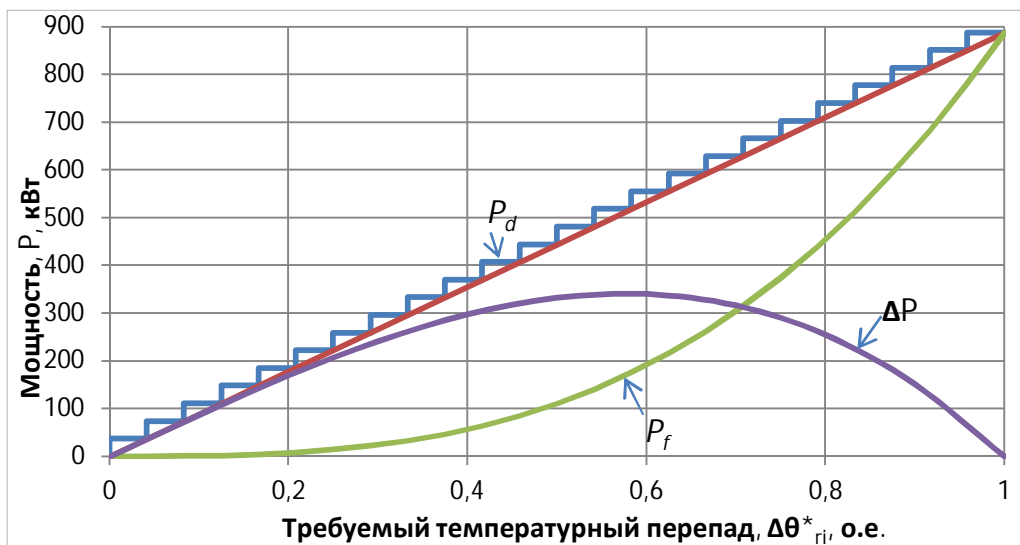


Рис. 1. Зависимость мощности электродвигателей вентиляторов от относительного требуемого температурного перепада

Тогда выражение для расхода электроэнергии на  $i$ -том интервале в относительных единицах будет иметь вид

$$W_{di}^* = \Delta\theta_{ri}^* t_i / 24. \quad (12)$$

Суточный расход электроэнергии в относительных единицах определяется суммированием расходов на отдельных интервалах:

$$W_{do}^* = \sum_{i=1}^k W_{di}^*.$$

Остановимся далее на методике расчета энергетических показателей при частотном регулировании скорости вентиляторов УОГ.

Наибольшая энергетическая эффективность режимов работы УОГ с ЧРП вентиляторов достигается в том случае, когда в работе находятся все вентиляторы. Причем систему автоматического управления температурой газа выполняют так, что все электродвигатели вентиляторов вращаются с одинаковой скоростью [9, 10, 12, 13].

Приняв во внимание отмеченные особенности непрерывного регулирования, рассмотрим зависимость температурного перепада на УОГ от частоты вращения вентиляторов.

В работе [9] на основе аналитических исследований получена математическая модель температурного перепада на АВО от относительной скорости обдува теплообменника в виде степенной зависимости, причем значение показателя степени близко к единице.

В работе [11] на основе экспериментальных исследований показано, что изменение температурного перепада на АВО в стационарном режиме приблизительно пропорционально относительной частоте  $n$  вращения вентиляторов:

$$\Delta\theta_{fi} = \Delta\theta_{maxi} \left( \frac{n_i}{n_n} \right). \quad (13)$$

Используя соотношение (13), требуемое по технологическим условиям (3) значение относительной частоты вращения вентиляторов можно представить в виде

$$\frac{n_{ri}}{n_n} = \frac{\Delta\theta_{fi}}{\Delta\theta_{maxi}} = \Delta\theta_{ri}^*. \quad (14)$$

Мощность на валу двигателей вентиляторов находится в кубической зависимости от относительной частоты вращения, и выражение для мощности при частотном регулировании с учетом соотношений (13), (14) можно записать в виде

$$P_{fi} = P_{\Sigma} \left( \frac{n_{ri}}{n_n} \right)^3 = P_{\Sigma} (\Delta\theta_{ri}^*)^3. \quad (15)$$

График зависимости мощности  $P_f$  на валу вентиляторов при частотном регулировании от относительного требуемого значения температурного перепада  $\Delta\theta_{ri}^*$  приведен на рис. 1. Там же показано снижение мощности при переходе от дискретного регулирования к частотному:

$$\Delta P = P_{di} - P_{fi}.$$

В относительных единицах выражение (15) для мощности при частотном регулировании будет иметь вид

$$P_{fi}^* = (\Delta\theta_{ri}^*)^3. \quad (16)$$

Расход электроэнергии на  $i$ -том интервале при частотном регулировании:

$$W_{fi} = \frac{P_{fi} t_i}{\eta \eta_f}. \quad (17)$$

Приняв для оценочных расчетов КПД преобразователей частоты  $\eta_f = 1$ , расход электроэнергии в относительных единицах можно определить в виде

$$W_{fi}^* = (\Delta\theta_{ri}^*)^3 t_i / 24. \quad (18)$$

Суточный расход электроэнергии, аналогично предыдущему, можно найти суммированием расходов на отдельных интервалах.

На основе приведенных соотношений проведем анализ электропотребления для гармонического закона изменения температуры  $\theta_a$  наружного воздуха, характерного для установившихся климатических условий.

В предположении о постоянстве расхода газа и температуры  $\theta_{inp}$  на входе в УОГ требуемое значение относительного температурного перепада в течение суток также изменяется по гармоническому закону:

$$\Delta\theta_r^*(t) = \theta_{r0}^* - \Delta\theta_r^* \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t + t_0)\right), \quad (19)$$

где  $\theta_{r0}^*$  и  $\Delta\theta_r^*$  – среднее значение и амплитуда изменения требуемого относительного значения температурного перепада;

$t_0$  – время, соответствующее фазовому сдвигу графика температуры наружного воздуха относительно начала отсчета.

В дальнейшем анализе рассматриваются режимы работы, при которых тепловая мощность УОГ позволяет обеспечить требуемую температуру газа на выходе, т. е. выполняется соотношение

$$0 < \Delta\theta_r^*(t) \leq 1.$$

Последующие расчеты показателей электропотребления выполнены на основе численного интегрирования с заменой исходного графика, описываемого выражением (14), ступенчатым с длительностью временных интервалов  $t_i = 1$  час.

В качестве примера на рис. 2 приведен суточный график мощности электродвигателей при дискретном  $P_d^*$  и частотном  $P_{fi}^*$  регулировании. На рис. 3 показаны соответствующие расчетные графики электропотребления:  $W_d^*$  при дискретном и  $W_f^*$  при частотном регулировании для значений  $\theta_{r0}^* = 0,7$  и  $\Delta\theta_r^* = 0,3$ . Принято, что минимум ночной температуры воздуха достигается в 4 часа ночи, что соответствует значению  $t_0 = 2$  час.

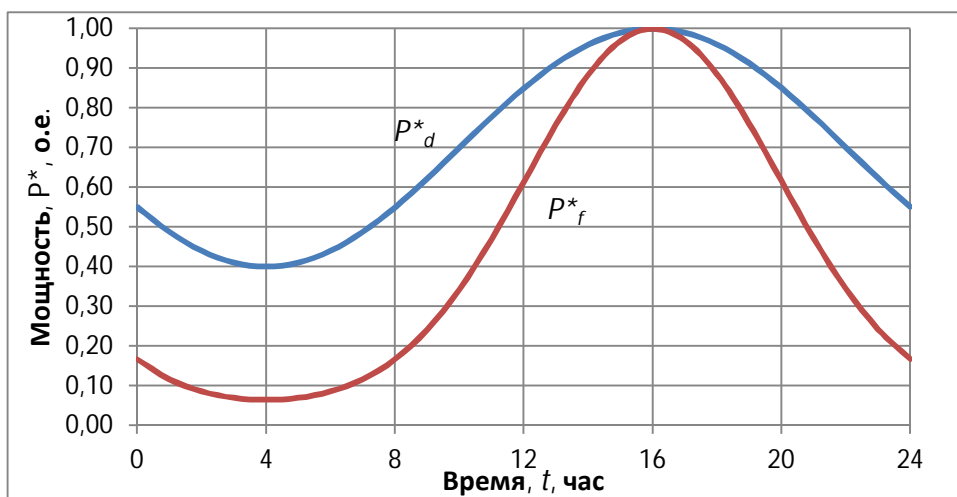


Рис. 2. Расчетные суточные графики мощности двигателей вентиляторов:  $P_d^*$  – при дискретном регулировании;  $P_{fi}^*$  – при частотном регулировании

Если представляет интерес только значение электропотребления за сутки, то для дискретного регулирования в относительных единицах оно может быть рассчитано по среднему значению требуемого температурного перепада:

$$W_{d0}^* = \Delta\theta_{r0}^*.$$

В случае частотного регулирования такой подход вследствие нелинейности зависимости  $P_{fi}(\Delta\theta_{ri}^*)$  приводит к погрешностям. Величина погрешности нелинейно зависит от среднего значения  $\theta_{r0}^*$  и амплитуды изменения требуемого значения температурного перепада  $\Delta\theta_r^*$ .

В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость (кривая 1) относительного суточного потребления электроэнергии от значения  $\theta_{r0}^*$  для  $\Delta\theta_r^* = 0,3$ , рассчитанная по изложенной выше методике. Расчет по среднему значению  $\theta_{r0}^*$  (кривая 2 на рис. 4) приводит к заниженным оценкам электропотребления.

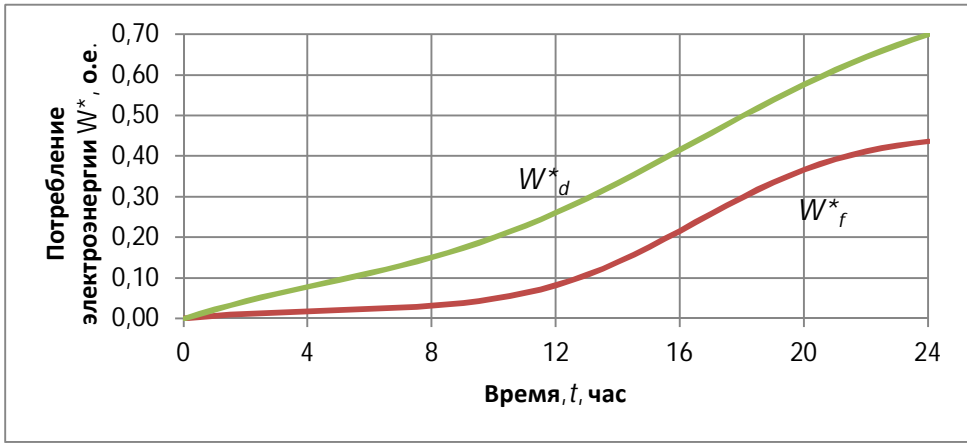


Рис. 3. Расчетные суточные графики потребления электроэнергии:  $W_d^*$  — при дискретном регулировании;  $W_f^*$  — при частотном регулировании

Как показывает анализ, погрешность расчета расхода электроэнергии по среднему значению  $\theta_{r0}^*$  не превышает 10 % для  $\Delta\theta_r^*=0,1\dots0,15$  и  $\theta_{r0}^*=0,3\dots0,8$  и существенно возрастает при увеличении значений  $\Delta\theta_r^*$ .

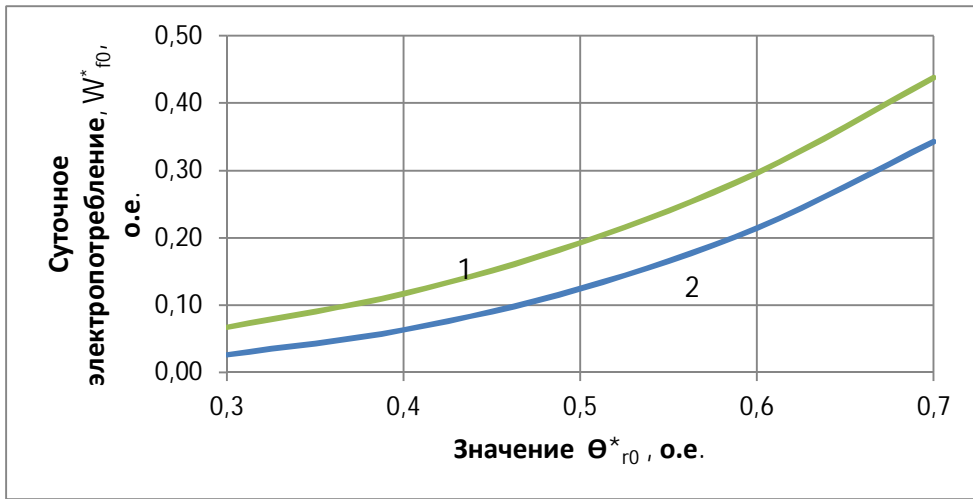


Рис. 4. Зависимость относительного суточного потребления электроэнергии от  $\theta_{r0}^*$  для  $\Delta\theta_r^*=0,3$

Относительная экономия электроэнергии за сутки при переходе от дискретного регулирования к частотному может быть рассчитана по выражению

$$\Delta W^* = \frac{W_d^* - W_f^*}{W_d^*} 100\% . \quad (20)$$

На рис. 5 приведены результаты расчета по выражению (20) экономии электроэнергии в зависимости от среднего значения требуемого относительного температурного перепада  $\theta_{r0}^*$  для двух значений  $\Delta\theta_r^* = 0,2$  и  $\Delta\theta_r^* = 0,3$ .



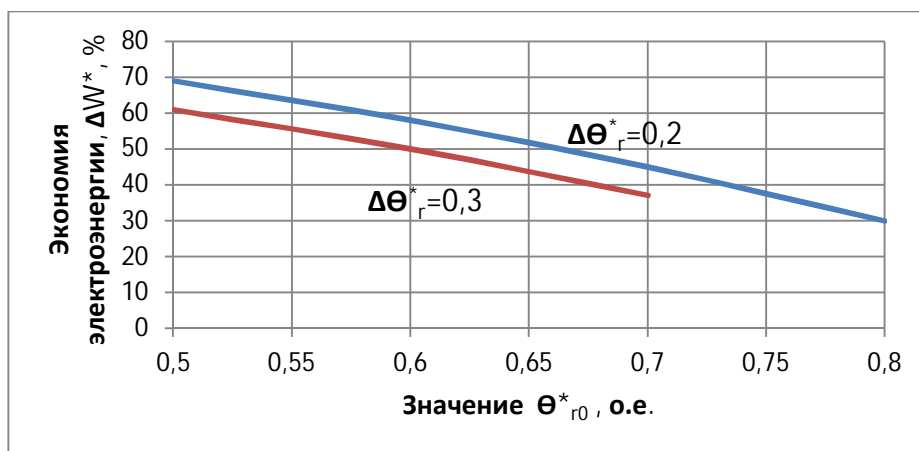


Рис. 5. Экономия электроэнергии при частотном регулировании

Как следует из приведенных результатов расчетов, наибольшая относительная экономия электроэнергии достигается при работе УОГ в области значений  $\Theta_{r0}^*$ , соответствующих максимальным значениям экономии мощности (см. рис. 1), а также зависит от значений  $\Delta\Theta_r^*$ . Полученные расчетные результаты по энергоэффективности согласуются с приведенными в [9, 14] экспериментальными данными.

Таким образом, разработана методика и приведены сравнительные оценки энергетической эффективности использования дискретного и частотного регулирования скорости вентиляторов установок охлаждения природного газа. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования мощности и электропотребления электродвигателями вентиляторов УОГ при формировании заявок поставщику электроэнергии, а также для технико-экономического анализа эффективности использования частотно-регулируемого электропривода для аппаратов воздушного охлаждения газа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов С.В., Прокопец А.О., Кубаров С.В. и др. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ // Газовая промышленность. – 2009. – № 4. – С. 54–56.
2. 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. – № 2 (26). – С. 178–186.
3. Маланичев В.А., Миатов О.Л., Типайлов А.М. Разработка и модернизация вентиляторных блоков аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника. – 2004. – № 2. – С. 11–16.
4. Ванчин А.Г. Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – Вып. 3. – С. 164–179. – Режим доступа : <http://www.ogbus.ru>
5. Данилушкин А.И., Крайнов В.Г., Мигачева Л.А. Оптимизация стационарного распределения нагрузки аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 159–164.
6. Шайхутдинов А.З., Лифанов В.А., Маланичев В.А. Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 40–41.
7. Сагитов Р.Р. Повышение эффективности эксплуатации элементов компрессорных станций на базе энергетического анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р.Р. Сагитов. – М., 2014. – 24 с.

8. *Крайнов В.Г.* Оптимизация режимов работы электроприводов установок охлаждения газа при транспортировке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2014. – 24 с.
9. *Артохов И.И., Аршалян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В.* Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (54). Вып. 3. – С. 25–32.
10. *Артохов И.И., Аршалян И.И., Крылов И.П.* Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 1. – С. 33–36.
11. *Алимов С. В.* Повышение энергоэффективности стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Алимов. – Самара, 2011. – 24 с.
12. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачев Л.А., Мосин В.Н.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 110–113.
13. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А.* Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 6(28). – С. 113–117.
14. *Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П.* Оценка энергетической эффективности использования системы автоматического управления температурой газа на компрессорных станциях // Ашировские чтения: Сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. Т. II: Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2016. – С. 292–295.
15. *Кумар Б.К., Выгонюк П.И.* Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатнаева. – 2011. – № 1 (83). – С. 67–71.
16. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. – 1984. – vol. 55. – No 3. – P. 49–56.
17. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air-cooling unit // IEEE Xplore, 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076297.

*Статья поступила в редакцию 14 июня 2019 года*

## **THE ENERGY EFFICIENCY OF COOLING THE NATURAL GAS WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVE FANS**

***A.M. Abakumov, V.E. Antropov, O.A. Abakumov, A.S. Vedernikov***

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

**Annotation.** *The relevance of the problem of reducing energy costs for gas cooling at compressor stations of main gas pipelines is determined by the high energy intensity of cooling plants. The article deals with the energy performance of gas cooling units with discrete and continuous speed control of air cooling fans. The method of estimation of increase of power efficiency at use of continuous regulation is developed. The estimates of electricity consumption in the assumption of a harmonic law of change of temperature of external air during the day, the results of calculations allow us to estimate the energy saving potential, and can be used to predict energy consumption.*

**Keywords:** *gas cooling units, temperature control, frequency-controlled fan drive, power consumption.*

---

*Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vladimir E. Antropov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Oleg A. Abakumov, Postgraduate Student.  
Alexander S. Vedernikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

## REFERENCES

1. *Alimov S.V., Prokopets A.O., Rubarov S.V.* Modernizatsiya ventilyatorov AVO gaza pri rekonstruktsii KS MG // *Gazovaya promyshlennost.* – 2009. – № 4. – P. 54–56.
2. *Alimov S.V., Danilushkin I.A., Mosin V.N.* Modelirovanie ustanovivshikhnya protsessov teploobmena v apparatakh vozdušnogo okhlazhdeniya gaza // *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki.* – 2010. – № 2 (26). – P. 178–186.
3. *Malanichev V.A., Miatov O.L., Tipaylov A.M.* Razrabotka i modernizatsiya ventilyatornykh blokov apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya // *Khimicheskaya tekhnika.* – 2004. – № 2. – P. 11–16.
4. *Vanchin A.G.* Raschet raboty uzla vozdušnogo okhlazhdeniya gaza v usloviyakh kompressornoy stantsii magistralnogo gazoprovoda [Elektronnyy resurs] // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo».* – 2013. – Vyp. 3. – S. 164–179. – Rezhim dostupa: <http://www.ogbus.ru>
5. *Danilushkin A.I., Kraynov V.G., Migacheva L.A.* Optimizatsiya stantsionarnogo raspredeleniya nagruzki apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya gaza // *Vestnik Samarskogo gos. tekhnicheskogo un-ta. Ser. Tekhnicheskiye nauki.* – 2011. – № 3 (31). – S. 159–164.
6. *Shaykhutdinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Sovremennyye AVO gaza – resurs energosberezheniya v gazovoy otrasli // *Gazovaya promyshlennost.* – 2010. – № 9. – S. 40–41.
7. *Sagitov R.R.* Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii elementov kompressornykh stantsiy na baze eksergeticheskogo analiza: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / *R.R. Sagitov.* – M., 2014. – 24 s.
8. *Kraynov V.G.* Optimizatsiya rezhimov raboty elektroprivodov ustanovok okhlazhdeniya gaza pri transportirovke: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / *V.G. Kraynov.* – Samara, 2014. – 24 s.
9. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.Sh., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resursosberegayushchaya tekhnologiya okhlazhdeniya gaza na kompressornykh stantsiyakh // *Vestnik Saratovskogo gos. tekhn. un-ta.* – 2011. – № 1 (54). Vyp. 3. – S. 25–32.
10. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Krylov I.P.* Avtomaticheskoye upravleniye apparatami vozdušnogo okhlazhdeniya na obyektakh magistralnogo transporta gaza // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye.* – 2003. – № 1. – S. 33–36.
11. *Alimov C.B.* Povysheniye energoeffektivnosti stantsionarnykh rezhimov raboty ustanovok okhlazhdeniya gaza s chastotno-reguliruyemym elektroprivodom: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. – Samara, 2011. – 24 s.
12. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A., Mosin V.N.* Optimizatsiya stantsionarnykh rezhimov raboty ustanovok okhlazhdeniya gaza kompressornykh stantsiy magistralnykh gazoprovodov // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika.* – 2011. – № 3. – S. 110–113.
13. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A.* Analiticheskoye i eksperimentalnoye issledovaniye stantsionarnykh rezhimov raboty ustanovok okhlazhdeniya gaza kompressornykh stantsiy magistralnykh gazoprovodov // *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhnicheskiye nauki.* – 2010. – № 6 (28). – S. 113–117.
14. *Abakumov A.M., Migachev A.V., Stepashkin I.P.* Otsenka energeticheskoy effektivnosti ispolzovaniya sistemy avtomaticheskogo upravleniya temperaturoy gaza na kompressornykh stantsiyakh // *Ashirovskiy chteniya: Sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. II: Problemy energeticheskogo obespecheniya neftegazovogo kompleksa.* – Samara: Samarskiy gos. tekhn. un-t, 2016. – S. 292–295.
15. *Kumar B.K., Vygoniyuk P.I.* Sistema avtomaticheskogo upravleniya apparatami vozdušnogo okhlazhdeniya syrogo prirodnogo gaza // *Vestnik Kazakhskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta im. K.I. Satnayeva.* – 2011. – № 1 (83). – S. 67–71.
16. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // *Pipe Line Industry.* – 1984. – vol. 55. – No 3. – P. 49–56.
17. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air-cooling unit // *IEEE Xplore*, 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076297