

УДК 622.691.4.052

Г.А. Хворов¹, e-mail: G_Khvorov@vniigaz.gazprom.ru;

М.В. Юмашев¹, e-mail: M_Yumashev@vniigaz.gazprom.ru

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, Россия).

Анализ энергосберегающих технологий охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром»

В целях эффективной реализации политики энергосбережения ПАО «Газпром» в современных и перспективных условиях в качестве стратегического направления определено сокращение расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), в том числе электрической энергии, расходуемой аппаратами воздушного охлаждения (АВО) в процессе охлаждения природного газа.

В настоящее время в ПАО «Газпром» разработаны и успешно реализуются следующие современные технологии охлаждения компримируемого газа в АВО: на основе сезонного изменения углов атаки лопастей вентиляторов; на основе частотного регулирования скорости вращения вентиляторов; на основе применения композитных материалов в конструкции силовых компонентов.

Ключевой и перспективной является технология охлаждения компримируемого газа в АВО на основе применения композитных материалов в конструкции силовых агрегатов аппарата.

В статье представлен анализ технологий охлаждения компримируемого газа в АВО и детально рассмотрены результаты испытаний АВО газа на основе применения новых композитных материалов.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, технологии охлаждения природного газа, аппараты воздушного охлаждения, эффективность расхода топливного газа, степень охлаждения газа, энергосбережение, энергетическая эффективность, инновационные технологии, модернизированный аппарат воздушного охлаждения газа.

.....

Г.А. Хворов¹, e-mail: G_Khvorov@vniigaz.gazprom.ru;

М.В. Юмашев¹, e-mail: M_Yumashev@vniigaz.gazprom.ru

¹Gazprom VNIIGAZ LLC (Moscow, Russia).

Analysis of energy-saving technologies for gas cooling based on air cooling units for gas transport at Gazprom PJSC

With a view of effective implementation of energy-saving policy in the current and future conditions, Gazprom PJSC defined the reduction of fuel and energy resources (FER) consumption as the strategic direction, including electrical energy consumed by air cooling units (ACU) in the process of natural gas cooling.

At the present time Gazprom PJSC developed and successfully applies the following advanced cooling technologies for compresses gas in ACU: technology based on seasonal changes in the angles of attack of the fan blades; technology based on frequency control of fan speed; technology based on the application of composite materials in the construction of the power components.

A key and promising technology is the cooling technology of compresses gas in ACU based on the application of composite materials in the construction of the unit power components.

The article presents an analysis of the cooling technology of compresses gas in ACU and test results of ACU gas based on the application of new composite materials are thoroughly reviewed.

Keywords: energy-saving technologies, natural gas cooling technology, air cooling units, efficiency of the fuel gas flow rate, gas cooling degree, energy saving, energy efficiency, innovative technologies, upgraded gas air cooling unit.

В процессе транспортировки газа осуществляется компримирование природного газа газоперекачивающими агрегатами на компрессорных станциях (КС). При сжатии природного газа происходит повышение его температуры. Количество тепла, возникающего при компримировании потока транспортируемого газа, эквивалентно рабочей мощности газоперекачивающего агрегата (ГПА) на КС.

Охлаждение газа после его компримирования осуществляется в целях обеспечения надежности и повышения эффективности работы магистрального газопровода. Для этих целей на КС установлены АВО газа.

Эксплуатация и обслуживание АВО газа должны проводиться в соответствии с производственной инструкцией (технологическим регламентом), составленной на основе инструкций заводов-изготовителей АВО, проектной документации и Правил технической эксплуатации магистральных газопроводов.

После компримирования газ под рабочим давлением проходит по трубчатым теплообменным секциям АВО. Через межтрубное пространство теплообменной секции с помощью электроприводных вентиляторов прокачивается воздух. За счет теплообмена с принудительно перемещаемым потоком воздуха происходит снижение температуры газа, что приводит к повышению его плотности, снижению скорости течения и потере давления в газопроводе. Это позволяет увеличить пропускную способность магистрального газопровода и сэкономить топливный газ на работу ГПА на следующей КС.

Задача управления температурным режимом магистральных газопроводов заключается в поддержании температуры природного газа после системы охлаждения компрессорного цеха выше температуры гидратообразования и ниже допустимого значения температуры, определенной исходя из требований устойчивой работы линейных участков

газопроводов и целостности изоляционного покрытия.

Это означает, что температура природного газа на выходе АВО должна быть не выше допустимой условиями устойчивости газопровода и сохранности его изоляции и в то же время не ниже величины, допустимой по условиям хладостойкости металла труб газопровода. Снижение температуры газа на выходе АВО более чем на 45 °С после его сжатия на КС способствует предохранению изоляции труб от разрушения при высоких температурах транспортируемого газа. Нарушение изоляции приводит к ускорению по времени и усилению по интенсивности протекания процессов коррозии металла трубы и, соответственно, к сокращению срока службы магистрального газопровода.

Охлаждение транспортируемого газа в АВО является достаточно энергоемким процессом. Мощность, потребляемая электродвигателями АВО одного компрессорного цеха, составляет сотни киловатт, что существенно влияет на структуру электропотребления КС, особенно с газотурбинным приводом компрессорных нагнетателей. В этой ситуации АВО целесообразно классифицировать как самостоятельный технологический объект энергопотребления КС. Расход электроэнергии на охлаждение компримированного газа может составлять 65–75 % от общего объема электропотребления на выполнение товаротранспортной работы.

Тепловая производительность АВО зависит от многих возмущающих факторов, главными из которых являются: расход и температура технологического (транспортируемого) газа после компримирования, степень загрязнения поверхности теплообменников, температура наружного воздуха. С определенными допущениями возможно принять, что если первые три перечисленных аспекта постоянны для заданного режима транспорта газа, то колебания температуры наружного воздуха (суточные и сезонные) являются

основным возмущающим фактором, непосредственно влияющим на процесс охлаждения газа.

Для поддержания температуры технологического газа в заданных пределах возникает необходимость в регулировании охлаждающего эффекта АВО. Это достигается за счет изменения расхода через АВО охлаждающего воздуха, на который влияют количество одновременно работающих вентиляторов, частота вращения рабочего колеса вентилятора, угол атаки лопастей.

При низких температурах наружного воздуха возникают проблемы, связанные с образованием гидратов на стенках труб теплообменных секций. Следствия загидративания – ухудшение эффективности охлаждения газа, возрастание потерь давления в теплообменных секциях, механическая деформация и разрушение труб теплообменных секций.

В АВО в холодное время года регулирование температуры газа на выходе может осуществляться снижением расхода воздуха путем выключения части вентиляторов, уменьшения угла атаки их лопастей или частотным регулированием числа оборотов вентилятора.

В системах охлаждения газа, которые в настоящее время эксплуатируются на КС, температура газа после АВО регулируется включением (отключением) вентиляторов в сочетании с сезонной регулировкой угла атаки лопастей. Естественно, такое управление приводит к неточности поддержания температуры газа и нерациональным затратам электроэнергии.

АВО газа, которые в настоящее время применяются на технологических объектах в ПАО «Газпром», эксплуатируются в широком диапазоне температур: от –45 до 50 °С. При таких значительных сезонных изменениях температуры наружного воздуха меняется и его плотность, что вызывает соответствующие колебания потребляемой электродвигателем мощности – до 30 %.

Ссылка для цитирования (for citation):

Хворов Г.А., Юмашев М.В. Анализ энергосберегающих технологий охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО «Газпром» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 9. С. 127–132.

Khvorov G.A., Yumashev M.V. Analysis of energy-saving technologies for gas cooling based on air cooling units for gas transport at Gazprom PJSC (In Russ.). Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2016, No. 9, P. 127–132.

Для периодического контроля технического состояния на АВО должно быть обеспечено локальное измерение температуры газа и перепада давления на его входе и выходе.

Количество аппаратов АВО, включенных в работу, определяется диспетчером или автоматически с учетом природно-атмосферных условий и заданного режима транспортирования газа.

При отклонении температуры газа от установленных пределов на выходе АВО и отсутствии при этом технических средств для ее изменения диспетчерская служба (ДС) принимает решение об изменении режима работы КС.

Пределы изменения температуры газа на выходе АВО должны устанавливаться ДС с учетом обеспечения продольной устойчивости магистрального газопровода, оптимального режима работы, сохранности изоляции, предотвращения гидратообразования, температуры наружного воздуха.

Образование гидратов в АВО газа происходит при охлаждении внутренней поверхности труб до температуры ниже границы фазового равновесия системы «природный газ – водяной пар». Температура гидратообразования увеличивается с ростом давления, а также с ростом концентрации тяжелых углеводородных фракций – при увеличении плотности газа. Для чистого метана в диапазоне давлений 4–10 МПа температура гидратообразования изменяется в диапазоне 279–286 К.

Обычно газ не требуется охлаждать до столь низких температур, однако опасность гидратообразования является существенной угрозой, поскольку из-за конструктивных особенностей аппаратов АВО минимальная температура поверхности труб в трубном пучке может быть намного ниже температуры газа на выходе из АВО – средней по всем рядам трубного пучка.

АВО имеют ступенчатое регулирование производительности посредством изменения угла установки лопастей вентиляторов. Эту регулировку можно выполнять только на остановленных аппаратах.

Кроме того, существует возможность регулирования работы АВО с помощью отключения части аппаратов, переупу-

ска части газа мимо АВО. В этом случае можно достигнуть наивысшей эффективности работы АВО газа, но затраты топливного газа при этом увеличиваются.

Наиболее целесообразной на КС является технология частичного отключения работающих вентиляторов. Эта технология достаточно широко применяется для регулирования режимов работы АВО газа на КС.

Параметром регулирования режимов работы АВО является температура газа на выходе из АВО. Оптимальным для снижения энергозатрат является максимальное охлаждение газа в АВО с ограничением температуры газа по условиям прочности трубной стали с учетом опасных пучений грунтов. Температура газа после АВО не должна превышать температуру наружного воздуха более чем на 15 °С при условии прихода газа на следующую КС с положительной температурой.

Одним из критериев для ограничения температуры газа за АВО является то, что температура битумной изоляции труб не должна превышать 55 °С.

Ограничение температуры газа на линейной части требуется и для предотвращения возникновения значительных термических напряжений в трубопроводах линейной части. Например, трубопроводы при эксплуатации в летний период нагреваются до 36 °С, что с учетом среднего значения зимней температуры (–10 °С) соответствует температурному перепаду в 46 °С. Нагружение трубопровода таким температурным перепадом способствует увеличению длины трубопровода за счет расширения металла: каждые 100 м трубы в свободном состоянии удлиняются на 5,5 см, а в стесненном состоянии в трубопроводе возникают температурные напряжения. Глубина охлаждения газа в зависимости от количества включенных секций АВО может составлять 15–25 °С. Ограничением минимальной температуры газа после АВО может быть расчетная температура точки росы по воде или углеводородам. Для предотвращения образования гидратов в сечении трубного пучка АВО необходимо квалифицированно выбрать зазор между температурой гидратообразования и

установкой температуры газа на выходе из общего коллектора АВО. С этой целью применяют соответствующие технологии охлаждения газа.

В настоящее время в ПАО «Газпром» разработаны и успешно реализуются следующие современные технологии охлаждения компримируемого газа в АВО:

- на основе сезонного изменения углов атаки лопастей вентиляторов;
- на основе частотного регулирования скорости вращения вентиляторов;
- на основе применения композитных материалов в конструкции силовых компонентов.

ОХЛАЖДЕНИЕ НА ОСНОВЕ СЕЗОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ УГЛОВ АТАКИ ЛОПАСТЕЙ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Эта технология применяется в целях минимизации затрат электроэнергии на электродвигателях секций АВО.

Согласование потребляемой вентилятором и располагаемой электродвигателем мощности достигается перестройкой дважды в год (весной и осенью) углов атаки лопастей вентиляторов. Эта технологическая операция трудоемка и травмоопасна, требует выполнения серьезных организационных и технических мероприятий для обеспечения безопасного выполнения работ.

Однако сезонное регулирование углов атаки лопастей вентиляторов лишь частично компенсирует дополнительные затраты (потери) электроэнергии: система «электродвигатель – вентилятор» оказывается настроенной на некий оптимум для некоторого усредненного значения температуры, при которой производится эта регулировка. Отклонение температуры наружного воздуха от этого технически фиксированного значения обуславливает работу электродвигателей и вентиляторов с ухудшенными энергетическими показателями.

ОХЛАЖДЕНИЕ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Данная технология применяется в целях обеспечения высокой точности поддержания требуемой температуры

Таблица. Результаты проведенных испытаний АВО

Table. Results of ACU tests

№ п/п Item No.	АВО ACU	Угол установки лопастей, мм Blade incidence, mm	Потребление мощности АВО, кВт ACU power consumption, kW	Температура газа на входе АВО, t_{1r} , °C Gas temperature at ACU input, t_{1r} , °C	Температура газа на выходе АВО, t_{2r} , °C Gas temperature at ACU output, t_{2r} , °C	Температура окружающего воздуха, t_a , °C Ambient air temperature, t_a , °C	Давление окружающего воздуха, мм рт. ст. Ambient air pressure, Hg mm
1	АВО № 12 р/к УК-2М АСУ No. 12 р/к УК-2М	110	78,6	33,0	10,2	-7,8	101,7
2		80	64,7	33,2	10,4	-7,8	102
3		50	48,2	33,0	11,7	-7,9	102
4		20	38,6	32,3	11,1	-8,0	102
5		0	30,6	34,7	15,3	-7,9	102,1
6	АВО № 8 р/к ГАЦ-50-4М2 ACU No. 8 р/к ГАЦ-50-4М2	30	32,2	32,3	9,9	-7,8	101,7

газа на выходе из АВО на основе управления охлаждением газа в автоматическом режиме по обратной связи от термодатчика в выходном коллекторе АВО. Скорость вращения вентиляторов регулируется преобразователями частоты за счет изменения частоты тока и напряжения, подаваемых на электродвигатели.

Оптимизация режима работы АВО газа, эксплуатируемых в условиях резко континентального климата, может быть достигнута за счет частотного регулирования производительности вентиляторов на основе применения преобразователя частоты (ПЧ). Современный ПЧ оснащен системой управления на базе промышленного микропроцессорного контроллера, который способен реализовывать не ограниченные по сложности алгоритмы управления. Производительность вентилятора пропорциональна частоте его вращения. Затраты электроэнергии на поддержание заданной температуры

газа за счет частотного регулирования производительности вентилятора оказываются меньше, чем при дискретном управлении.

Применение в системе АВО интеллектуального регулирования привода позволяет поддерживать максимальную мощность путем изменения частоты и напряжения питания электродвигателя, не допуская при этом перегрузки электродвигателя по току.

В результате применения этой технологии охлаждения газа отпадает потребность в сезонном изменении углов атаки лопастей вентиляторов: лопасти настраиваются на угол, при котором электродвигатель нагружается номинальным током. Настройки производятся один раз в летний период, когда плотность воздуха минимальна. При изменении (понижении) температуры воздуха его плотность увеличивается, а номинальный ток электродвигателя поддерживается путем регулирования частоты питающего напряжения.

При использовании интеллектуального регулируемого привода каждая секция АВО газа является замкнутым контуром регулирования с измерением температуры на выходном шлейфе, пропорциональным регулированию мощности привода.

Эта технология охлаждения газа позволяет получить дополнительную экономию электроэнергии. Алгоритмы управления АВО газа с частотно-регулируемым приводом позволяют исключить рециркуляцию, так как все вентиляторы работают с требуемой частотой вращения, в зависимости от расхода газа через секции АВО, его температуры после компримирования и температуры наружного воздуха. Кроме того, применение современной технологии векторного управления позволяет реализовать безударный «подхват» выбегающего ротора, что способствует снижению нагрузок на узлы электрических машин, возникающих при пуске.

Необходимо отметить, что система частотного регулирования скорости вращения вентиляторов АВО газа внедряется на газокompрессорных станциях магистральных газопроводов. Эти современные технологии позволяют в автоматическом режиме с высокой точностью поддерживать требуемую температуру газа на выходе из АВО. При этом управление охлаждением газа происходит в автоматическом режиме по обратной связи от термодатчика в выходном коллекторе АВО. Скорость вращения вентиляторов регулируется



Рис. 1. Коллектор плавного входа ГАЦ-50К
Fig. 1. Soft start collector ГАЦ-50К



Рис. 2. Композитное рабочее колесо ГАЦ-50-4М2
Fig. 2. Composite impeller ГАЦ-50-4М2

преобразователями частоты за счет изменения частоты тока и напряжения, подаваемых на электродвигатели. Одним из основных преимуществ систем частотного регулирования является экономия электроэнергии при работе на режимах, когда не требуется максимально возможное для данной температуры наружного воздуха охлаждение газа.

Технология охлаждения газа на основе частотного регулирования скорости вращения вентиляторов АВО газа является высокоэффективной и позволяет в автоматическом режиме с высокой точностью поддерживать требуемую температуру газа на выходе из АВО со среднегодовой экономией электрической энергии до 20 %.

Помимо экономии электроэнергии системы частотного регулирования имеют и ряд других достоинств. Это плавный пуск и разгон вентиляторов без пусковых забросов по току, исключение операций по сезонной переустановке угла атаки лопастей рабочих колес вентиляторов, дополнительная защи-

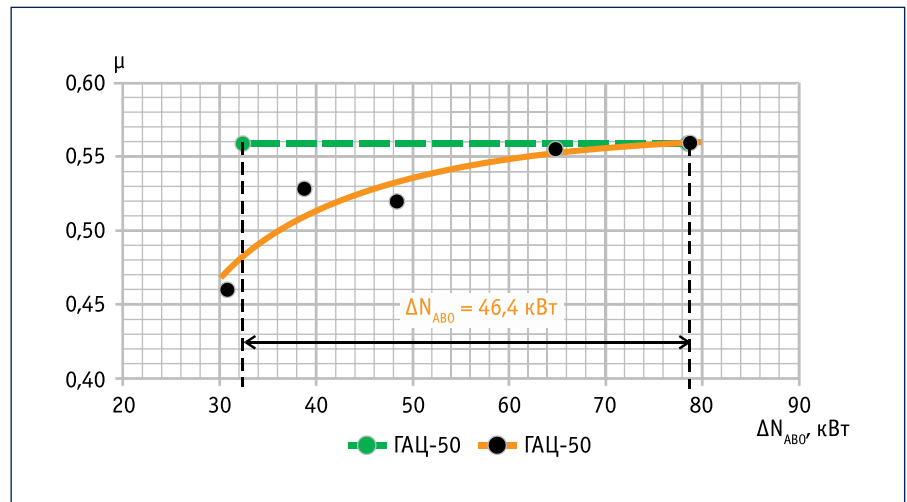


Рис. 3. Зависимость степени охлаждения газа от потребляемой мощности модернизированного и штатного АВО газа типа 2АВГ-75

Fig. 3. The dependence of the gas cooling degree of the power consumption of upgrades and standard gas ACU of 2ABG-75 type

та двигателей и электрических сетей за счет использования встроенной в преобразователи частоты системы диагностики.

При частотном регулировании все вентиляторы АВО работают одновремен-

но, обдувая всю поверхность теплообменника, а интенсивность охлаждения регулируется изменением частоты их вращения. В этом случае все аппараты работают в одинаковом режиме и обеспечивают примерно равные темпера-

NDT
RUSSIA

UTi
Approved
Event

25–27
октября
2016

Москва
Крокус Экспо

16-я Международная
выставка
оборудования
для неразрушающего
контроля
и технической
диагностики

Организаторы:



+7 (812) 390 6002/00
ndt@primexpro.ru



Забронируйте стенд:
ndt-russia.ru

0+

туры на выходе секций и в выходном коллекторе АВО. Однако, несмотря на это, температура в нижнем ряду трубок будет существенно отличаться от температуры трубок верхнего ряда теплообменника. Наличие такой разницы температур является главным фактором высокой вероятности загидрачивания нижней секции трубок.

Свести данную вероятность к минимуму можно, используя специальный «гидратобезопасный» режим работы АВО, заключающийся в том, что второй по ходу газа вентилятор реверсируется. В результате первая (по ходу газа) часть трубного пучка будет обдуваться воздухом снизу вверх, а вторая – в противоположном направлении. Встречный обдув секционных трубок приведет к тому, что в самом опасном с точки зрения возникновения гидратов сечении трубного пучка (перед выходным коллектором) температуры газа во всех рядах трубного пучка практически сравняются и риск возникновения загидрачивания нижних трубок секции АВО практически будет равен нулю.

В целях минимизации вероятности образования гидратных пробок в секциях АВО целесообразно осуществлять автоматический контроль за гидратным режимом наиболее охлаждаемых теплообменных труб секций АВО с помощью термоэлектронных датчиков гидратов.

Целесообразно отметить, что охлаждение газа на КС после компримирования приводит к уменьшению средней температуры газа на входе в следующую КС, увеличению давления газа в конце линейного участка газопровода, уменьшению степени сжатия на следующей станции при условии сохранения постоянного давления на выходе и, как следствие, к снижению энергозатрат на компримирование газа на следующей станции.

В 2002 г. на КС «Курская» были проведены испытания модернизированного АВО газа типа 2АВГ-75. После данных испытаний комплект модернизации (комpositное рабочее колесо ГАЦ-50-4М2 и коллектор плавного входа ГАЦ-50К) был рекомендован к внедрению на эксплуатируемых АВО газа типа 2АВГ-75 компрессорных станций ПАО «Газпром».

Необходимо отметить, что в процессе испытаний была получена закономерность, показывающая, что охлаждение газа на 50 °С приводит к снижению расхода топливного газа на следующей КС на 4,2 %.

Недоохлаждение газа, вызванное нехваткой вентиляторной мощности АВО или по каким-либо другим причинам, вызывает перерасход мощности ГПА для преодоления гидравлического сопротивления магистрального газопровода. Необходимо также отметить, что увеличение температуры от станции к станции при прочих равных условиях приводит к снижению пропускной способности газопровода и может привести к потере продольной устойчивости трубы.

ОХЛАЖДЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАСШИРЕННОГО СОСТАВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

В настоящее время развитие этой технологии осуществляет ЗАО «Гидроаэроцентр» (г. Жуковский). Технология с использованием композитных материалов базируется на модернизации вентиляторного блока с установкой композитных рабочих колес, коллекторов плавного входа или диффузоров с оптимальной аэродинамической конфигурацией и обеспечивает возможность значительного снижения энергопотребления АВО.

25 ноября 2014 г. были проведены испытания по определению возможности повышения эффективности работы АВО газа типа 2АВГ-75 в Заволжском ЛПУ 000 «Газпром трансгаз Нижний Новгород». По результатам проведенных испытаний составлен протокол испытаний.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что мощность, потребляемая электродвигателями модернизированного АВО газа типа 2АВГ-75 с рабочими колесами ГАЦ-50-4М2 и коллекторами плавного входа ГАЦ-50К (рис. 1, 2), ниже на 46,4 кВт (59,1 %) по сравнению с мощностью, потребляемой штатным вариантом АВО с рабочими колесами УК-2М при одинаковых степенях охлаждения газа. Результаты проведенных испытаний представлены

в таблице. Зависимость степени охлаждения газа от потребляемой мощности модернизированного и штатного АВО газа типа АВГ-75 представлена на рисунке 3.

На графике обозначена μ – степень охлаждения газа от потребляемой мощности $N_{аво}$, которая определяется по формуле:

$$\mu_{АВО} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a}$$

где T_1 – температура газа на входе АВО, T_2 – температура газа на выходе АВО, T_a – температура окружающего воздуха. Годовая экономия электроэнергии при замене рабочего колеса на ГАЦ-50-4М2 с коллектором плавного входа может достигать 40 % от базового потребления.

ВЫВОДЫ

Выбирая технологии работы установок охлаждения газа, следует исходить из критерия минимизации затрат электрической энергии на охлаждение газа при достижении оптимальной температуры газа за АВО:

- технология охлаждения компримированного газа в АВО на основе сезонного изменения углов атаки лопастей вентиляторов обеспечивает экономию электрической энергии до 10 %;
- технология охлаждения компримированного газа в АВО на основе частотного регулирования скорости вращения вентиляторов обеспечивает экономию электрической энергии до 20 %;
- технология охлаждения компримированного газа в АВО на основе применения композитных материалов в конструкции силовых компонентов обеспечивает экономию электрической энергии до 40 %.

Таким образом, задача понижения температуры газа на выходе АВО является актуальной на современном этапе инновационного развития газовой промышленности. От успешности ее решения зависит повышение уровня пропускной способности магистрального газопровода и энергетической эффективности ГТС, что непосредственно влияет на уровень эффективности бизнес-процесса в основном виде деятельности ПАО «Газпром».